М. П. КОСТЕНКО, Л. М. ПИОТРОВСКИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ТРАНСФОРМАТОРЫ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов электроэнергетических и электротехнических специальностей высших технических учебных заведений

88577 У

Библиотека ВТУЗа

«ЭНЕРГИЯ»
Ленинградское отделение
1972

6П2. 12
К73
УДК [621.313.2 + 621.314] (075.8)

М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский

К73 Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 1 — Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л., «Энергия», 1972.

544 с. с ил.

В книге излагаются основы теории электрических машин постоянного тока и трансформаторов, рассматриваются принципы их устройства и производится анализ режимов их работы.

Книга представляет собой общий курс электрических машин постоянного тока и трансформаторов и предназначена для студентов электроэнергетических и электротехнических вузов. Она может быть также полезна и инженерам-электрикам, работающим в области производства и эксплуатации электрических машин.

3-3-10
28-Б3-28-72

Рецензент—Кафедра электрических машин МЭИ (зав. кафедрой чл.-корр. АН СССР *Г. Н. Петров)*

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

По сравнению со вторым изданием книги порядок изложения относительно мало изменен. Книга пополнена новыми материалами — дописаны главы и ряд параграфов, произведена частичная перестановка глав.

Во введении существенно дополнен и переработан параграф «Развитие энергетики и электромашиностроения в СССР». Коренным образом переделана глава одиннадцатая «Основные и специальные типы машин постоянного тока и перспективы их развития». В эту главу включены новые параграфы, в которых излагаются материалы по двигателям постоянного тока для прокатных станов, машинам постоянного тока с гладким якорем и тяговым двигателям пульсирующего тока. В разделе «Трансформаторы» несколько изменено изложение материала. Из второй части книги глава седьмая «Нагревание и охлаждение трансформаторов» перенесена в первую часть в виде главы двадцать второй.

Во второй части книги переработаны и значительно расширены таблицы, содержащие основные данные по турбо- и гидрогенераторам.

Дополнительно написаны глава «Системы охлаждения турбо- и гидрогенераторов» и параграф «Турбогенераторы для атомных электростанций». Переработан ряд примеров по машинам переменного тока; подробнее рассмотрен вопрос, касающийся инерционной постоянной электрической машины.

Значительно расширен перечень литературы за счет наиболее ценных новейших работ, появившихся в отечественной и зарубежной книжной и периодической печати, посвященных вопросам теории, расчета, конструкции, исследования и эксплуатации электрических машин. Это должно дать представление

учащимся о современном научно-техническом уровне мирового электромашиностроения и облегчить использование литературных первоисточников

В третьем издании книги во всех расчетах принята Международная система единиц (СИ, SI) — ГОСТ 9867—61.

Замечания и пожелания по книге просьба посылать по адресу: 192041, Ленинград, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия»

Академик *М. П. Костенко*

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Содержание и порядок изложения материала во втором издании книги по сравнению с первым ее изданием в основном остались без изменения. Отдельные разделы несколько дополнены, а некоторые параграфы написаны заново.

Во введении расширен исторический обзор развития генераторов, двигателей и трансформаторов, заново написаны параграфы: «Развитие энергетики и электромашиностроения в СССР», «Основные законы электротехники в применении к анализу процессов в электрических машинах», «Изображение синусоидальных величин на векторных диаграммах», дополнен параграф «Материалы, применяемые в электромашиностроении». Переработана и дополнена примерами глава третья «Обмотки и э. д. с. якоря машин постоянного тока». Глава пятая «Коммутация» написана вновь, материал этой главы почти полностью обновлен. Глава шестая дополнена двумя параграфами. «Осциллографирование процессов коммутации» и «Практические выводы по теоретическим и экспериментальным исследованиям коммутации». В разделе «Трансформаторы» расширен параграф «Примеры выполнения мощных высоковольтных трансформаторов» и, в особенности, глава девятнадцатая «Несимметричные режимы работы трехфазных трансформаторов».

Вторая часть книги, посвященная рассмотрению машин переменного тока, в своей основной части подвергалась значительно меньшим изменениям.

Все численные примеры в настоящем издании книги заменены новыми.

Значительно расширен перечень литературы, включающий в себя основные фундаментальные и оригинальные работы в области теории, расчета, конструкции и исследования электрических машин. Это должно позволить учащимся ориентироваться

в существующей мировой литературе в области электрических машин и в случае надобности обращаться непосредственно к первоисточникам.

В настоящем издании в качестве основной (ГОСТ 9867—61) принята Международная система единиц (СИ, SI) в ее рационализированной форме. В некоторых случаях параллельно указаны числовые значения в смешанной системе единиц, широко используемой еще в практике электромашиностроительных заводов.

Рисунки приведены в соответствие с требованиями ГОСТ 7624—62 на условные графические обозначения для электрических схем.

Нижеподписавшийся взял на себя подготовку второго издания книги, считая, что оно является лучшим выражением его памяти о долголетней совместной работе с профессором Л. М. Пиотровским.

Академик *М. П. Костенко*

ВВЕДЕНИЕ

В-1. Краткая история развития электрических машин

А. Открытие основных законов теории электричества [6, 7]. Электротехническая наука и электромашиностроение принадлежат к молодым отраслям человеческого знания. Электромашиностроение насчитывает практически всего около ста лет. Но за этот относительно небольшой период времени проделана огромная работа, преобразившая техническое и экономическое лицо современной промышленности и общественной жизни.

Начиная с сороковых годов прошлого столетия, электротехника глубоко проникает в промышленность и быт, а за последние 30—40 лет ее прогресс стал особенно велик.

Электрическая машина, являющаяся основным преобразователем механической энергии в электрическую и электрической в механическую, а также одной формы электрической энергии в другую, отличающуюся по напряжению, току, а в ряде случаев по частоте, играла на всем историческом пути развития ведущую роль, которая определяла движение всей электротехники, особенно электротехники сильных токов.

Усовершенствования в электрической машине способствовали новым возможностям ее практического применения и служили сильными толчками для дальнейшего прогресса и самого разнообразного использования электрической энергии, поэтому электрической машине учеными и инженерами уделялось весьма большое внимание, и она быстрее приобрела техническую законченность своих конструктивных форм.

В основе современной электротехники лежат два тесно связанных физических явления — магнетизм и электричество.

Благодаря работам М. Фарадея (M. Faraday), Д. Максвелла (J. C. Maxwell), Д. Генри (J. Henry), П. Барлоу (P. Barlow), Б. Якоби, Э. Ленца и Х. Эрстеда (H. Oersted) магнетизм и электричество могут рассматриваться как единый электромагнитный процесс, который по существу и лежит в основе электрических машин. Исходными положениями для создания электрической машины послужили: открытие Эрстедом в 1820 г. явления электромагнетизма [6а, с. 40; 6в] и открытие Фарадеем в 1822 г. электромагнитного вращения [6а, с. 966]. Опыты М. Фарадея, описанные в его трактате 1822 г., показывают принцип преобразования электрической энергии в механическую. П. Барлоу в 1824 г. дал первую принципиальную модель электродвигателя (рис. В-1).

М. Фарадей в 1831 г. открыл явление электромагнитной индукции. Э. Ленц и Б. Якоби в 1833 и 1847 гг. сформулировали принцип обратимости процесса электромагнитного вращения и электромагнитной индукции, т. е. принцип обратимости электрических машин. Продолжительный период времени электрический генератор и электрический двигатель развивались самостоятельно, и только в 70-х годах XIX в. пути их развития объединились.

Б. Этапы развития электромашиностроения [1, 2, 3, 5]. *Генераторостроение.* Первыми генераторами электрической энергии были гальванические элементы,

дававшие постоянный ток, поэтому физики и химики первой половины XIX в., оперировавшие с гальваническими батареями и построившие ряд приборов и аппаратов, работавших от гальванических батарей, стремились и от электрической машины получить постоянный ток.

Первый период развития электрического генератора, в течение которого он приобрел все основные черты современной машины, охватывает промежуток времени с 1831 по 1886 г. За этот период электрическая машина постоянного тока прошла четыре этапа развития:

1. Магнитоэлектрические машины с постоянными магнитами.
2. Применение в машинах электромагнитов с независимым возбуждением.
3. Электрические машины с самовозбуждением и элементарными якорями.
4. Электрические машины с усовершенствованными якорями и многополюсной магнитной системой.

Первый этап охватывает 1831—1851 гг. За это время электрическая машина из демонстрационного механизма физических и химических кабинетов развилась до промышленной модели, примененной для целей электрохимии и освещения.

Первая техническая модель магнитоэлектрического генератора была построена вскоре после открытия М. Фарадеем закона электромагнитной индукции. Автор модели остался не известен, скрыв свое имя под инициалами П. М. (Р. М.). Этот автор построил модель многополюсной синхронной машины переменного тока с постоянными магнитами, дал идею кольцевого якоря и впервые током магнитоэлектрической машины разложил воду. Основные черты машины П. М. были настолько правильны, что на много лет определили конструкции машин позднейших изобретателей. После этого начали быстро развиваться синхронные генераторы переменного тока с постоянными магнитами.

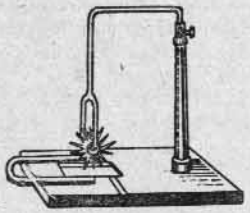


Рис. В-1. Первая модель электродвигателя П. Барлоу

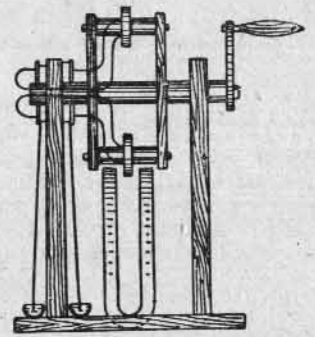


Рис. В-2. Магнитоэлектрическая машина В. Риччи с вывернутым коллектором

В 1832 г. сыновьями изобретателя физических приборов Пикси (Pixii) была построена вращающаяся магнитоэлектрическая машина, к которой было приспособлено коромысло Ампера, выпрямлявшее индуктированный в обмотках переменный ток в пульсирующий ток постоянного направления.

В 1833 г. английский физик В. Риччи (W. Ritchie) построил магнитоэлектрическую машину с вывернутым коллектором, от которой также можно было получить пульсирующий ток. На рис. В-2 дан сделанный Риччи чертеж его машины.

До 1840 г. различные изобретатели строили магнитоэлектрические машины, являющиеся модификациями двухполюсной схемы Пикси с различными конструкциями механизмов для выпрямления тока. Среди них следует отметить машину Э. Кларка (E. Clark) (рис. В-3).

Предельной конструкцией магнитоэлектрической машины переменного тока этого периода является машина фирмы «Альянс» (Alliance) (рис. В-4), сконструированная Хольмсом (F. Holmes) (1855 г.) и применявшаяся для освещения маяков, зданий и для электрохимических целей. Машина Хольмса получила одобрение видевшего ее М. Фарадея.

Характерной чертой второго этапа, к которому следует отнести промежуток времени с 1851 по 1867 г., является переход к машинам с возбуждением электромагнитами. Впервые на возможность применения электромагнитов в машинах указал Риччи в 1833 г. С 1861 до 1867 г. Г. Уайльд (H. Wilde) технически разрабатывает идею использования в машинах электромагнитов с питанием их от магнитоэлектрической машины.

К этому же периоду времени относится изобретение В. Сименсом (W. Siemens) двух-Т-образного якоря, запатентованного им в 1856 г., и изобретение Пачинотти (A. Pacinotti) кольцевого якоря, построенного в 1860 г. Якорь Сименса улучшил работу магнитоэлектрической машины и стал предвестником зубчатого цилиндрического якоря.

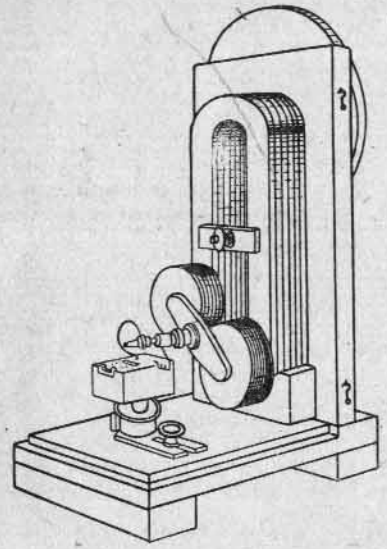


Рис. В-3. Магнитоэлектрическая машина Э. Кларка

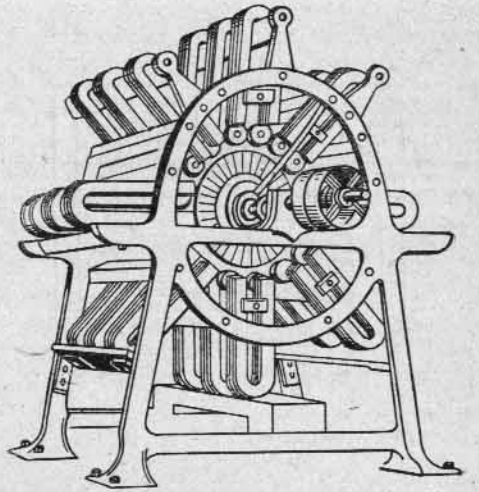


Рис. В-4. Магнитоэлектрическая машина фирмы «Альянс», сконструированная Хольмсом

Кольцевой якорь с пазами, построенный Пачинотти, явился огромным шагом вперед. Но вследствие плохой взаимной информации ученых и техников того времени и низкого уровня промышленного развития Италии изобретение Пачинотти не нашло применения, и к нему вернулись через 10 лет в связи с предложением З. Грамма (Z. Gramme).

Третий этап развития характеризуется открытием принципа самовозбуждения и охватывает промежуток времени с 1867 по 1871 г. Принцип самовозбуждения был открыт и совершенно отчетливо сформулирован еще в 1851 г. С. Хиортом (S. Hjorth), который в 1855 г. построил генератор с самовозбуждением.

В 1867 г. В. Сименс и Ч. Уитстон (Ch. Wheatston) выступили с предложениями принципа самовозбуждения, а в том же году Максвелл представил Английскому королевскому обществу теоретический доклад о принципе самовозбуждения. В. Сименс, обладая чрезвычайно большой предприимчивостью и техническим предвидением, практически реализовал принцип самовозбуждения и тем самым способствовал мощному развитию электрической машины.

Четвертый этап, явившийся этапом разработки основных элементов конструкции современной электрической машины, охватывает 15 лет — с 1871 по 1886 г. За это время машина постоянного тока приобрела все основные черты современной конструкции.

Первым решительным сдвигом в этом направлении было практическое внедрение французским изобретателем Граммом кольцевого якоря Пачинотти (рис. В-5). Машина Грамма (рис. В-6) была первой промышленной моделью с самовозбуждением, успешно работавшей в эксплуатации. В 1872 г. Ф. Гефнер-Альтенек (F. Hefner-Altenek) предложил разработанный им барабанный якорь, явившийся дальнейшим развитием якоря Сименса и якоря Пачинотти — Грамма (рис. В-7).

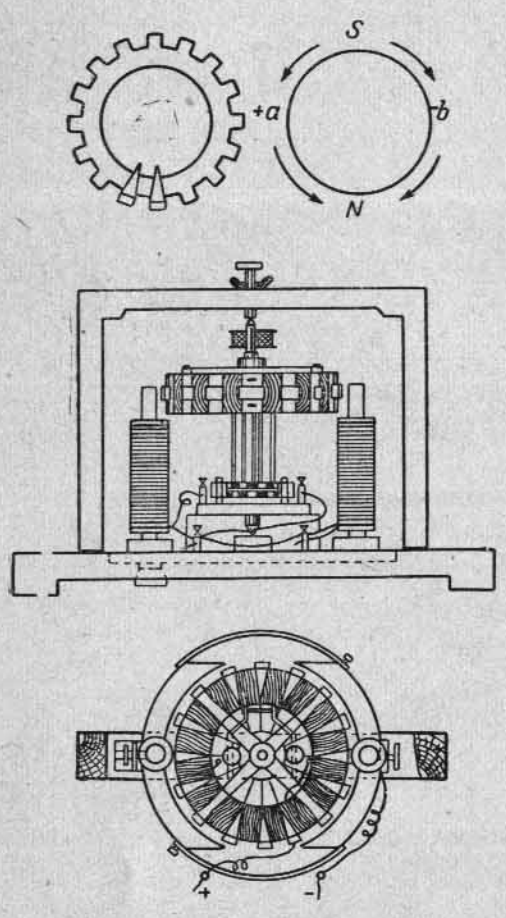


Рис. В-5. Кольцевой якорь Пачинотти

В 1882 г. Э. Вестон (E. Weston) взял патент на двухслойную обмотку для якорей машины постоянного тока. В 1880 г. появилось предложение Т. Эдисона (Th. Edison) делать якоря машин из листовой стали толщиной 0,4—0,8 *мм*. Эта конструкция сохранилась в машинах и до наших дней. В 1883 г. Дж. Крег (J. Kraig) предложил штампованные из листового материала сердечники полюсов для улучшения коммутации. В это же время идет разработка теории электрической машины и производятся исследования различных физических процессов в электрических машинах. В 1886 г. появляется исследование братьев Дж. и Э. Гопкинсон (J. и E. Hopkinson), в котором дается методика расчета магнитной цепи.

В 1876 г. П. Н. Яблочков совместно с заводом Грамма разработал конструкцию однофазного синхронного генератора для питания изобретенных им свечей переменным током. По своему принципу этот генератор послужил прототипом современных синхронных машин.

Дальнейшее совершенствование синхронных генераторов связано с широким использованием системы трехфазного переменного тока, получившей развитие в конце прошлого столетия благодаря работам замечательного ученого и инженера М. О. Доливо-Добровольского.

Развитие электродвигателей [26, 4]. Параллельно с разработкой генераторов шла разработка электрических двигателей. До 1860—1870 гг. пути развития электродвигателя и генератора были независимы друг от друга. Принцип превращения электрической энергии в механическую, сформулированный в 1822 г. М. Фарадеем, послужил началом конструирования электродвигателя.

Первый период развития электродвигателя с 1822 по 1883 г. может быть разбит на три этапа.

Первый этап, с 1822 по 1834 г., характеризуется построением физических моделей, которые подтверждали принципиальную возможность преобразования электрической энергии в механическую.

Многие ученые и изобретатели стремились в своих двигателях повторить механическую схему работы паровой машины с возвратно-поступательным движением (рис. В-8), следствием чего явились машины, построенные на принципе втягивания железного стержня внутрь соленоида. Примерами таких двигателей являются электродвигатель Д. Генри и позднее, в 1846 г., электродвигатель профессора Ч. Пэджа (Ch. Page). По этому принципу (рис. В-8) Ч. Пэджу удалось осуществить в 1851 г. машину мощностью 16 *л. с.* Поставленный на локомотив и получавший питание от батареи гальванических элементов Грове (W. R. Grove), двигатель позволил развить скорость до 30 *км/ч*, чем было положено начало электрической тяге. Переключение направления тока в соленоидах электродвигателя осуществлялось, по аналогии с золотниковым устройством паровой машины, посредством кулачка, переключавшего направление подачи пара на поршень.

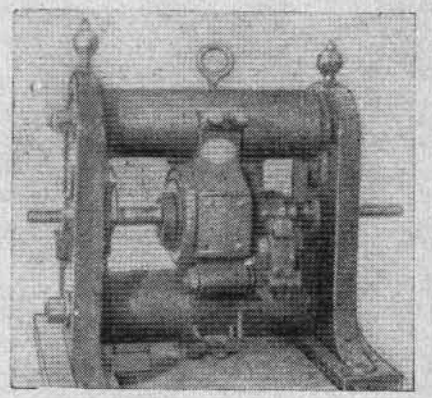


Рис. В-6. Электрическая машина Грамма, первая промышленная модель с самовозбуждением

Второй этап, с 1834 г. по 1867—1870 гг., характеризуется попытками построить электродвигатели для практического применения с питанием также от гальванических элементов. В мае 1834 г. русский ученый академик Б. С. Якоби создал многополюсный электродвигатель с вращательным движением якоря, который имел приспособление для переключения тока, являющееся прототипом современного коллектора (рис. В-9). В 1838 г. двигатель подобного типа, развивавший мощность до 500 *вт*, был установлен Б. С. Якоби вместе с гальванической батареей из 320 элементов Даниэля (J. F. Daniell) на катере, имевшем длину 8,5 *м* и ширину 2,1 *м*. Катер с 16 пассажирами мог передвигаться по р. Неве не только по течению, но и против него, что явилось началом электродвижения судов. В июле 1834 г., несколько позже Б. С. Якоби, но независимо от него, американский изобретатель Т. Дэвенпорт (T. Davenport) осуществил электродвигатель также с вращательным движением

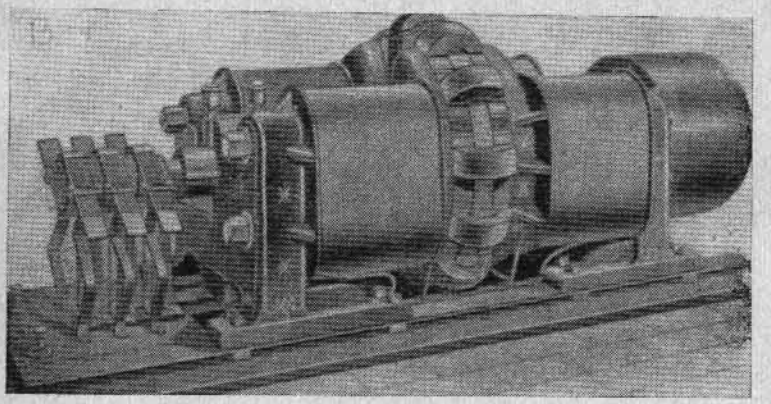


Рис. В-7. Электрическая машина с барабанным якорем, предложенным Ф. Гефнер-Альтенеком

электромагнитов, но имевший по сравнению с двигателем Б. С. Якоби более примитивное переключающее приспособление, построенное на принципе подвода тока через гибкие пружинки.

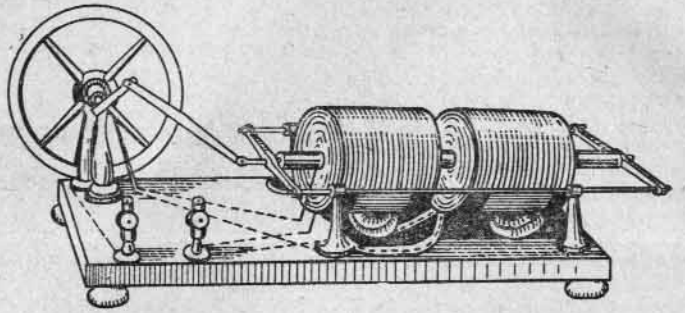


Рис. В-8. Модель электродвигателя Ч. Пэджа с возвратно-поступательным движением

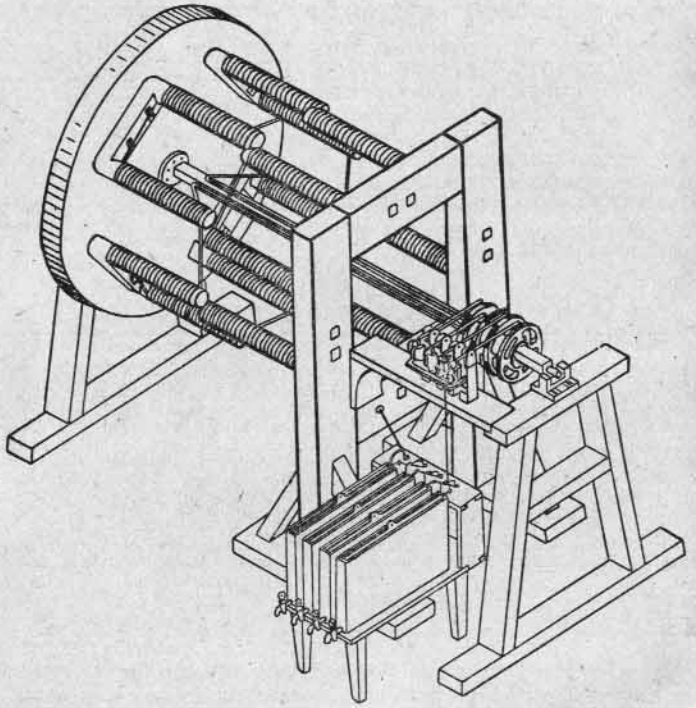


Рис. В-9. Двигатель Б. С. Якоби с вращательным движением

Третий этап развития электродвигателей занимает промежуток времени с 1867 по 1887 г. В связи с открытием и промышленным использованием принципа самовозбуждения был окончательно осознан и сформулирован принцип обратимости электрической машины. Питание двигателей стало производиться

от более дешевого источника электрической энергии — электромагнитного генератора постоянного тока.

В 1862 г. Г. Уайльд показал принцип работы синхронного двигателя и синхронное вращение двух электрически связанных при помощи контактных колец якорей постоянного тока. В 1883 г. была опубликована работа Айртона и Пири по вопросу регулирования скорости электродвигателей постоянного тока, в которой впервые были даны основные математические связи между скоростью вращения и электромагнитными величинами. К 1886 г., как и генератор электрической энергии, электрический двигатель постоянного тока приобрел основные черты современной конструкции.

Хотя постоянный ток и машины постоянного тока отодвигаются постепенно на второй план, но работы по их усовершенствованию не прекращаются. В1891 г.

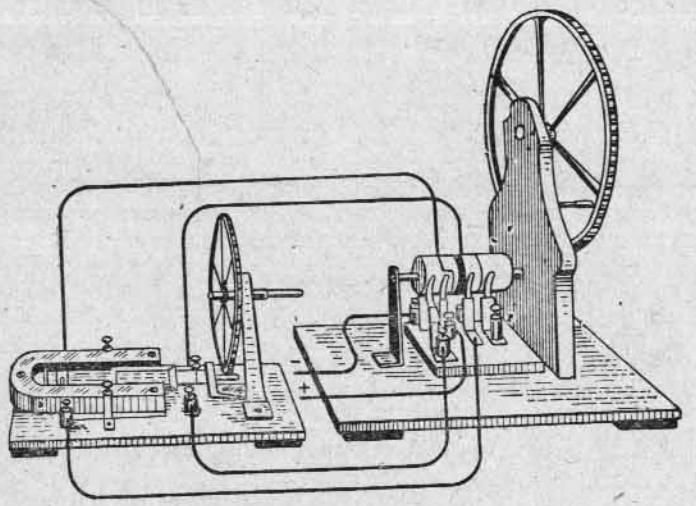


Рис. В-10. Двигатель М. Депре

появилась последовательно-параллельная обмотка Е. Арнольда (E. Arnold). Им же впервые устанавливаются общие правила выполнения и формулы обмоток, исследуются вопросы коммутации машин постоянного тока и изучается поведение щеточного контакта. В 1899 г. создается теория коммутации Е. Арнольда и Г. Ми (G. Mie), которая с известными изменениями и дополнениями не потеряла своего значения до настоящего времени.

В связи с выполнением синхронных генераторов переменного тока, применявшихся вначале главным образом для целей освещения, возникает интерес к созданию двигателей переменного тока. В 1886 г. Э. Томсон (E. Thomson) предложил схему репульсионного однофазного двигателя, но ряд практических затруднений не дал возможности этой машине сделаться достаточно конкурентоспособной с двигателем постоянного тока. Новый тип преобразователя электрической энергии в механическую — асинхронный двигатель переменного тока — был создан на основе работ Г. Феррариса (G. Ferraris) и Н. Тесла (N. Tesla) в 1888 г.

В 1879 г. Бейль (Beil) построил двигатель, в котором прерывисто вращающееся магнитное поле создавалось при помощи двух коммутированных токов от гальванической батареи. В 1880 г. М. Депре (M. Deprez) получил аналогичным путем синхронную передачу движения (рис. В-10). С исключительной быстротой новая идея, появление которой было так необходимо для развития и промышленного применения системы переменного тока, завоевала всеобщее признание.

Н. Тесла построил первые двухфазные асинхронные двигатели (рис В-11) и показал возможность асинхронного пуска синхронного двигателя.

Дальнейшее чрезвычайно успешное развитие система переменного тока получила благодаря работам М. О. Доливо-Добровольского, предложившего трехфазную систему переменного тока и соответственно конструкцию трехфазного короткозамкнутого асинхронного двигателя, построенного им в 1889 г. К 1893 г. М. О. Доливо-Добровольский разработал асинхронные двигатели с двойными беличьими клетками, имевшие улучшенные пусковые свойства по сравнению с обычным короткозамкнутым двигателем.

В 1891 г. Гергес (H. Görges) выступил с докладом о последовательных и шунтовых коллекторных двигателях. Уже за первое десятилетие своего существования асинхронный двигатель достиг значительного совершенства. Исключительно глубокие работы М. Леблана (M. Leblanc), показавшего связь между

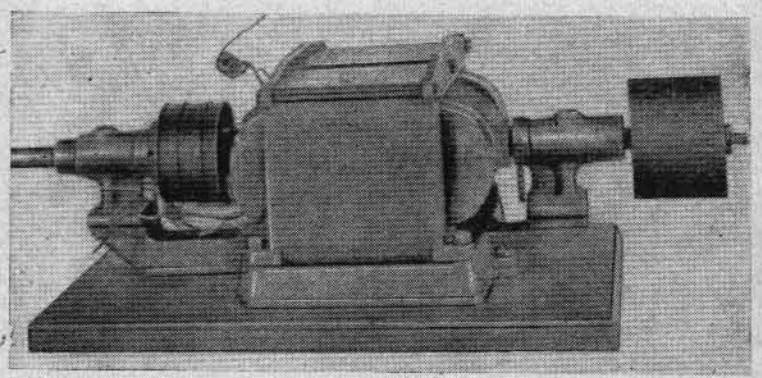


Рис. В-11. Двухфазный асинхронный двигатель Н. Тесла

характером кривой момента и параметрами двигателя, А. Блонделя (A. Blondel) установившего основы физических процессов в машинах переменного тока и явившегося основоположником теории двух реакций явнополюсной синхронной машины, А. Гейланда (A. Heyland), давшего первую круговую диаграмму асинхронного двигателя, К. Штейнметца (Ch. Steinmetz), разработавшего основы символического метода и целый ряд других сложнейших вопросов теории переменного тока, создали основной фундамент для практического развития техники переменного тока.

В 1893 г. появилась схема каскадного соединения асинхронных двигателей Гергеса, схема с переключением числа полюсов Р. Даландера (R. Dalander), пусковые и успокоительные клетки синхронных двигателей М. Леблана. В 1901 г. создается фазокомпенсатор М. Леблана для компенсирования реактивного намагничивающего тока асинхронных двигателей с фазным ротором. Получают, далее, значительное применение однофазные последовательные и репульсионные коллекторные двигатели, в особенности для целей электрической тяги. В 1901 г. выполняются первые компенсированные двигатели Гейланда и Осноса (M. Osnos). Электрический двигатель все теснее связывается с производственной машиной, и последняя стремится использовать выгодные стороны нового типа привода. Намечается переход на индивидуальный привод с использованием возможностей плавной регулировки скорости для увеличения производительности станков и механизмов.

В 1910 г. появился регулируемый шунтовой трехфазный коллекторный двигатель, одновременно и независимо изобретенный К. Шраге (K. Schrage) и Р. Рихтером (R. Richter). Двигатель Шраге—Рихтера быстро завоевал широкое признание и в ряде случаев дал технически весьма ценное и совершенное решение.

В 1904 г. была создана система В. Кремера (W. Krämer) каскадного соединения мощного асинхронного двигателя с двигателем постоянного тока через промежуточный одноякорный преобразователь, что дало возможность производить регулировку скорости до 40% вниз от синхронной скорости.

В дальнейшем получила существенное развитие предложенная еще в 1905 г. коллекторная трехфазная машина Шербиуса (A. Scherbius), применяемая при соединении в каскад с асинхронной машиной для регулирования ее скорости в пределах до $\pm 25\%$.

Для непрерывного управления приводами электромашинным путем к концу 30-х годов был создан ряд электромашинных усилителей — усилитель с поперечным полем (ЭМУ), усилитель с самовозбуждением, с регулирующими возбудителями и т. д. Эти системы, и особенно системы ЭМУ, нашли самое широкое применение в современной промышленности.

Наряду с этим внедрение автоматики и телемеханики в производственные процессы потребовало разработки электромашин минимальной мощности, порядка нескольких ватт, так называемых микроэлектромашин. Число типов этих машин необычайно велико, и по способам проектирования, испытания и эксплуатации они во многом отличаются от машин, предназначенных для работы в энергетических системах. В настоящее время эта область электромашиностроения находится в стадии весьма быстрого развития.

Передача энергии на большие расстояния и ее трансформирование [3, 8, 13]. Машина постоянного тока, получив достаточно определенные черты своего развития, выявила также ряд трудностей, связанных с получением больших единичных мощностей и высоких напряжений на ее зажимах. Первые опыты с передачей энергии постоянным током, проведенные Марселем Депре в 1883 — 1886 гг., показали большое значение этих работ, но обнаружили в то же время затруднения, связанные с системой постоянного тока высокого напряжения, так как 7000 *в* на коллекторе одной машины явились практическим пределом для напряжения машины постоянного тока. Для получения высокого напряжения постоянного тока на генераторной станции включались последовательно несколько генераторов постоянного тока высокого напряжения, а на приемной станции ряд двигателей постоянного тока высокого напряжения, приводивших во вращение синхронные генераторы переменного тока, связанные с приемной системой. Наибольшего совершенства по этой схеме достигла система Р. Тюри (R. Thury), по которой была осуществлена передача постоянного тока высокого напряжения 57,6 *кв* Мутье—Лион на расстояние 180 *км*, с общей мощностью около 4650 *квт*.

В дальнейшем практика показала особо большие преимущества дальних передач переменного тока, которые и получили затем самое широкое распространение. Однако в настоящее время, в связи с развитием совершенных преобразовательных устройств переменного тока в постоянный и постоянного в переменный посредством ртутных выпрямителей, снова начали осуществляться отдельные передачи постоянного тока высокого напряжения как в СССР, так и за рубежом особенно при передаче энергии подводным кабелем. Передачи переменного тока показали большие преимущества перед передачами постоянного тока ввиду исключительной легкости изменения напряжения с помощью трансформаторов в сторону его увеличения и понижения как в самих электропередачах, так и в распределительных системах. Нужно отметить, что на первых порах попытки использовать электроэнергию переменного тока встречали резкие возражения даже со стороны таких крупнейших авторитетов своего времени, как Т. Эдисон. История появления и развития трансформатора как преобразователя напряжения является весьма примечательной.

В 1844—1847 гг. Б. С. Якоби, занимаясь вопросами минной обороны, применил индукционные катушки, являющиеся по своей идее простейшим типом трансформатора. С помощью этих катушек производилось зажигание пороха мин. Эти работы на много лет опередили аналогичные заграничные работы. В устройствах Б. С. Якоби электрическая энергия от индукционной катушки передавалась при помощи подводного кабеля на расстояние до 9 *км* к распределительному и питающему пункту, от которого она параллельно распределялась к запалам отдельных мин. Это, собственно, явилось первой схемой практического использования электрической энергии, в которой имели место трансформация,

передача энергии на относительно значительные расстояния к питающему узлу и затем ее параллельное распределение к точкам потребления.

Не менее замечательной явилась система П. Н. Яблочкова, осуществившего в 1876 г. первую промышленную установку для питания изобретенных им дуговых свечей переменного тока в Париже. Для этой установки Яблочков создал однофазный трансформатор с разомкнутой магнитной цепью. Поэтому можно считать, что он явился изобретателем важнейшего в электротехнике аппарата — трансформатора, примененного для промышленной передачи энергии.

После этого трансформаторы получили широкое развитие. В 1882 г. на Всероссийской промышленной выставке И. Ф. Усагин демонстрировал использование трансформатора П. Н. Яблочкова не только для освещения, но также в установках для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую и тепловую энергию, что дало новый толчок для развития техники переменного тока. В 1885 г. Голард (A. Gaulard) и Гибс (A. Gibbs) в Америке и инженеры фирмы «Ганц» в Будапеште

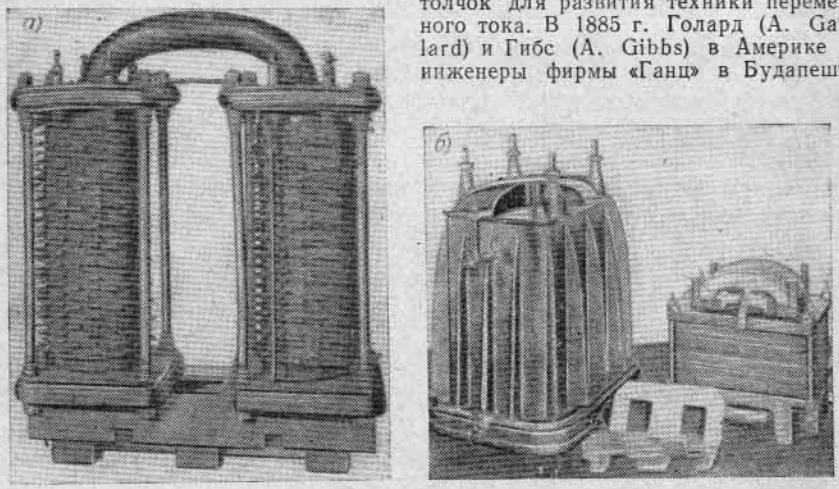


Рис. В-12. Первый технический трансформатор с замкнутой магнитной цепью: *а* — стержневого типа; *б* — броневого типа

Дери (M. Deri), Блати (O. Blathi) и К. Циперновский (C. Zipernowsky) разработали технический трансформатор с замкнутой магнитной цепью из изолированной проволоки, с кольцевым и броневым сердечником, что послужило новым существенным исходным положением для развития техники переменного тока и передачи его на расстояние (рис. В-12, *а* и *б*).

В 1891 г. М. О. Доливо-Добровольский в связи с разработанной им системой трехфазного тока создал конструкцию трехфазного сухого трансформатора с обычным и в настоящее время применяемым расположением трех стержней сердечника в одной плоскости. В том же 1891 г. директор завода «Эрликон» в Швейцарии Браун (Braun) построил первые масляные однофазные трансформаторы на весьма высокое по тому времени напряжение переменного тока 30 *кв*. Эти трансформаторы показали, что масло является не только агентом, охлаждающим обмотки, но также и изолирующим материалом.

В связи с изобретением М. О. Доливо-Добровольским ранее трехфазного асинхронного двигателя появились предпосылки применения передачи энергии трехфазного переменного тока не только для освещения, но и для промышленного преобразования электрической энергии трехфазного тока в механическую энергию.

Первой дальней передачей переменного трехфазного тока явилась передача электрической энергии от гидроэлектростанции мощностью около 200 *квт* в Лауффене на международную электротехническую выставку во Франкфурте-

на-Майне в 1891 г. на расстояние 170 *км*. Трехфазный генератор, построенный по проекту Брауна, имел мощность 230 *ква*, напряжение 95 *в* при скорости вращения 150 *об/мин*; напряжение от него повышалось с помощью трансформатора до 15 000 *в*. На выставке с помощью трансформатора напряжение понижалось до 113 *в* линейного напряжения и подводилось к асинхронному трехфазному двигателю мощностью 75 *квт*, приводившему во вращение насосную установку.

Изобретение трансформаторов явилось мощным толчком для дальнейшего развития передачи электроэнергии на дальние расстояния. С развитием электропередач постепенно увеличивалась как мощность трансформаторов в единице, так и их напряжение. В настоящее время применяются как трехфазные, так и однофазные трансформаторы, соединенные в трехфазную группу. На рис. 12-25 представлен однофазный трансформатор 100 *Мва* трехфазной группы 300 *Мва*, построенный французской фирмой «Севуазьен» для электропередачи Волгоград—Москва на напряжение 525 *кв*. В Канаде сооружена электропередача на напряжение 735 *кв*.

XXIV съезд КПСС принял решение о проведении работ по созданию электропередачи переменного тока на напряжение 1150 *кв* и электропередачи постоянного тока на напряжение 1500 *кв*.

Очень большое значение для трансформаторостроения и всего электромашиностроения в целом имело изобретение в начале текущего столетия легированной стали, содержащей примесь кремния. Эта сталь, обладая лучшими магнитными характеристиками и меньшими потерями в стали, позволила уменьшить габариты и массу трансформаторов и машин, повысив одновременно их коэффициент полезного действия.

88 57

В-2. Развитие энергетики и электромашиностроения в СССР

В важнейших отраслях промышленности дореволюционной России, в том числе и в электромашиностроении, преобладал иностранный концессионный капитал, отнюдь не заинтересованный в развитии этого вида промышленности в России. Существовавшие до Великой Октябрьской социалистической революции электромашиностроительные заводы ограниченной мощности фирм «Сименс—Шуккерт» и «Дюфлон—Константинович» в Петербурге, «Вольта» в Ревеле, Всеобщей компании электричества в Риге и другие имели характер сборочных мастерских, работавших по директивам концессионеров, и не представляли собой предприятий, предназначенных для выполнения самостоятельных задач. В этих условиях творческая электротехническая мысль не имела в дореволюционной России благоприятной почвы для своего развития, и русские электротехники, несмотря на их исключительную техническую инициативность, не могли развернуть своей деятельности в должной мере.

Положение резко изменилось после Великой Октябрьской социалистической революции. В кратчайший отрезок времени были созданы мощные электромашиностроительные заводы, с успехом выполнявшие и выполняющие самые сложные и ответственные задания нашего развивающегося народного хозяйства. Для работы на этих заводах были подготовлены необходимые кадры электромашиностроителей, параллельно с этим была широко развернута научно-исследовательская работа на заводских испытательных и исследовательских стендах и в лабораториях вузов и научно-исследовательских институтов.

Развитие советского электромашиностроения находится в теснейшей связи с грандиозной задачей электрификации СССР, которую партия и правительство поставили непосредственно после окончания гражданской войны. Основными принципами советской электроэнергетики являются:

1) плановый характер ее развития, связанный с общегосударственным планом развития народного хозяйства;

2) централизованная выработка электроэнергии на районных электрических станциях;

3) сооружение тепловых электрических станций на местных и пизкокалорийных видах топлива и мощных гидроэлектростанций;

4) создание и развитие мощных электроэнергетических снетем, связанных для совместной работы линиями передачи высокого напряжения.

Библиотека ВТУЗа

Эти принципы были положены в основу исторического плана ГОЭЛРО, разработанного в 1920 г. по инициативе В. И. Ленина, и нашли свое дальнейшее развитие и практическую реализацию в годы предвоенных пятилеток.

По плану ГОЭЛРО предполагалось в течение 10—15 лет построить тридцать электростанций с суммарной установленной мощностью 1700 тыс. *квт*. Этот план, названный В. И. Лениным «второй программой партии», создал основу для дальнейшего строительства планового хозяйства страны и открыл великую эпоху работ по социалистической реконструкции всего народного хозяйства.

Под руководством партии план ГОЭЛРО был выполнен досрочно к 1 января 1931 г. Мощность электростанций увеличилась в три траза, а выработка энергии — в четыре раза по сравнению с 1913 г. За этот же период времени, до 30-х годов, советское электромашиностроение сделало первые шаги в области производства крупных электрических машин и освоило ряд новых типов машин и серий или модернизировало оставшиеся от дореволюционного времени старые серии.

В период Великой Отечественной войны развитие энергетики и электрификации СССР было заметно сокращено, тем более, что некоторые электротехнические заводы были эвакуированы в восточные районы страны, а другие оказались в блокаде (Ленинград) или были оккупированы (Харьков). Однако в послевоенный период снова началось чрезвычайно быстрое восстановление и развитие энергетики — районных электростанций и электротехнических заводов. В это же время была произведена модернизация и реконструкция старых заводов и построены новые как для крупного электромашиностроения, так и для массового производства серийных электрических машин и электротехнической аппаратуры. Соответственно стало резко повышаться производство электроэнергии, которое по сравнению с предвоенным 1940 г. возросло к 1950 г. в два раза, а к 1960 г. — уже в шесть раз. В 1960 г. выработка электроэнергии в СССР составляла около 35% производства электроэнергии наиболее развитой промышленной капиталистической страны США.

XXIV съезд КПСС принял грандиозную программу развития народного хозяйства СССР на ряд лет, в которой энергетика и электрификация, являющиеся основой развития промышленности, транспорта и сельского хозяйства, играют решающую роль. По истекшим и намеченным периодам выработка электроэнергии и установленная мощность электростанций СССР могут быть представлены следующими данными:

Год	1950	1955	1960	1965	1970	1980 (план)
Выработка электроэнергии в миллиардах *квт·ч*	91,2	170,2	292,3	515—540	740	2700—3000
Установленная мощность в миллионах *квт*	19,6	37,2	66,7	112—117	165	540—600

По этим показателям СССР занимает уже второе место в мире после США и первое место в Европе.

По приведенным данным намечается удвоение выработки электроэнергии и соответствующее возрастание установленной мощности электростанций в СССР приблизительно в течение шести-семи лет.

В США намечается удвоение выработки электроэнергии в течение приблизительно 10 лет, так что к концу века по выработке электроэнергии и установленной мощности электростанций СССР и США должны будут иметь уже, по крайней мере, одинаковые данные.

Грандиозные задачи электрификации всей страны не могут быть решены простым количественным ростом установленных мощностей на основе освоенных в настоящее время научно-технических и производственно-конструктивных решений. Необходимо разработать новые системы и конструкции энергетических установок, агрегатов и аппаратов.

От строительства тепловых электростанций мощностью 600—2400 *Мвт* с турбоагрегатами 100—300 *Мвт* намечается переход к сооружению электростанций мощностью 2500—4000 *Мвт* с агрегатами по 500—800 *Мвт* и далее по 2000 *Мвт*, причем речь здесь идет не об единичных уникальных агрегатах. Поскольку за ближайшие десятилетия на электростанциях должно быть введено в действие свыше 700 агрегатов мощностью от 100 до 1200 *Мвт*, то должны быть созданы достаточно крупные серии агрегатов каждой ступени чрезвычайно

большой мощности. Одновременно будут сооружаться электростанции с применением газового и парогазового цикла, а в районах дорогого топлива — атомные электростанции.

Огромные задачи предстоят в области строительства гидроэлектростанций. Построены наиболее мощные в мире Братская ГЭС на 4500 *Мвт*. Красноярская ГЭС на 6000 *Мвт*. В ближайшие годы будут сооружены Саяно-Шушенская ГЭС на 5000—6000 *Мвт* с агрегатами по 800 *Мвт* и ряд других подобных гидроэлектростанций в Сибири в районе рек Ангары, Енисея и др.

Грандиозные задачи в области строительства электростанций требуют создания большого количества мощнейших турбогенераторов с паровыми быстроходными турбинами к ним, гидрогенераторов с гидравлическими турбинами, трансформаторов и синхронных компенсаторов. На рис. В-13 представлено развитие турбогенераторостроения в довоенное время на Ленинградском заводе «Электросила» им. С. М. Кирова. На рис. В-14 показано дальнейшее развитие турбогенераторостроения в послевоенные годы на заводе «Электросила» и на Харьковском заводе «Электротяжмаш», где были разработаны новые серии быстроходных высокоиспользованных турбогенераторов на 3000 *об/мин* с непосредственным охлаждением обмоток статора и ротора водородом — серии ТВ2 (завод «Электросила») и ТГВ (завод «Электротяжмаш») и с охлаждением обмоток статора водой и обмоток ротора водородом — серия ТВВ-2. Если турбогенератор завода «Электросила» мощностью 100 *Мвт* довоенного производства 1938 г. имел расход материала на 1 *кв·а* мощности 2,07 *кг/кв·а*, то современные турбогенераторы мощностью порядка 300 *Мвт* при $\cos\varphi = 0{,}85$ (серии ТВВ-300 и ТГВ-300) имеют расход материала на единицу мощности около 0,93 *кг/кв·а*. В настоящее время на обоих заводах разработаны турбогенераторы 500 *Мвт* с расходом материала на единицу мощности порядка 0,65 *кг/кв·а*.

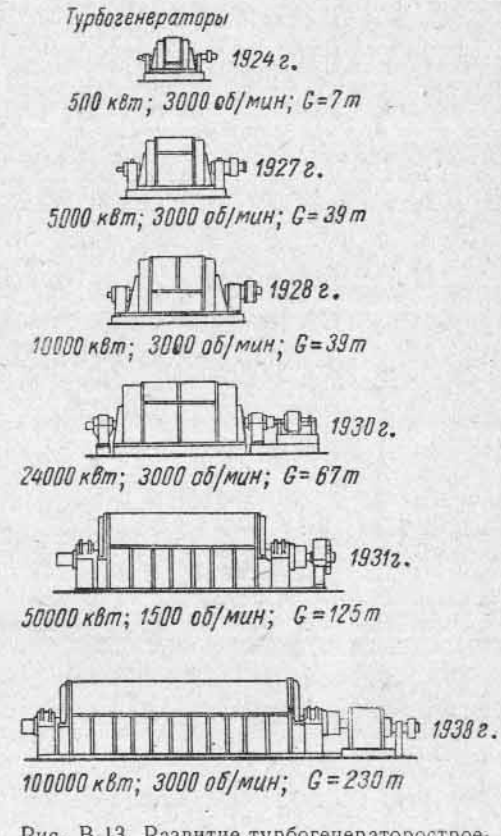


Рис. В-13. Развитие турбогенераторостроения в СССР в довоенный период (завод «Электросила» им. С. М. Кирова)

На заводе ЛЭО «Электросила» построен турбогенератор мощностью 800 *Мвт* с удельным расходом материала 0,457 *кг/кв·а*.

Ведутся работы по созданию самого мощного в мире двухполюсного одновального турбогенератора 1200 *Мвт*, 3000 *об/мин*. Этот турбогенератор должен войти в эксплуатацию в 1975 г.

В Директивах XXIV съезда КПСС особое внимание уделено развитию атомной энергетики. В связи с этим научно-исследовательскими институтами и заводами Министерства электротехнической промышленности СССР развернуты работы по созданию одновальных четырехполюсных турбогенераторов с единичной мощностью 500 и 1000 *Мвт* для атомных электростанций (АЭС). Первые образцы этих турбогенераторов должны быть изготовлены в 1975—1976 гг.

Соответственно исключительное развитие получило советское гидрогенераторостроение. На рис. В-15 представлен рост единичной мощности гидроагрегатов с турбинами поворотно-лопастного типа для низконапорных гидроэлектростанций, до напора около 20 *м*, а на рис. В-16 — рост единичной мощности гидроагрегатов с турбинами радиально-осевого типа для высоконапорных гидроэлектростанций, до напора около 100 *м*.

Рост единичных мощностей гидрогенераторов завода «Электросила» им. С. М. Кирова, построенных в довоенное время, приведен на рис. В-17, а соответствующий рост для гидрогенераторов, построенных в после-

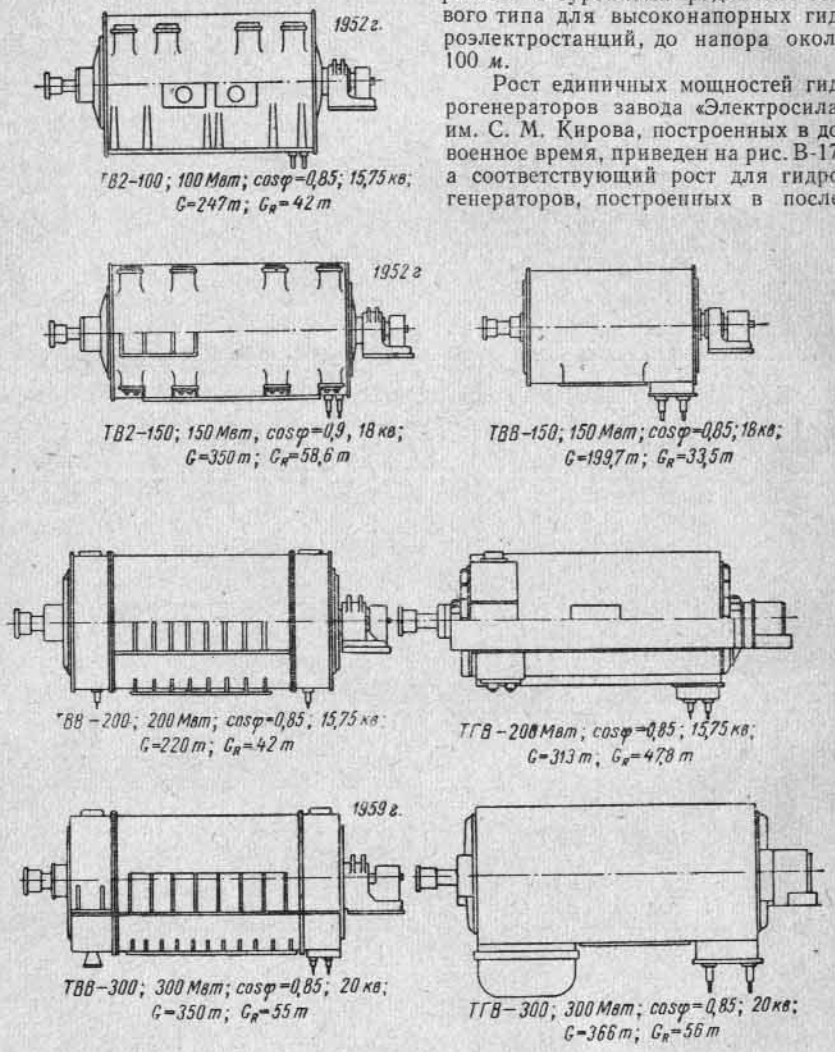


Рис. В-14. Развитие отечественного турбогенераторостроения в послевоенные годы

военные годы на заводах крупного электромашиностроения в Ленинграде, Харькове, Свердловске и Новосибирске, представлен на рис. В-18.

В последнее время построены гидрогенераторы с поворотно-лопастными турбинами для следующих ГЭС (см. табл. на стр. 23).

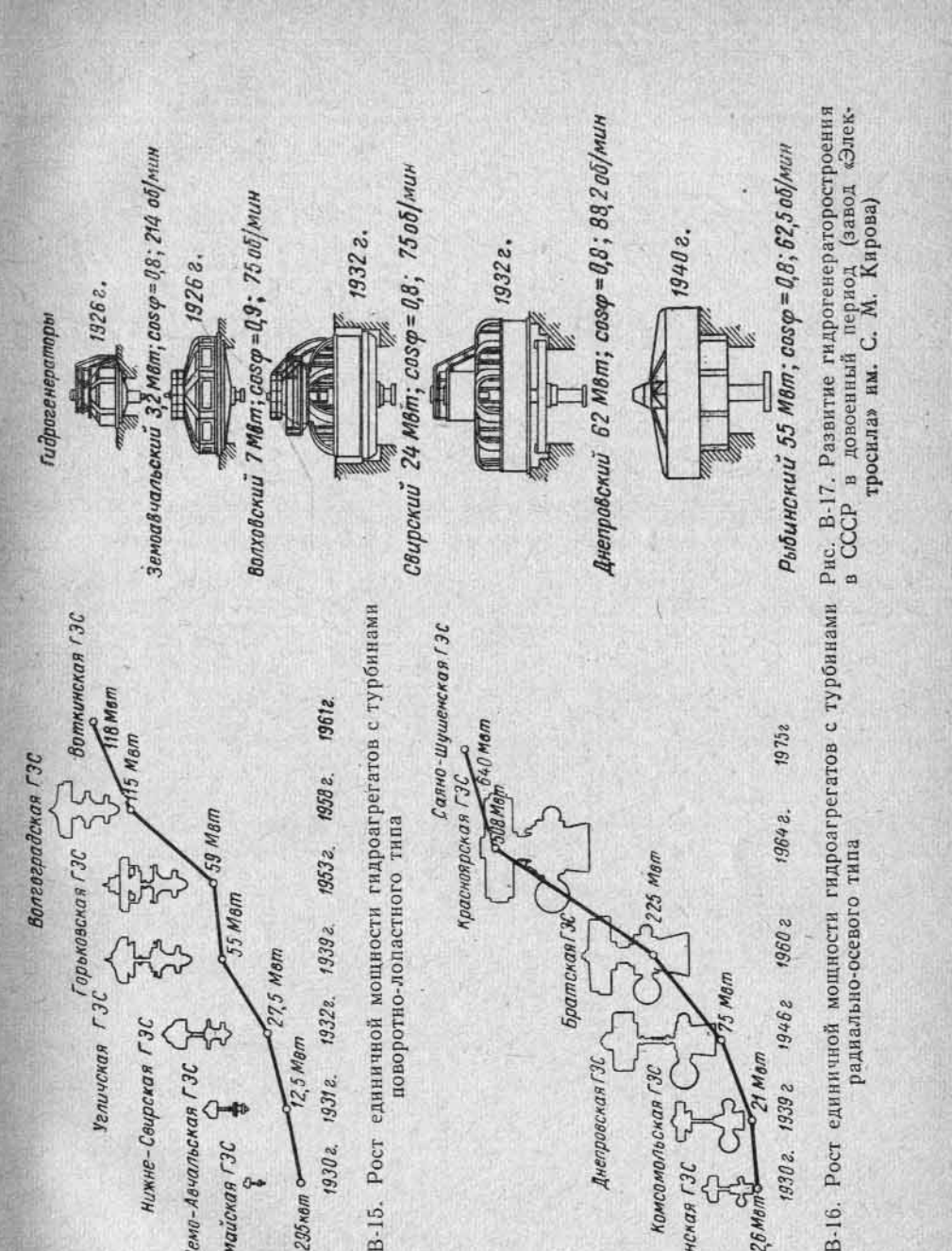


Рис. В-15. Рост единичной мощности гидроагрегатов с турбинами поворотно-лопастного типа

Рис. В-16. Рост единичной мощности гидроагрегатов с турбинами радиально-осевого типа

Рис. В-17. Развитие гидрогенераторостроения в СССР в довоенный период (завод «Электросила» им. С. М. Кирова)

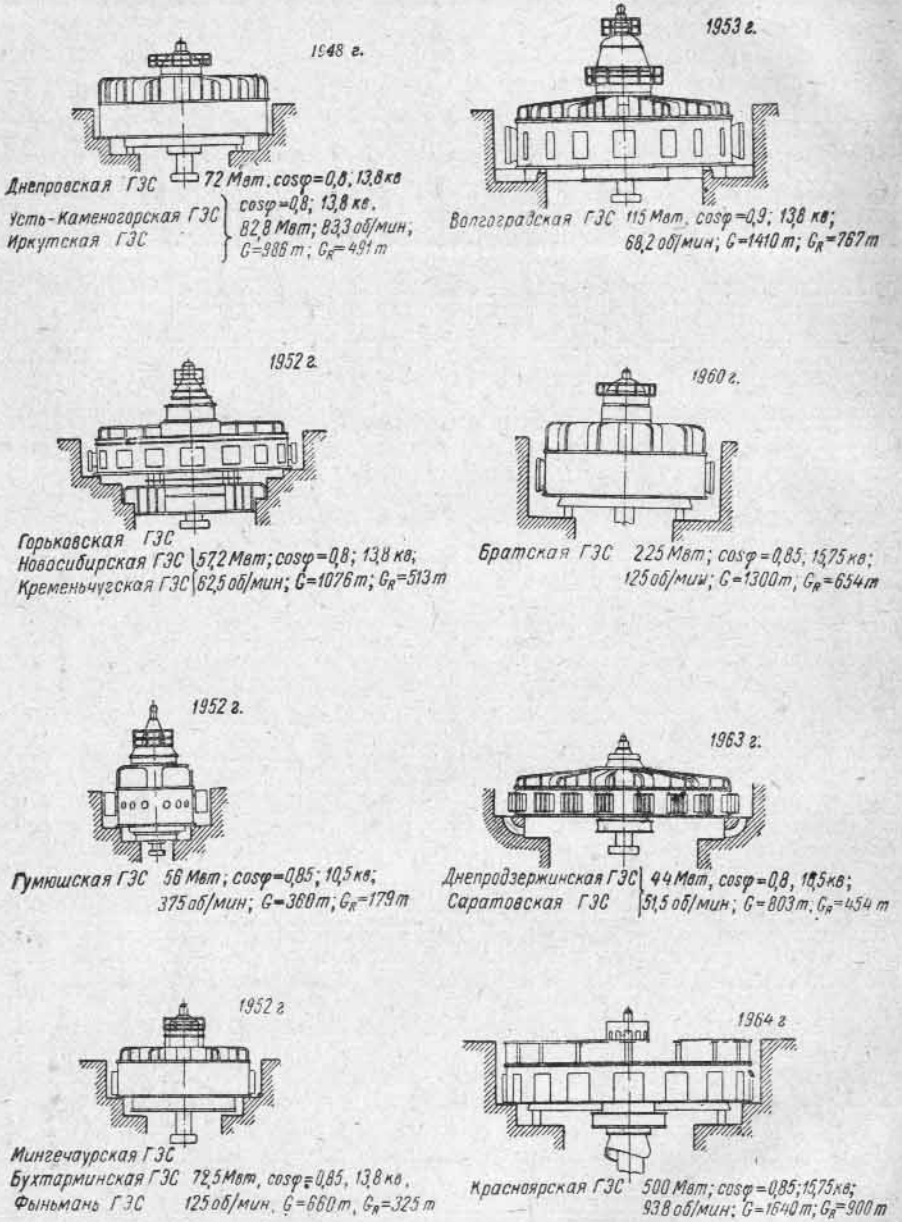


Рис. В-18. Развитие отечественного гидрогенераторостроения в послевоенные годы

Наименование ГЭС	Единичная мощность гидроагрегата, *Мвт*	Год ввода агрегата
Фархадская	37,5	1960
Воткинская	118	1961
Уч-Курганская	56,25	1961
Днепродзержинская	53,5	1963

Нужно отметить, что в области гидрогенераторостроения СССР занимает сейчас ведущее место в мире не только в отношении мощностей гидрогенераторов, но и по их давлению на опорную пяту, достигающему в СССР 3500 *Т*. В настоящее время в США наибольшее давление на пяту ограничивается 1800 *Т*.

За рубежом более крупные гидрогенераторы мощностью порядка 225 *Мв·а* при 200 *об/мин* построены в Швеции. В СССР уже созданы гидрогенераторы мощностью 265 *Мв·а* при 125 *об/мин* для Братской ГЭС и 590 *Мв·а* при скорости вращения 93,8 *об/мин* для Красноярской ГЭС. Проектируются гидрогенераторы 640—800 *Мв·а* для Саяно-Шушенской ГЭС.

В СССР построены синхронные компенсаторы мощностью 160 *Мв·а*, 750 *об/мин* при $2p = 8$.

Разрабатывается синхронный компенсатор с полным водяным охлаждением мощностью 345 *Мв·а*, 750 *об/мин*.

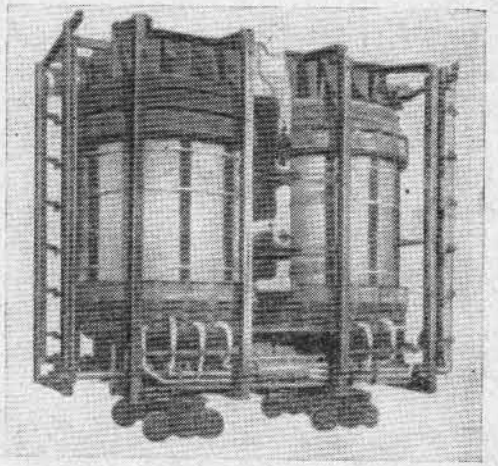


Рис. В-19. Активная часть автотрансформатора 100 *Мв·а*, 380 *кв* фирмы «Альстом»

Очень большое развитие получило в СССР также и трансформаторостроение, поскольку установленная мощность трансформаторов в энергосистемах в 8—9 раз больше, чем установленная мощность генераторов на электростанциях. Наиболее мощные трансформаторы изготовляются в трехфазном исполнении на следующие значения напряжения и мощности:

Напряжение, *кв*	220	330	500
Мощность, *Мв·а*	630	400 (630, 1000—разрабатываются)	400 (630—разрабатываются)

В однофазном исполнении:

Напряжение, *кв*			500
Мощность, *Мв·а*	250,	267,	417

Напряжение 500 *кв*, которое имеется в СССР на Волжских высоковольтных передачах и в Сибирской энергосистеме, самое высокое в мировой практике.

Ниже приводятся данные по наиболее мощным иностранным трансформаторам в трехфазном исполнении:

	Великобритания	Япония	Франция	Великобритания
Напряжение, *кв*	275	287	405	430
Мощность, *Мв·а*	750	680	660	600

В однофазном исполнении (Япония, Австрия, Канада):

Напряжение, *кв*	500
Мощность, *Мв·а*	400

На рис. В-19 представлена фотография активной части автотрансформатора 100 *Мв·а*, 380 *кв* производства фирмы «Альстом».

В-3. Основные величины и системы единиц [9, 10]

В инженерном деле, в частности в практике электромашиностроения, при различного рода расчетах вопрос о выборе основных величин и системы единиц измерения имеет исключительно большое значение. Основное требование, которое должно быть предъявлено к системе единиц, заключается в том, чтобы система была когерентной, т. е. такой, в которой все производные единицы определяются через основные при условии, что в уравнениях исчезают паразитные множители типа 10^{-8}, 9,81 и т. д.

Уравнения и формулы, написанные в когерентной форме, годны без введения каких-либо дополнительных коэффициентов для любой логически развитой системы единиц. Если в такую формулу подставить величины в единицах любой когерентной системы, то ответ получится также в единицах принятой системы. При такой форме написания уравнений нет нужды каждый раз оговаривать единицы измерения, а это, в свою очередь, устраняет затруднения при расчетах.

Для описания и изучения электромагнитных явлений необходимо введение четырех основных величин. В 1935 г. Международная электротехническая комиссия рекомендовала подготовить вопрос о переходе на систему единиц, предложенную Джорджи, в которой за основные единицы были приняты: единица длины — метр, единица массы — килограмм и единица времени — секунда; что же касается четвертой величины, то первоначально было предложено принять за нее такое значение магнитной проницаемости пустоты μ_0, при котором сохраняются основные практические единицы, например, вольт, ватт, генри и т. д. (система МКС μ_0). Это предложение не нашло всеобщего признания, и взамен него было предложено принять за четвертую основную единицу — ампер (система МКСА).

С 1 января 1957 г. был введен в действие ГОСТ 8033—56, согласно которому основной системой единиц измерения электрических и магнитных величин устанавливалась система МКСА, но допускалась к применению также система СГС μ_0.

Согласно ГОСТ 9867—61, с 1 января 1961 г. в СССР в качестве основной системы единиц принята Международная система единиц (The International system of units), обозначаемая символом SI и в русском написании СИ. Основными единицами СИ являются: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина и свеча. Применительно к электротехническим расчетам она ничем не отличается от системы МКСА, только для магнитной индукции вводится специальная единица — «тесла» (*тл*), соответствующая *вб/м²* в системе МКСА.

Для проведения практических расчетов все существующие системы единиц имеют те или иные неудобства. Это привело к тому, что широкое распространение приобрели смешанные системы единиц, применение которых вызывает появление в уравнениях паразитных коэффициентов, пригодных только для данной смешанной системы. Так, например, выражение для э. д. с. постоянно встречается в технической литературе в форме $e = Blv \cdot 10^{-8}$; чтобы получить по этой формуле э. д. с. в обычных единицах, т. е. в вольтах, необходимо подставить индукцию B в *гс*, длину l в *см* и линейную скорость вращения v в *см/сек*; если же выражение для э. д. с. написано в когерентной форме, т. е. в виде $e = Blv$, но величины B, l и v выражены в тех же единицах, что и выше, то э. д. с. будет выражена в единицах системы СГСμ_0, причем эта единица не имеет наименования.

Чтобы получить э. д. с. в вольтах, пользуясь СИ или системой МКСА и не вводя в формулу для э. д. с. каких-либо паразитных множителей, необходимо выразить B в *тл* или в *вб/м²*, l — в *м* и v — в *м/сек*. Естественно, однако, что любая система единиц, в том числе и система МКСА, может пользоваться как долевыми, так и кратными значениями основных единиц; так, например, плотность тока может быть выражена в системе МКСА в *а/мм²* так же, как и в системе СГСμ_0, где

за единицу длины принят сантиметр. Но в этом случае в формулу, содержащую плотность тока, войдет уже соответствующий переводной коэффициент.

Образование кратных и долевых единиц производится в соответствии с требованиями ГОСТ 7663—55.

В-4. Рационализация уравнений электромагнитного поля

Под рационализацией уравнений электромагнитного поля понимают приведение системы зависимостей, связывающих электрические и магнитные величины, к симметричному виду с одновременным введением переводного коэффициента 4π в выражения, относящиеся к случаям, в которых имеется сферическая симметрия.

Следует заметить, что рационализация уравнений не связана с применением тех или иных единиц измерения и осуществляется только путем изменения понятий о некоторых электрических и магнитных величинах.

В табл. В-1 приводятся соотношения между единицами СИ, системы МКСА и СГСμ_0, причем переводные коэффициенты, содержащиеся в последнем вертикаль-

Таблица В-1

Наименование величины	Наименование и обозначение единиц системы				Коэффициент перевода единицы систем СИ и МКСА в СГС μ_0
	МКСА и СИ		СГС μ_0		
Время	секунда	*сек, с*	секунда	*сек, с*	1
Частота	герц	*гц*	герц	*гц*	1
Длина	метр	*м*	сантимер	*см*	10^2
Скорость	метр в секунду	*м/сек*	сантиметр в секунду	*см/сек*	10^2
Ускорение	метр на секунду в квадрате	*м/сек²*	сантиметр на секунду в квадрате	*см/сек²*	10^2
Масса	килограмм	*кг*	грамм	*г*	10^3
Механическая сила	ньютон	*н*	дина	*дин*	10^5
Работа и энергия	джоуль	*дж*	эрг	*эрг*	10^7
Мощность	ватт	*вт*	эрг в секунду	*эрг/сек*	10^7
Количество электричества	кулон	*к*	—	—	10^{-1}
Электрический ток	ампер	*а*	—	—	10^{-1}
Намагничивающая сила	ампер	*а*	гильберт	*гб*	10^{-1}
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	*а/м*	эрстед	*э*	10^{-3}
Магнитный поток	вебер	*вб*	максвелл	*мкс*	10^8
Магнитная индукция	вебер на метр в квадрате (МКСА), тесла (СИ)	*вб/м²* *тл*	гаусс	*гс*	10^4
Электрическая емкость	фарада	*ф*	—	—	10^{-9}
Электрическое сопротивление	ом	*ом*	—	—	10^9
Индуктивность	генри	*гн*	—	—	10^9
Магнитная проницаемость	генри на метр	*гн/м*	—	—	10^7

ном столбце таблицы, сохраняются независимо от того, написаны ли уравнения электромагнитного поля в рациональной форме или в нерациональной. Прочеркнутые места в горизонтальных строках таблицы означают, что данная единица не имеет наименования.

В заводской практике обычно пользуются смешанной системой единиц и пишут уравнения электромагнетизма в нерациональной форме. Следует иметь в виду, что в этом случае понятия о некоторых величинах, в частности о напряженности магнитного поля и о магнитодвижущей силе, изменяются. В формулы для этих величин входит коэффициент 4π; например, магнитодвижущая сила пишется в рационализованной системе единиц в виде: $F = iw$, а в нерационализованной — в виде $F = 4\pi iw$.

С другой стороны, коэффициент 4π появляется в величинах магнитной проницаемости и диэлектрической проницаемости; например, в рационализованной системе СГСμ_0 магнитная проницаемость пустоты $\mu_0 = 4\pi$, а в нерационализованной $\mu_0 = 1$; соответственно в СИ и системе МКСА $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *гн/м* и $\mu_0 = 10^{-7}$ *гн/м*.

Таким образом, коэффициент 4π выводится из одних выражений и вводится в другие; поэтому в технических расчетах рационализация уравнений электромагнитного поля не дает существенных облегчений, но она упрощает написание основных наиболее часто встречающихся уравнений.

В настоящей книге все уравнения приведены в рациональной форме, а числовые величины и примеры расчетов — в единицах СИ с использованием кратных и долевых значений. В ряде случаев одновременно указываются числовые величины в смешанной системе единиц, поскольку она сейчас еще широко применяется в расчетной практике электромашиностроительных заводов.

В-5. Изображение синусоидальных величин на векторных диаграммах

В теории электрических машин рассматривается большое количество физических величин, изменяющихся периодически, как функция времени или функция пространства. Для графического изображения этих величин, имеющих один и тот же период и изменяющихся по синусоидальным законам, пользуются полярными диаграммами. Полярная диаграмма изображает амплитуды синусоид одного и того же периода прямыми отрезками, расположенными друг от друга под углами сдвига фаз между отдельными синусоидами. Две синусоиды, выражаемые уравнениями:

$$a = A \sin (x + \alpha) \quad \text{и} \quad b = B \sin (x + \beta), \tag{В-1}$$

показаны на рис. В-20, *а* в прямоугольной системе координат. В полярной системе координат эти синусоиды будут иметь вид, представленный на рис. В-20, *б*, на котором они изображаются двумя отрезками A и B, составляющими с положительной осью X углы α и β и расположенными относительно друг друга под углом сдвига фаз $(\alpha - \beta)$. Для $x = 0$ значения обеих синусоидальных функций в полярной диаграмме определяются проекциями отрезков A и B на положительную ось Y. Для других значений x соответствующие значения этих функций определяются также проекциями амплитуд на ось Y, если повернуть амплитуды на угол, соответствующий изменению координаты x в положительном направлении, т. е. против часовой стрелки. Однако удобнее оставлять неподвижными амплитуды, а поворачивать на тот же угол ось Y в отрицательном направлении, т. е. по часовой стрелке. Так как в большинстве случаев рассматриваются величины, изменяющиеся во времени, то вращающуюся ось Y называют о с ь ю в р е м е н и.

Суммирование двух синусоид одинакового периода дает синусоиду, получаемую в полярной диаграмме геометрическим сложением амплитуд отдельных синусоид. При суммировании синусоид *а* и *b*, изображенных на рис. В-20, *а* и *б*, получается следующее уравнение для результирующей синусоиды:

$$C = A \sin (x + \alpha) + B \sin (x + \beta) = C \sin (x + \gamma),$$

$$\left.\begin{aligned} C &= \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos (\alpha - \beta)}; \\ \operatorname{tg} \gamma &= \frac{A \sin \alpha + B \sin \beta}{A \cos \alpha + B \cos \beta}. \end{aligned}\right\} \tag{В-2}$$

Полярная диаграмма для периодически изменяющихся величин называется в е к т о р н о й д и а г р а м м о й, а отрезки прямых, выражающих амплитуды синусоидальных величин, — д и а г р а м м н ы м и в е к т о р а м и или сокращенно просто векторами. Однако эти векторы не имеют ничего общего с физическими векторами, имеющими направление в пространстве. Направление диаграммных векторов указывает только фазу по времени или по месту для выражаемых ими физических величин. Сложение амплитуд по закону параллело-

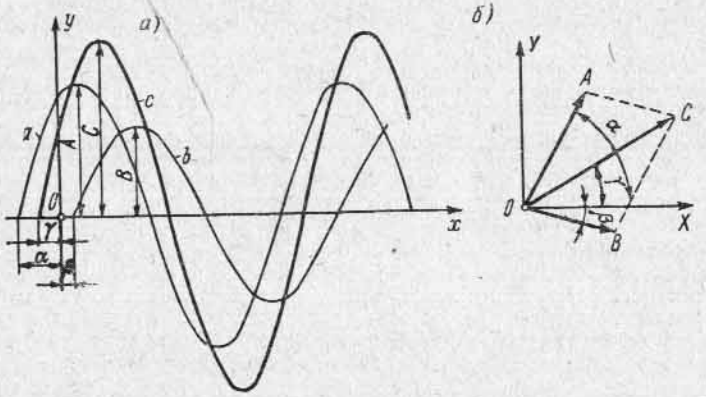


Рис. В-20. Графическое изображение физических величин, изменяющихся периодически, как синусоидальные функции времени, или в пространстве, в полярных диаграммах

грамма сил основано лишь на свойствах синусоиды, вытекающих из уравнения (В-2). Непринятие во внимание указанного коренного различия между диаграммными и физическими векторами может привести в ряде случаев, особенно при рассмотрении теории многополюсных машин, к неправильным заключениям и формулировкам.

В-6. Основные законы электротехники в применении к анализу процессов в электрических машинах [9, 10]

А. Закон магнитной цепи. Действие электромагнитных механизмов, в частности электрических машин, является следствием наличия магнитного поля и протекающего по проводникам тока. Законы электродинамики устанавливают связь между токами и их магнитным полем и позволяют производить расчеты их взаимодействий. Правильный учет взаимодействий в электромагнитных механизмах возможен только при точном геометрическом и физическом рассмотрении магнитного поля, и все трудности анализа явлений в электромагнитных механизмах сводятся к трудностям построения правильной картины поля.

Магнитное поле есть часть пространства, в котором происходят физические явления, называемые магнитными явлениями. О действительном состоянии пространства, в котором существует магнитное поле, наука судит по ряду экспериментально установленных явлений и закономерностей. Взаимосвязь всех

явлений позволяет построить рабочую картину учета явлений. Рабочая картина магнитного поля основана на взглядах Фарадея, представлявшего себе магнитное поле как пространство, в котором распределены «физические силовые линии», называемые магнитными линиями.

Если рассмотреть магнитное поле в пустоте или с достаточным практическим приближением в воздухе, то можно начертить магнитные линии по путям перемещений единичного магнитного полюса в поле. Значение силы, действующей в каждой точке на единичный северный полюс, пропорционально напряженности магнитного поля.

Изображение полей при помощи магнитных линий дает большую наглядность при изучении процессов в электромагнитных механизмах. Магнитные линии могут служить не только для определения направления вектора напряженности магнитного поля, но и для определения величины этой напряженности, если измерять ее числом линий на единицу площади, взятой перпендикулярно направлению вектора напряженности.

Векторы напряженности **H** и магнитной индукции **B** имеют одинаковые направления только в пустоте и магнитоизотропных средах (большинство газов и жидкостей).

В некоторых намагничивающихся газах и жидкостях (кислород, растворы солей железа и никеля) **H** и **B** имеют одинаковые направления, но зависимость между ними нелинейная.

В ряде материалов, например в кристаллах, твердых веществах в состоянии напряжения, а также в стали после обработки давлением, **H** и **B** имеют различные направления, а магнитная проницаемость μ — нелинейная функция от B. Для этих магнитоанизотропных материалов силовые линии поля, определяющие направление **H**, уже несколько не совпадают с магнитными линиями, определяющими направление **B**.

При решении большинства задач, относящихся к расчету электромагнитных механизмов, ферромагнитные материалы рассматриваются как парамагнитные изотропные вещества.

Каждая магнитная линия представляет собой замкнутый контур, не имеющий ни начала, ни конца. Магнитные линии не могут быть разрезаны или разорваны, и обнаружение концов их ни в каких процессах, происходящих в магнитном поле, невозможно.

Таким образом, полный магнитный поток, пронизывающий данную замкнутую поверхность, равен нулю.

Математически сказанное выражается в виде

$$\Phi_S = \int_S B \cos\beta dS = 0,$$

где $B\cos\beta$ — нормальная составляющая вектора магнитной индукции.

Поле для пространства, не занятого токами, может быть охарактеризовано скалярным магнитным потенциалом, изменяющимся от точки к точке. Градиент этого потенциала или скорость его изменения в любом направлении равны составляющей напряженности в этом направлении с обратным знаком. Магнитный потенциал позволяет отыскать магнитные поверхности уровня, пересекающиеся под прямым углом с магнитными линиями поля.

Таким образом можно получить систему эквипотенциальных поверхностей $U = \text{const}$ и систему магнитных силовых линий $F = \text{const}$.

Магнитный потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \qquad \text{(В-3)}$$

Решение этого уравнения возможно только для простейших граничных условий. В большинстве случаев достаточная точность получается, если применить закон полного тока (первое уравнение Максвелла в интегральной форме).

Если в магнитном поле выделить трубку магнитной индукции такого сечения, чтобы для всех точек этого сечения можно было считать величину H постоянной, то величина элементарного потока φ сквозь любое нормальное сечение этой трубки будет

$$\varphi = \mu HS, \qquad \text{(В-4)}$$

где S — сечение трубки. Осевую линию трубки принимаем за контур интегрирования, а так как трубки магнитной индукции являются замкнутыми, то закон полного тока выражается следующим образом:

$$\oint \mathbf{H}d\mathbf{l} = \oint H dl \cos(\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = \Sigma i, \qquad \text{(В-5)}$$

где dl — элементарное перемещение вдоль некоторого пути перехода от точки A_1 до точки A_2 в магнитном поле; Σi — величина полного тока, который охватывается контуром интегрирования; $\cos(\mathbf{H}, d\mathbf{l})$ — угол между направлением перемещения и направлением магнитной силовой линии (рис. В-21).

Часто за путь интегрирования выбирают саму магнитную силовую линию, и тогда $\cos(\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = 1$.

Закон магнитной цепи гласит: интеграл по любому замкнутому контуру от произведения составляющей напряженности магнитного поля по направлению $d\mathbf{l}$ на dl численно равен полному току, охватываемому этим контуром.

В электрических машинах магнитный поток проходит главным образом по «магнитопроводу», состоящему из отдельных участков (якорь, полюсы, ярмо и т. д.), причем H в отдельных участках в большинстве случаев можно принимать с достаточной точностью постоянной, поэтому

$$\oint Hdl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots + H_n l_n = \Sigma i. \qquad \text{(В-5а)}$$

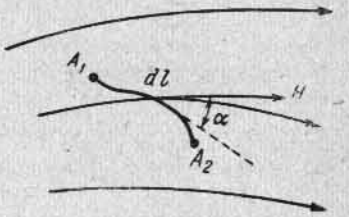


Рис. В-21. Вывод закона магнитной цепи

Левую часть уравнения (В-5а) иногда называют суммой «падений магнитного напряжения» магнитной цепи по аналогии с падениями электрического напряжения в электрической цепи, а правую его часть — намагничивающей силой (н. с.) и обозначают буквой F. Так как часто Σi равна iw, где w — число витков и i — ток в проводниках катушки, то

$$iw = F. \qquad \text{(В-6)}$$

Если по всей магнитной цепи проходит один и тот же поток, то, преобразуя левую часть уравнения (В-5а), можно получить

$$\oint \mathbf{H}d\mathbf{l} = \frac{\Phi}{\mu S} dl = \Phi \oint \frac{dl}{\mu S} = \Sigma i = iw = F \qquad \text{(В-7)}$$

и окончательно написать выражение для потока Φ в виде закона магнитной цепи, аналогичного закону Ома для электрической цепи:

$$\Phi = \frac{iw}{\oint \frac{dl}{\mu S}} = \frac{F}{\oint \frac{dl}{\mu S}} = \frac{F}{R_\mu}, \qquad \text{(В-8)}$$

где F — величина полной н. с., действующей по всей магнитной цепи, и R_μ — полное магнитное сопротивление цепи.

Закон магнитной цепи, так же как и закон Ома для электрической цепи, достаточно точен для случаев, когда поперечные размеры цепи малы по сравнению с ее длиной.

При сложных магнитопроводах, с какими приходится практически сталкиваться, не все магнитные линии имеют одинаковую длину. Часть магнитных линий замыкается по так называемым путям рассеяния, и значения μ и S в

различных участках магнитопровода различны. Поэтому только с известным приближением можно считать величины l, μ и S для всех n элементарных потоков одинаковыми и написать

$$\Phi \approx n\varphi = n\frac{iw}{\oint \frac{dl}{\mu S}}. \qquad \text{(В-8а)}$$

Для упрощения расчета магнитную цепь разбивают по длине на отдельные участки, тогда

$$\oint \frac{dl}{\mu S} = \int \frac{dl_1}{\mu_1 S_1} + \int \frac{dl_2}{\mu_2 S_2} + \ldots + \int \frac{dl_n}{\mu_n S_n},$$

и, считая с некоторым приближением $\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_n = \text{const}$ и $S_1, S_2, \ldots, S_n = \text{const}$ и т. д., получают приближенное выражение закона магнитной цепи, которым практически пользуются:

$$\oint \frac{dl}{\mu S} = \sum_1^n \frac{l_n}{\mu_n S_n} \quad \text{и} \quad \Phi = \frac{iw}{\sum_1^n \frac{l_n}{\mu_n S_n}}. \qquad \text{(В-8б)}$$

Впервые оно было введено в практику электромашиностроения в 1886 г. братьями Гопкинсон (Hopkinson).

Закон магнитной цепи в этом виде имеет условное значение и не может быть полностью сравнимым с законом Ома. В последнем сопротивление, как правило, не зависит от тока (если не считаться с нагреванием), а в первом R_μ зависит от Φ. Формулировка, использующая падение магнитного потенциала, является более удобной, так как содержит H в общем виде.

Б. Закон электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции в применении к электромагнитным механизмам обычно принимается в виде, данном Максвеллом:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \qquad \text{(В-9)}$$

причем э. д. с., индуктируемая в некотором контуре, не зависит от вещества, формы и размеров проводников, из которых контур выполнен. Эта э. д. с. зависит только от скорости изменения магнитного потока, проходящего сквозь контур; э. д. с. есть причина, способная вызывать электрический ток в цепи; э. д. с., действующая вдоль какого-либо пути, равна линейному интегралу вектора напряженности электрического поля вдоль этого пути. Если контур, в котором происходит изменение магнитного потока, представляет собой сложную электрическую цепь, которую можно разбить на ряд простых контуров, и если в каждом простом контуре происходит изменение магнитных потоков $\Phi_1, \Phi_2, \ldots \Phi_n$, то

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt}, \quad e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt}, \quad \ldots, \quad e_n = -\frac{d\Phi_n}{dt}.$$

Тогда

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \ldots + \Phi_n = \sum_1^n \Phi_n = \Psi$$

и

$$e_1 + e_2 + \ldots + e_n = \sum_1^n e_n = -\frac{d\Psi}{dt}, \qquad \text{(В-9а)}$$

где Ψ есть общее число потокосцеплений с контуром. В большинстве случаев в электромагнитных механизмах оказывается возможным принимать $\Phi_1 = \Phi_2 = \ldots = \Phi_n$ и $e = -w\frac{d\Phi}{dt}$, где w — число отдельных витков, охватывающих поток Φ, и, следовательно, $w\Phi = \Psi$.

В ряде случаев при изучении электрических машин пользуются законом электромагнитной индукции в форме $e = Blv$, являющейся следствием формулировки Фарадея, согласно которой э. д. с., индуктируемая в некотором контуре, зависит исключительно от скорости перерезывания магнитных линий контуром и не зависит от вещества, формы и размеров поперечного сечения проводника, из которого контур состоит. В этой формуле: B — магнитная индукция в данной точке; l — активная длина прямого проводника в пределах однородного магнитного поля с индукцией B, расположенного в плоскости, перпендикулярной направлению магнитных линий; v — скорость движения проводника в плоскости, нормальной к B, в направлении, перпендикулярном к l.

Направление индуктированных в проводниках э. д. с. определяется по правилу правой руки.

Из закона электромагнитной индукции в форме $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ следует, что для получения э. д. с. постоянного направления необходимо иметь изменение потока в одну сторону. Создать непрерывное изменение потока в одном направлении в течение длительного промежутка времени невозможно, и, следовательно, невозможно получить без переключения контура постоянную э. д. с. только путем чистой электромагнитной индукции. Из этого положения вытекает принципиальная невозможность построить машину постоянного тока без коллектора.

В. Энергия магнитного поля и электромагнитная сила. Энергия магнитной системы распределена по всему пространству, в котором обнаруживается действие электромагнитных сил. Значение этой энергии можно найти, исходя из закона Ома, в общем виде

$$i = \frac{e - \frac{d\Psi}{dt}}{r} \quad \text{или} \quad e = ir + \frac{d\Psi}{dt}.$$

Элементарная работа dA, совершаемая током в этом контуре,

$$dA = eidt = i^2 r dt + id\Psi.$$

Элементарная работа, затрачиваемая на изменение магнитного состояния среды, $dA_m = i\,d\Psi$ и запас энергии в единице объема

$$W_0 = \mu \int_0^H HdH = \frac{\mu H^2}{2}$$

при условии $\mu = \text{const}$.

Полная энергия во всем объеме, занятом магнитным потоком (при $\mu = \text{const}$),

$$W = \int \frac{\mu H^2}{2} dv = \frac{1}{2} Li^2. \qquad \text{(В-10)}$$

Это выражение дает запас энергии, связанной с контуром, по которому протекает ток i. Здесь $Li = \Psi$ представляет собой полное потокосцепление с контуром тока i. Всякое изменение потокосцепления Ψ приводит к электромагнитной реакции в виде возникновения э. д. с. самоиндукции e_s и вызванного ею тока i_s. Любая электромагнитная система в силу наличия своеобразной электромагнитной инерции стремится удержать на определенном уровне сцепленный с контуром магнитный поток.

В большинстве электромагнитных механизмов существуют два или более электромагнитно-связанных контура. Электромагнитная энергия двух контуров выражается следующим образом:

$$W_{12} = \int \frac{\mu H^2}{2} dv = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + M_{12} i_1 i_2. \qquad \text{(В-10а)}$$

Индуктивности L_1 и L_2 контуров могут не зависеть от их взаимного положения. Взаимоиндуктивность же M_{12} зависит от относительного расположения контуров, поэтому всякое их взаимное перемещение при постоянстве токов в контурах приводит к изменению связанной с контурами энергии W_{12} и, следовательно, указывает на наличие сил механического взаимодействия.

Если x — геометрическая координата, от которой зависит взаимное расположение контуров, то электромагнитная сила

$$f = \frac{dW_{12}}{dx} = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dx}. \qquad \text{(В-11)}$$

Электромагнитные силы стремятся так изменить взаимное расположение контуров, чтобы увеличить поток взаимной индукции и тем самым при неизменных токах увеличить энергию системы.

В электрических машинах в ряде случаев бывает трудно вычислить приращение потока, связанного с данным контуром; поэтому удобнее пользоваться выражением, позволяющим определить электромагнитную силу, действующую на отдельный элемент контура.

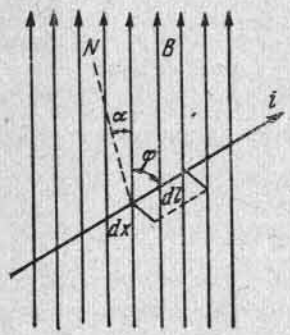


Рис. В-22. Электромагнитная сила, действующая на отдельный элемент контура

Если элемент проводника dl (рис. В-22) какого-либо контура с током i находится в магнитном поле и перемещается на величину dx, то получающееся приращение потока $d\Phi$ будет

$$d\Phi = B \cos\alpha dl dx = B \sin\varphi dl dx.$$

Величина элементарной электромагнитной силы, действующей на участок dl, будет

$$df = i \frac{d\Phi}{dx} = Bi \sin\varphi dl.$$

Сила, действующая на конечный участок проводника l,

$$f = \int_0^l Bi \sin\varphi dl. \qquad \text{(В-12)}$$

Если магнитное поле однородно и проводник прямолинеен, то

$$f = Bli \sin\varphi. \qquad \text{(В-12а)}$$

Таким образом, в электродинамических системах возникают электромагнитные силы, стремящиеся создать такие движения контуров, при которых внешний поток, связанный с каждым из составляющих систему контуров, мог бы получить положительное приращение в случае постоянства всех токов.

В-7. Материалы, применяемые в электромашиностроении

А. Классификация материалов, применяемых в электромашиностроении. Материалы, применяемые в электромашиностроении, могут быть подразделены на следующие три категории: а) материалы конструктивные; б) материалы активные (магнитные и электропроводящие); в) материалы изоляционные.

Конструктивные материалы применяются для изготовления таких деталей и частей машин, преимущественным назначением которых является передача и восприятие механических нагрузок и напряжений и придание необходимых конструктивных форм отдельным узлам для правильного механического функционирования машины.

Активные материалы являются токопроводящими и магнитопроводящими и служат для создания необходимых условий для протекания электромагнитных процессов.

Изоляционные материалы имеют основное назначение электрически изолировать токопроводящие части от остальных частей машины.

Ряд частей электрических машин работает в сложных физических условиях, поэтому к материалам предъявляются смешанные требования как механические, так и магнитные и электрические, удовлетворение которых является одной из сложнейших задач материаловедения.

Б. Конструктивные материалы. В качестве конструктивных материалов в электромашиностроении применяются: а)чугун — простой, ковкий и немагнитный; б) сталь — углеродистая и легированная как для получения высоких механических свойств, так и для получения немагнитных свойств; в) цветные металлы и их сплавы; г) пластмассы.

Части электрических машин находятся под воздействием статических и динамических нагрузок. В большинстве случаев их геометрические размеры определяются как условиями механических напряжений, так и результатом электрического расчета. Поэтому при проектировании электрических машин приходится сталкиваться с трудной задачей правильного подбора необходимой марки материала.

Механические качества материала обычно характеризуются следующими данными: а) временным сопротивлением; б) пределом текучести; в) пределом усталости; г) процентным удлинением; д) ударным пробоем.

Механические напряжения в современных типах электрических машин достигают 390—450 $н/мм^2$.

Материал испытывает сложные периодически изменяющиеся напряжения; правильное определение необходимого запаса прочности по отношению к пределу пропорциональности и пределу усталости является весьма ответственной задачей, особенно в быстроходных машинах (турбогенераторы) и в машинах, скорость вращения которых в период эксплуатации может значительно повышаться (гидрогенераторы с турбиной поворотно-лопастного типа).

Определение допустимых механических напряжений только по общим указаниям без тщательного анализа всех условий работы и технологии изготовления машин при современном высоком использовании материалов является недостаточным.

При выборе допускаемых напряжений прибегают к так называемому коэффициенту безопасности, или коэффициенту запаса прочности, который представляет собой $k = \sigma_m \sigma_r$, где σ_m — напряжение, при котором часть механизма разрушается или так деформируется, что дальнейшая работа ее невозможна, а σ_r — расчетное напряжение в данной части механизма.

Обычно для хрупких материалов с малым процентом удлинения значение σ_m принимается равным временному сопротивлению, а для материалов с большим процентным удлинением σ_m принимается равным пределу текучести.

На выбор коэффициента безопасности влияет большое количество факторов, главнейшие из которых следующие: качество материала, точность расчета напряжений, технологические особенности материала, условия и характер технологической обработки, методы испытания качества материала, характер действия нагрузки, условия службы детали.

Влияние каждого из перечисленных факторов может быть оценено своим коэффициентом безопасности, и общий коэффициент безопасности получится как произведение всех коэффициентов.

В табл. В-2 приведены значения этих коэффициентов по данным И. А. Одинга[1] для а) листовой и кованой стали, б) литой стали и в) чугуна. Надежность этих материалов оценивается как $а : б : в = 1{,}0 : 1{,}3 : 2{,}0$.

Таблица составлена применительно к ответственным и высокоиспользованным частям электрических машин.

В. Магнитные материалы. Для изготовления частей магнитопровода электрической машины применяются различные ферромагнитные материалы: электротехническая сталь различных сортов, чугун, стальное литье, листовая и кованая сталь, специальные стальные сплавы (для постоянных магнитов).

---

[1] П. Михайлов-Михеев и И. Одинг. Материалы турбин и турбогенераторов. ОНТИ, 1934.

Таблица В-2

Факторы	Обозначение коэффициента	Сталь		Чугун
		листовая и кованая	литая	
Размер и форма изделия:				
Мелкое простое	k_1	1	1,3	2
» сложное		1,05	1,35	2,1
Крупное простое		1	1,4	2,2
» сложное		1,15	1,5	2,3
Горячая обработка:				
Литье	k_2	—	1—1,3	1—1,2
Ковка		1—1,3	—	—
Термическая обработка		1—1,1	1—1,1	1—1,1
Механическая обработка:				
Чистота обработки	k_3	1—1,3	1—1,3	1—1,3
Сложность сборки	k_4	1—1,1	1—1,15	1—1,2
Условия эксплуатации:				
Опасность разрушения, повторяемость максимальных напряжений	k_5	1	—	1,25
Методы испытания:				
Количество испытываемых деталей	k_6	1	—	1,25
» и соответствие методов испытания	k_7	1	—	2
Соответствие места взятия пробы	k_8	1	—	1,25
Характер нагрузки:				
Статический	k_9	1,1	—	—
Повторный		1,2	—	—
Знакопеременный		1,35	—	—
Точность расчета	k_{10}	1	—	1,65

Для магнитной цепи важнейшим свойством этих материалов является зависимость магнитной индукции от напряженности поля и зависимость потерь на гистерезис и вихревые токи от индукции и частоты.

В тех случаях, когда отдельные части магнитопровода нагружены также и механически (ротор турбогенератора, станина машины постоянного тока), важную роль играют также и механические свойства материала. Сочетание высоких механических и магнитных свойств является весьма трудной задачей металлургии.

Электротехническая сталь. Структура электротехнической стали представляет собой конгломерат ферритовых зерен, в растворе которых находятся другие, входящие в сталь элементы. Так как электротехническая сталь получается путем прокатки, то зерна ее несколько вытягиваются в направлении прокатки, и это создает неоднородность как механических, так и магнитных и электрических свойств. Явление вытягивания зерен, являющееся следствием холодного наклепа при прокатке, несколько ухудшает магнитные

характеристики и увеличивает петлю гистерезиса, что дает увеличение магнитных потерь. Одновременно наклеп увеличивает и электрическое сопротивление, что приводит к некоторому снижению потерь на вихревые токи, но преобладающим остается влияние увеличения гистерезисной петли. Влияние наклепа может проявиться и при последующей механической обработке стали на электромашиностроительном заводе (резка, штамповка и т. д.) и также ухудшить магнитные свойства материала.

Электротехническая сталь после прокатки для устранения влияния наклепа подвергается отжигу при температуре 800° С, что способствует укрупнению зерен и тем самым уменьшению потерь на гистерезис. Само собой разумеется, что благотворное влияние отжига будет сказываться на электротехнической стали и после процесса штамповки и резки на электромашиностроительном заводе; поэтому отжиг используется рядом фирм. Для избежания явления резкого окисления отжиг в этом случае ведется в атмосфере водорода.

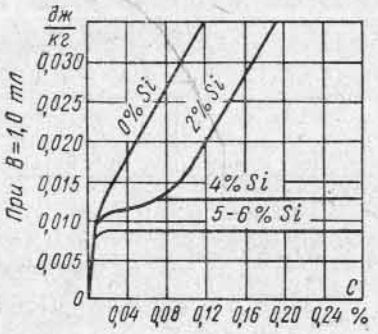


Рис. В-23. Потери на гистерезис в зависимости от процентного содержания кремния и углерода в стали

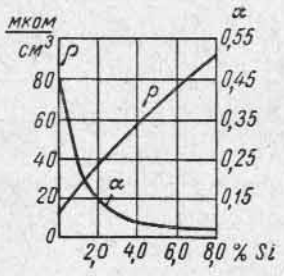


Рис. В-24. Влияние процентного содержания кремния на электрическое сопротивление и температурный коэффициент электротехнической стали

В современных сортах электротехнической стали имеется небольшая присадка кремния. Кремний имеет два назначения. Во-первых, он способствует переводу имеющегося в стали углерода из цементита в графит, что снижает потери на гистерезис, и, во-вторых, увеличивает электрическое сопротивление стали, что уменьшает потери на вихревые токи. На рис. В-23 показано влияние процентного содержания кремния и углерода в стали на потери на гистерезис, а на рис. В-24 — влияние процентного содержания кремния на электрическое сопротивление и температурный коэффициент электротехнической стали.

Присадка кремния увеличивает удельное электрическое сопротивление стали почти пропорционально содержанию кремния и этим способствует уменьшению потерь на вихревые токи, возникающие в стали при ее работе в переменном магнитном поле. Присадка кремния свыше 1,8% заметно увеличивает магнитную проницаемость стали в слабых магнитных полях, но несколько уменьшает ее в сильных полях. Равным образом кремний ослабляет старение стали, выражающееся в увеличении потерь в стали с течением времени.

Ниже приведены данные об изменении физических свойств электротехнической стали в зависимости от содержания кремния при толщине листа 0,5 *мм*:

Содержание кремния, %	0,5—0,7	1,2—1,4	1,2—2,6	3,8—4,2
» углерода, %	0,1	0,1	0,1	0,08
Предел текучести, *н/мм²*	195	235	310	440
Временное сопротивление разрыву, *н/мм²*	295	370	440	550
Относительное удлинение, %	18	18	16	4

По способу обработки различают сталь горячекатаную и сталь холоднокатаную текстурованную. Последняя по сравнению с первой имеет лучшие магнитные свойства (см. ниже табл. В-3), но лишь в том случае, если магнитный поток идет в направлении проката стали; в поперечном к прокату направлении магнитные свойства холоднокатаной стали гораздо хуже, другими словами, эта сталь обладает резкой анизотропией. Поэтому она используется главным образом при изготовлении трансформаторов, но в последнее время начинает находить применение и при изготовлении электрических машин.

Содержание кремния и средняя удельная плотность стали соответствуют значениям ГОСТ 802—54, представленным в табл. В-3.

Таблица В-3

Степень легирования стали	Содержание кремния, %	Средняя плотность $\gamma \cdot 10^{-3}$, $кг/м^3$
Слаболегированная	0,8—1,8	7,8
Среднелегированная	1,8—2,8	7,75
Повышеннолегированная:		
а) горячекатаная	2,8—4,0	7,65
б) холоднокатаная	2,5—3,5	7,65
Высоколегированная	4—4,8	7,55

В электромашиностроении применяются главным образом следующие марки стали: Э11, Э12, Э21, Э31, Э310, Э320, Э330, Э41, Э42, Э43. Здесь буква Э означает — электротехническая сталь, первые за буквой цифры 1, 2, 3, 4 — содержание кремния, а именно: 1 — слаболегированная, 2 — среднелегированная, 3 — повышеннолегированная, 4 — высоколегированная.

Вторые за буквой цифры 1, 2, 3 обозначают качество стали данной марки в отношении удельных потерь в стали, т. е. потерь в 1 *кг* стали при данной индукции и данной частоте. В последовательном порядке цифры 1, 2, 3 относятся к стали с нормальными, пониженными и низкими удельными потерями при частоте 50 *гц* (см. табл. В-4).

Третья за буквой цифра 0 означает, что сталь холоднокатаная текстурованная.

Например, Э320 обозначает повышеннолегированную, холоднокатаную текстурованную сталь с пониженными удельными потерями при частоте 50 *гц*.

Обычные размеры листа электротехнической стали по ширине и длине 750×1500 *мм* и 1000×2000 *мм*, но изготовляются листы и других размеров, например 600×1200 *мм*, 210×1500 *мм* и др.

Обычная толщина листа 0,50 и 0,35 *мм*, сталь марки Э11 изготовляется также толщиной 1 *мм*, для машин повышенной частоты изготовляется сталь толщиной 0,20; 0,15 и 0,10 *мм*. По особому заказу изготовляются листы толщиной 0,42 и 0,30 *мм*.

Увеличение содержания кремния свыше 4—5% мало влияет на дальнейшее изменение магнитных потерь, но в сильной степени увеличивает хрупкость материала. Загрязнение материала посторонними примесями ухудшает магнитные свойства стали, и достижение высоких магнитных свойств при минимальных потерях возможно только при правильном режиме прокатки и отжига. Эти мероприятия позволили заводам получить электротехническую сталь с потерями около 0,8—0,9 *вт/кг* при $B = 1{,}0$ *тл* и 50 *гц* при толщине листа 0,35 *мм*.

Для других частот и индукций в диапазоне от 0,5 до 1,7 *тл* и при частотах до 100 *гц* можно рассчитать потери по формуле

$$p = p_{1,0}\,(B)^n \left(\frac{f}{50}\right)^{1,35}, \qquad \text{(В-13)}$$

где $n = 57 \lg \frac{p_{1,5}}{p_{1,0}}$; $p_{1,0}$ — потери в *вт/кг* при $B = 1{,}0$ *тл*, а $p_{1,5}$ — при $B = 1{,}5$ *тл*.

Этот пересчет справедлив для хорошо изолированных друг от друга листов. В выполненных машинах в зависимости от характера технологии и давления запрессовки показатель степени n может заметно отличаться от вычисленного по формуле (В-13). Перед сборкой вырубок стали для устранения замыканий между отдельными листами последние изолируются друг от друга тонким слоем бумаги или эмалевым лаком. Так как изоляция занимает некоторое место, то заполнение сталью понижается и значение коэффициента заполнения меняется в зависимости от толщины листов и типа изоляции. На заполнение значительное влияние оказывает неравномерность толщины самих листов. Если случайно на одних участках окажутся собранными по длине более толстые вырубки, а на других более тонкие, то это создает местное ослабление запрессовки и дает вибрацию листов и контактную коррозию. Явление контактной коррозии приводит к порче изоляции между листами, повышению потерь и дальнейшему ослаблению запрессовки, что в конечном итоге может вывести машину из строя. Поэтому крайне важно следить за равномерностью толщины листов и сортировать соответствующим образом вырубки для устранения местных неплотностей. Количество запрессовываемой в машину стали следует проверять путем контроля коэффициента заполнения.

Присадка кремния ухудшает механические свойства сплава, в частности его обрабатываемость; если, например, сталь марок Э11, Э12 и Э21 толщиной 0,5 *мм* должна выдержать без повреждения не менее 10 перегибов, то сталь марок Э41 или Э42 той же толщины может выдержать только 1 перегиб.

Значения удельных потерь для электротехнических сталей различных марок приведены в табл. В-4. Числитель дроби при символе p обозначает индукцию в теслах, а знаменатель — частоту в герцах, при которых получена величина удельных потерь.

Таблица В-4

Марка стали	Номинальная толщина листа, *мм*	Удельные потери, *вт/кг*		
		$p_{1,0/50}$	$p_{1,5/50}$	$p_{1,7/50}$
		не более		
Э11	1	5,8	13,4	—
Э11	0,5	3,3	7,9	—
Э12	0,5	2,8	6,8	—
Э21	0,5	2,5	6,1	—
Э31	0,5	2	4,5	—
Э31	0,35	1,6	3,6	—
Э41	0,5	1,6	3,6	—
Э42	0,5	1,4	3,2	—
Э43	0,5	1,25	2,9	—
Э41	0,35	1,35	3,2	—
Э42	0,35	1,2	2,8	—
Э43	0,35	1,05	2,5	—
Э310	0,5	1,25	2,8	3,8
Э320	0,5	1,15	2,5	3,5
Э330	0,5	1,05	2,3	3,2
Э310	0,35	1	2,2	3,2
Э320	0,35	0,9	1,9	2,9
Э330	0,35	0,8	1,7	2,6

Значения максимальных индукций для сталей перечисленных марок в зависимости от напряженностей магнитного поля даны в табл. В-5. Здесь цифры в индексах при символе B указывают напряженности магнитного поля $H \cdot 10^{-2}$, *а/м*, которым соответствуют данные значения индукций в теслах.

На рис. В-25 приведены кривые зависимостей $B = f(H)$ для листовой электротехнической стали различных марок, а также для литой стали и чугуна.

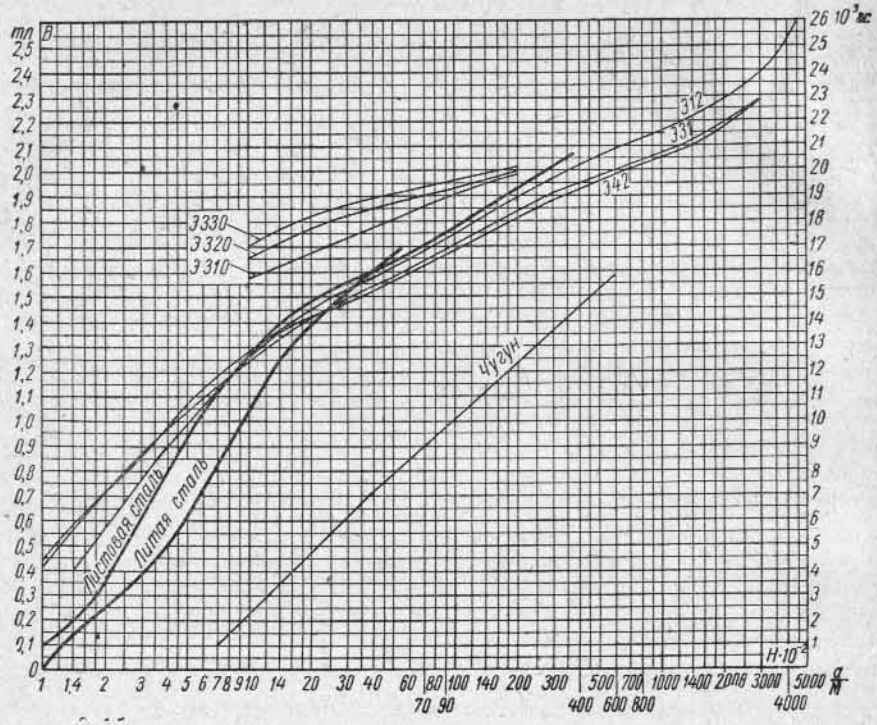


Рис. В-25. Кривые намагничивания листовой электротехничесой стали, литой стали и чугуна

Таблица В-5

Марка стали	Номинальная толщина листа, *мм*	Максимальная индукция в теслах при напряженности магнитного поля $H \cdot 10^{-2}$, *а/м*				
		B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}
		не менее				
Э11	1—0,5	—	1,5	1,62	1,75	1,97
Э12	0,5	—	1,49	1,61	1,74	1,96
Э21	0,5	—	1,48	1,59	1,73	1,94
Э31	0,5—0,35	—	1,46	1,57	1,7	1,9
Э41	0,5—0,35	1,3	1,48	1,56	1,68	1,88
Э42	0,5—0,35	1,29	1,44	1,55	1,67	1,87
Э43	0,5—0,35	1,28	1,43	1,54	1,66	1,87
Э310	0,5—0,35	1,57	1,7	1,8	1,9	1,98
Э320	0,5—0,35	1,65	1,8	1,87	1,92	2
Э330	0,5—0,35	1,7	1,85	1,9	1,95	2

Ч у г у н. Чугун применяется в настоящее время для магнитопроводов редко вследствие своих плохих сравнительно со сталью магнитных качеств. Он может быть употреблен для станин машин постоянного тока и роторов синхронных машин, где поток во время работы машины не меняется. Переход на конструкции, гнутые из листового материала, вытесняет чугун, и он сохраняется только в некоторых роторах синхронных машин, когда необходимо иметь повышенный маховой момент GD^2 из-за условий работы (двигатель для привода компрессора) и когда механические напряжения допускают применение чугуна. Кривая намагничивания чугуна дана на рис. В-25.

С т а л ь н о е л и т ь е. Стальное литье в качестве магнитопровода применяется для станин машин постоянного тока и ободов роторов синхронных машин. В машинах постоянного тока стальное литье для станин применяется более часто, чем чугун. Магнитные характеристики литой стали колеблются в очень широких пределах в зависимости от ее химического состава. На рис. В-25. даны кривые намагничивания простой углеродистой стали, наиболее часто применяемой для станин и роторов.

Л и с т о в а я с т а л ь. Для сварных станин машин постоянного тока и для роторов синхронных машин применяется углеродистая листовая сталь толщиной от 1,5 до 120 *мм*. Магнитные характеристики этого материала приближаются к характеристикам электротехнической стали марки Э12.

С т а л ь н ы е п о к о в к и. Стальные поковки применяются для роторов турбогенераторов и быстроходных синхронных машин.

Так как в роторах быстроходных машин при весьма высоких механических напряжениях имеют место и высокие магнитные индукции, то это значительно утяжеляет изготовление материала. Предел текучести у крупных поковок доходит до 600—700 *н/мм²*. Максимальные требования в отношении магнитной индукции указаны ниже:

Напряженность магнитного поля $H \cdot 10^{-2}$, *а/м*	40	125	500
Индукция, *тл*	1,5	1,75	2

С п е ц и а л ь н ы е с п л а в ы. Для изготовления постоянных магнитов для магнитоэлектрических машин применяются специальные стальные сплавы, обладающие после намагничивания большой остаточной индукцией и большой коэрцитивной силой. На рис. В-26 приведены магнитные характеристики различных стальных сплавов для постоянных магнитов.

В некоторых случаях необходимо иметь материал с большой начальной и максимальной относительной магнитной проницаемостью и резко выраженным насыщением. Характерным представителем этого класса сплавов является пермаллой С (Ni — 78,5%, Fe — 18%, Al — 3%, Mn — 0,5%). Начальная относительная магнитная проницаемость $\mu/\mu_0 = 6000$. Максимальная относительная магнитная проницаемость $\mu_m/\mu_0 = 1000\,000$. Остаточная индукция 0,45 *тл*. Коэрцитивная сила 0,035 *а/м*.

На рис. В-27 дана кривая намагничивания такого сплава в сравнении с простой кремнистой сталью.

Г. Электропроводящие материалы. Наиболее важным электропроводящим материалом, нашедшем себе широкое применение в электротехнике, является медь.

В табл. В-6 приведены данные по удельному сопротивлению некоторых чистых металлов.

Таблица В-6

Наименование металла	Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^{-6}$, *ом·м* при $t = 20°$ С	Наименование металла	Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^{-6}$, *ом·м* при $t = 20°$ С
Серебро	0,01622	Вольфрам	0,05
Медь	0,016925	Цинк	0,05916
Золото	0,0219	Никель	0,07236
Алюминий	0,0262	Железо	0,0978
Магний	0,0446		

Из сопоставления данных табл. В-6 видно, что медь занимает второе место по электропроводности, несколько уступая только серебру, которое не может быть применено вследствие своей дороговизны.

Различные примеси значительно влияют на электропроводность. На рис. В-28 приведены данные изменения электропроводности меди в зависимости от процентного содержания различных примесей. Медь, предназначенная для электрических проводников, не должна содержать больше 0,1% примесей. Особенно вредны примеси висмута и сурьмы. При холодной протяжке медь подвергается наклепу, что делает ее более твердой и увеличивает удельное сопротивление. Отжиг возвращает основные свойства меди, и его следует применять не только на кабельном заводе, но и на электромашиностроительном заводе, если неизолированные медные проводники в процессе изготовления обмотки подверглись наклепу (роторные катушки синхронных машин).

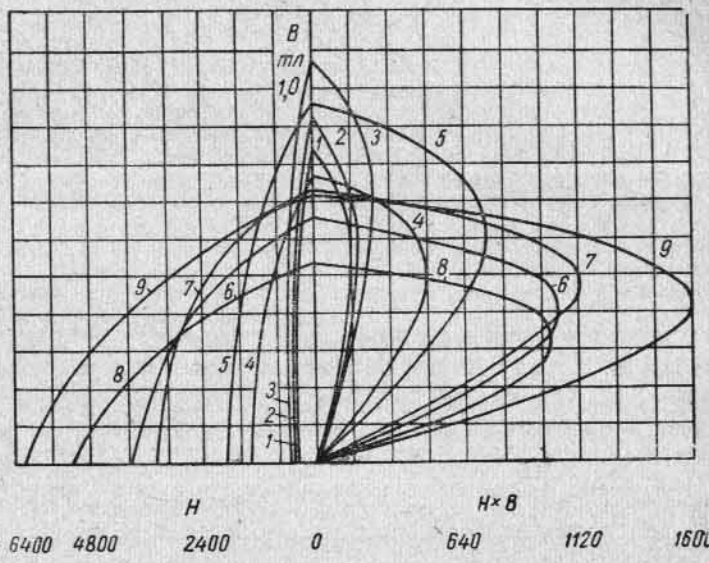


Рис. В-26. Магнитные характеристики различных стальных сплавов для постоянных магнитов

1 — углеродистая сталь; *2* — кремнистая сталь; *3* — сталь Т; *4* — кобальтохромистая сталь; *5* — 36%-ная кобальтовая сталь; *6* — альнико 1; *7* — альнико 2; *8* — нипермаг; *9* — сталь KS

Нормальное удельное сопротивление меди для электрических проводников принимается равным $0{,}017241 \cdot 10^{-6}$ *ом·м* при 20°С, плотность $8{,}9 \cdot 10^{3}$ *кг/м*^{3}, коэффициент линейного расширения $1{,}68 \cdot 10^{5}$, удельная теплопроводность $3{,}75 \cdot 10^{2}$ *вт/ (град·м)*, удельная теплоемкость 390 *вт·сек/град*.

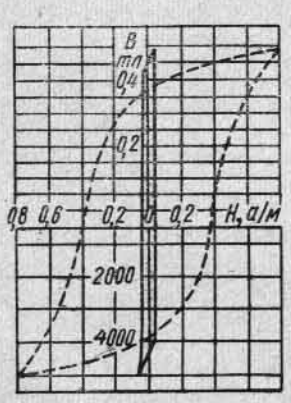


Рис. В-27. Кривые намагничивания пермаллоя С (сплошные кривые) и кремнистой стали (штриховые кривые)

Кроме меди, в качестве электропроводящего материала нашел значительное применение алюминий. Его удельное сопротивление в нормально рафинированном виде при 20° С составляет $0{,}0282 \cdot 10^{-6}$ *ом·м*, плотность $2{,}64 \cdot 10^{3}$ *кг/м*^{3} литого и $2{,}7 \cdot 10^{3}$ *кг/м*^{3} тянутого алюминия, коэффициент линейного расширения $2{,}22 \cdot 10^{-5}$, удельная теплоемкость 810 *вт·сек/град* и удельная теплопроводность $2 \cdot 10^{2}$ *вт/ (град·м)*. Удельное сопротивление алюминия значительно изменяется в зависимости от температуры. Ниже приведены соответствующие данные:

Температура, °С	—78	+20	+100	+200
Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^{-6}$, *ом·м*	0,018	0,0282	0,0367	0,0486

Д. Изоляционные материалы [72]. В электрических машинах применяется большое количество различных изоляционных материалов. Основное их назначение — электрически изолировать токоведущие части. Поэтому главнейшее

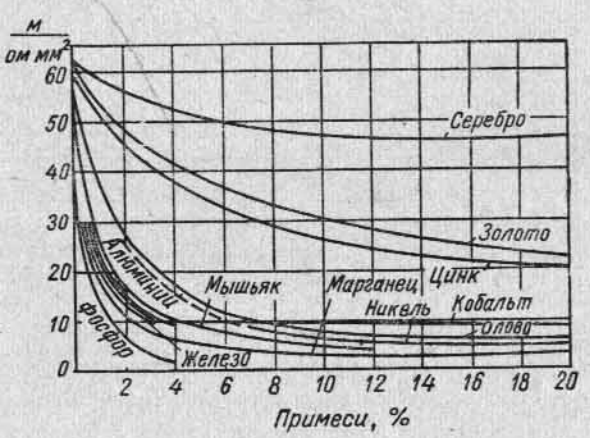


Рис. В-28. Кривые изменения электропроводности меди в зависимости от процентного содержания различных примесей

требование к изоляционным материалам — высокая диэлектрическая прочность. Так как изоляция машин работает при повышенных температурах, механических напряжениях и воздействиях атмосферной влаги и в некоторых случаях различных химических агентов, то диэлектрическая прочность должна сочетаться с нагревостойкостью, теплопроводностью, влагостойкостью, химостойкостью и определенной механической прочностью. В зависимости от комбинации требований меняются исходные изоляционные материалы и их технологическая обработка.

Так как изоляционные материалы имеют различную нагревостойкость, то в зависимости от сорта примененных изоляционных материалов может быть допущен тот или иной нагрев обмоток.

Нормами ГОСТ 8865—66 предусматривается деление изоляции на 7 классов (см. табл. В-7), что соответствует рекомендациям Международной Электротехнической Комиссии (МЭК).

Слюда, обладая нагревостойкостью, диэлектрической и химической стойкостью и хорошей расщепляемостью на отдельные тонкие листочки, является одним из основных элементов для электрической изоляции. Имеются две разновидности слюды — мусковит, или калиевая слюда, и флогопит, или калиевомагнезиальная слюда. На основе слюды изготовляется коллекторный миканит, формовочный миканит, гибкий миканит и микаленты. В ответственных машинах переменного и постоянного тока (тяговые двигатели) применяется микалента

Таблица В-7

Обозначение класса нагревостойкости	Допустимая температура, °С	Краткая характеристика основных групп материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
Y	90	Непропитанные волокнистые материалы из целлюлозы и шелка
A	105	Пропитанные волокнистые материалы из целлюлозы и шелка
E	120	Некоторые синтетические органические пленки
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами
H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры
P C	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими, или с элементноорганическими связующими составами

толщиной 0,075; 0,1 и 0,13 *мм*. Обычная микалента изготовляется на тонкой бумажной основе, на которую черным асфальтовым лаком наклеиваются пластинки расщепленной слюды. Нагревостойкая микалента имеет подложку из стеклоткани, изготовляемой из крученых стеклянных нитей, и кремнийорганические связующие лаки. Резиностеклоткань представляет собой эластичный электроизоляционный материал из бесщелочной стеклоткани, пропитанной нагревостойким кремнийорганическим лаком.

За последние годы были разработаны новые изолирующие материалы для крупных синхронных машин, основанные на применении миканитовых лент, пропитанных лаками, состоящими из стирена, полиэстеров и некоторых катализаторов. Они нечувствительны к влаге, а также к влиянию химических агентов, имеют большую механическую прочность и в то же время достаточную гибкость, что весьма важно для длинных секций; обладают большой теплопроводностью и диэлектрической прочностью.

Фирма «Вестингауз» разработала изоляцию типа «Термоластик», предоставив лицензии ряду других фирм («Шнейдер—Вестингауз», «Жемон» и др.). Фирма «GE» использует посредством перегонки при высокой температуре отходы слюды, выполняя однородные микаленты, получившие название самика. В них скрепляющая бумага заменена стеклянной материей с высокими механическими свойствами и высокими допустимыми температурами. В качестве основного элемента используются искусственные эпоксидные смолы. Пропитка подготовленных стержней обмотки производится в горизонтальных пропиточных баках, в которые можно закладывать стержни машин большой активной длины — до 9 *м*. Чтобы избегнуть окисления компаундной массы, обработка под давлением осуществляется в атмосфере азота.

Французская фирма «Альстом» на основе лицензии фирмы «GE» разработала изоляцию, носящую название «изотенакс»; на Харьковском заводе «Электротяжмаш» разработана изоляция, носящая название «кремнийластик» и «ВЭС». В основу ее положена стекломикалента, а в качестве связующего используются эпоксиднокремнийорганические лаки и эпоксидностирольные лаки. Изоляция обладает большой термореактивностью и не вытекает под действием нагрева, имеет большую нагревостойкость, не разрушаясь под действием температур до 200° С; эта изоляция имеет низкие диэлектрические потери при рабочих температурах, малую зависимость tg δ от напряжения, повышенную механическую

Таблица В-8

Наименование материала	Толщина, *мм*	Масса 1 $м^2$ 10^3, $кг/м^3$	Плотность $\gamma \cdot 10^{-3}$, $кг/м^3$	Прочность 10^{-6}, $н/м^2$		Электрическая прочность 10^{-3}, $кв/м$
				в продольном направлении	в поперечном направлении	
Бумага японская	0,015—0,025	11—12	0,55—0,7	8,5—9,6	1,06—1,08	
» оклеечная	0,035	23	0,65	2,3	10	—
» кабельная	0,17	120	0,75	6,2	33	—
» телефонная	0,07	52	0,75	5,5	25	—
Прессшпан	0,27	—	1,16	7	65	13,5
»	1	—	1,2	5,9	3,9	14
Фибра	1,6	—	1,2	8,6	6,3	1,8—8,8
Латероид	0,27	—	1	8,3	4,25	14,5
Лакоткань желтая	0,25	—	—	2,3	—	32
« черная	0,37	—	—	4,2	—	30
Лакошелк	0,13	—	—	2,5	—	35
Стеклянная лента	0,1	—	—	6	—	—
Слюда мусковит	—	—	2,76—3,20	—	—	80—200
» флогопит	—	—	2,5—2,7	—	—	80—170
Миканит твердый	1	—	2—2,4	—	—	30—36
Микафолий	0,25	—	1,5—2,4	—	—	25
Микалента	0,13	—	—	—	—	30
Хлопчатобумажная лента	0,16—0,18	7	—	4	—	—
Асбестовая лента	0,4—0,5	—	—	1—1,2	—	—
Стеклослюдяная лента	0,15—0,17	—	—	—	—	30

прочность и высокую короностойкость. Изделия из слюды, стеклянной ленты, резиностеклоткани и синтетических лаков позволили получить новые классы изоляции, которые обладают большой нагревостойкостью и высокими диэлектрическими свойствами.

В табл. В-8 приведены данные о главнейших применяемых в электромашиностроении изоляционных материалах.

Надежность машины в эксплуатации в значительной степени зависит от пропитки и компаундировки как обмотки в целом, так и отдельных изоляционных материалов. Применяемые для этой цели лаки и компаунды чрезвычайно разнообразны.

Требования, предъявляемые к лакам, заключаются в следующем: а) лак должен иметь достаточную диэлектрическую прочность; б) должен хорошо пропитывать изоляционные материалы; в) лаковая пленка должна быть влагостойка и химостойка; г) лак должен быть нагревостоек и при нормальных температурах работы не должен давать трещин и терять эластичность.

В ряде случаев лак, кроме того, должен обладать хорошими клеящими свойствами. Удовлетворить всем этим требованиям очень трудно. Поэтому применяются различные лаки, обладающие в большей мере одними свойствами и в меньшей другими. Комбинированная пропитка в нескольких лаках позволяет получить максимально возможное удовлетворение всех требований. Характерные свойства главнейших категорий лаков приведены в табл. В-9.

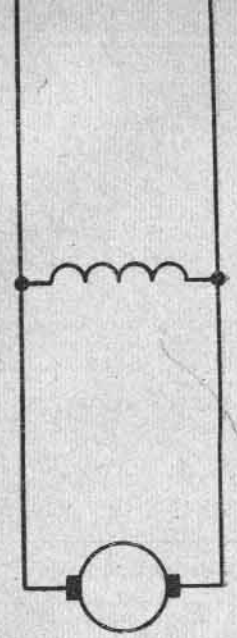
Таблица В-9

Материал	Время сушки, ч		Плотность $\gamma \cdot 10^{-3}$, $кг/м^3$	Вязкость по Энглеру при 15° С	Электрическая прочность 10^{-3}, $кв/м$	Влагопоглощаемость в воде, %	
	печной	воздушной				один слой	два слоя
Светлые лаки на льняном и тунговом маслах:							
а) пропиточные	6	—	0,855—0,875	60—100	28—36	100	43
б) для лакоткани	8	—	0,83—0,875	60—100	28—36	—	—
Асфальтомасляные лаки	15	—	0,83—0,86	90—110	36—48	20	1
Черный эмалевый лак	16	—	0,87	—	24	—	—
Спиртовые лаки:							
а) черный отделочный	—	0,5	0,87—0,93	80—140	24	100	44
б) светлый	—	3	0,945	40—60	20	—	—
в) шеллачный клеевой	—	2	0,975	120—140	36	—	—

Для компаундирования обмоток (заполнения воздушных пространств изоляции) применяются асфальтовые компаунды. Основные свойства их следующие: плотность $1{,}1 \cdot 10^3$ $кг/м^3$, точка размягчения 88—93° С, точка плавления 100—110° С, температура вспышки 250° С, электрическая прочность 30 *кв* при 60° С между шарообразными электродами радиусом $r = 13$ *мм* при расстоянии 1,27 *мм*.

Для изоляции обмоток трансформаторов и для лучшего их охлаждения применяется так называемое трансформаторное масло. Основное требование к этому маслу — высокая диэлектрическая прочность. Это достигается путем тщательной его очистки от различных примесей и кислот и путем удаления влаги.

Температура вспышки масла 140° С, вязкость по Энглеру при 50° С 1,8, минимальный пробивной градиент 22 *кв/мм*. Основным недостатком масла является его горючесть, приводящая иногда к тяжелым повреждениям при авариях. Поэтому за последние годы появились полноценные негорючие заменители трансформаторного масла, обладающие даже несколько лучшей теплопроводностью. К числу этих заменителей в первую очередь относится совол.



Раздел первый

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глава первая

ОСНОВНОЙ ТИП МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЕЕ КОНСТРУКЦИИ [23, 30 б, 46, 49]

1-1. Краткая история развития машины постоянного тока

История развития электромашиностроения, начиная со времени открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции (1831 г.) и до середины 80-х годов прошлого столетия, представляет собой по существу историю развития машины постоянного тока. За это время она прошла четыре этапа развития, а именно: 1) машины магнитоэлектрического типа с постоянными магнитами, 2) машины электромагнитного типа с независимым возбуждением, 3) машины того же типа с самовозбуждением и элементарным типом якоря и 4) машины многополюсного типа с усовершенствованным якорем.

Первый этап развития машины постоянного тока, охвативший время с 1831 по 1851 г., неразрывно связан с именами русских ученых Э. Х. Ленца и Б. С. Якоби, о роли и значении которых уже говорилось во введении.

Второй и третий этапы развития машины постоянного тока, охватывающие период с 1851 по 1871 г., характеризуются переходом к машинам электромагнитного типа сначала с независимым возбуждением, а затем с самовозбуждением, а также переход от двухполюсной машины к многополюсной.

На четвертом этапе своего развития — с 1871 по 1886 г.— машина постоянного тока приобрела все основные черты современной конструкции. Были предложены и осуществлены: машина с самовозбуждением Грамма и кольцевой якорь Пачинотти; нормальный в настоящее время тип барабанного якоря (Гефнер—Альтенек, 1871 г.); типы простых петлевых и волновых обмоток в их главных модификациях, последовательно-параллельных обмоток Арнольда, смешанные (лягушечьи) обмотки, уравнительные соединения обмоток (Мордей, 1883 г.), добавочные полюсы для улучшения коммутации (Метер, 1885 г.) и компенсационные обмотки для компенсации реакции якоря (Менгес, 1884 г.), делитель напряжения М. О. Доливо-Добровольского.

Для последующего развития машин постоянного тока большое значение имело создание одноякорного преобразователя переменного тока в постоянный и обратного преобразователя постоянного тока в переменный; создание мощных установок по системе Леонарда—Ильгнера для промышленности (металлургические установки и шахтные подъемники), установки с ртутными преобразователями для питания машин постоянного тока промышленных устройств и электрифицированных ж. д. как на тяговых подстанциях, так и на электровозах.

В 30-х годах нашего столетия начинается разработка специальных типов электрических машин с поперечным полем по системе Розенберга (E. Rosenberg) для освещения поездов и электрической сварки, а также в качестве электромашинных усилителей для управления в системах сложных электроприводов.

Широкое применение машины постоянного тока получили сначала как быстроходные турбогенераторы ограниченной мощности, а затем как возбудители мощных быстроходных синхронных турбогенераторов. Особенно большое применение нашли машины постоянного тока во вспомогательных механизмах судового электропривода, а также для электродвижения судов.

Для быстрого развития точных автоматизированных приводов с широким и плавным регулированием скорости большое значение имело создание микродвигателей постоянного тока для специальных устройств (вычислительные и управляющие машины), разработка серий машин постоянного тока массового производства малой и средней мощности и серийного производства машин постоянного тока большой мощности.

Наряду с совершенствованием конструкций машин постоянного тока шла большая теоретическая и исследовательская работа. Для раннего периода особенно важное значение имеют труды А. Г. Столетова по исследованию магнитных свойств ферромагнитных материалов, легшие в основу рациональных методов расчета магнитных цепей электрических машин (1872 г.).

Дальнейшее совершенствование машин постоянного тока непосредственно связано с разработкой вопросов теории электрических машин: теории обмоток якоря и уравнительных соединений к ним, теории коммутации, анализа переходных режимов машин постоянного тока при пуске, регулировании и коротких замыканиях, с разработкой усовершенствованных методов расчета электрических машин и т. д.

1-2. Основной тип машины постоянного тока

Все, что было сказано выше о машине постоянного тока, относится к ее коллекторному типу, т. е. к машине, которая по существу является машиной переменного тока, но имеет специальное устройство — коллектор, позволяющий в определенных условиях преобразовывать переменный ток в постоянный.

Коллектор осложняет условия работы машины, и поэтому в начале текущего столетия была сделана попытка создать бесколлектор-

ную, или так называемую униполярную, машину постоянного тока. Однако опыт показал, что эта машина не имеет каких-либо особых преимуществ перед коллекторной машиной, тем более, что к 10-м годам текущего столетия удалось сконструировать коллекторную машину постоянного тока, удовлетворяющую самым тяжелым требованиям эксплуатационной практики. Поэтому в настоящее время *основным типом машины постоянного тока является ее коллекторный тип*, тогда как униполярная машина находит применение только в отдельных специальных случаях.

Так как область промышленного применения постоянного тока весьма широка, то машина постоянного тока выполняется для работы в режимах генератора и двигателя в широком диапазоне мощности, напряжения, скорости вращения и т. д. Но при ближайшем знакомстве с различными типами машин постоянного тока оказывается, что основные конструктивные элементы машины и происходящие в ней процессы имеют много общего. Это позволяет сначала выделить основной материал, а затем, в завершение раздела, дать описание некоторых специальных типов машин постоянного тока.

1-3. Выпрямление переменного тока в постоянный с помощью коллектора

Чтобы выяснить процесс преобразования переменного тока в постоянный в коллекторной машине, рассмотрим сначала работу простейшей машины переменного тока. Будем считать, что она работает в режиме генератора, т. е. приводится во вращение каким-нибудь механическим двигателем и преобразует подводимую к ней механическую энергию в электрическую.

На рис. 1-1 показана машина, магнитная система которой состоит из двух неподвижных в пространстве полюсов N—S, создающих постоянный по величине магнитный поток. По общему правилу, в пространстве между полюсами N—S линии этого потока направлены от северного полюса N к южному полюсу S. В этом же пространстве находится якорь, на поверхности которого уложен в диаметральной плоскости виток (контур) ab—cd; концы витка присоединены к двум кольцам, посаженным на вал вглухую, а на кольца наложены щетки A и B, к которым присоединяется внешняя цепь, состоящая из каких-либо приемников электроэнергии.

Приведем якорь во вращение с постоянной скоростью в заданном направлении, например против вращения часовой стрелки. Так как проводники ab и cd находятся в совершенно одинаковых условиях один относительно полюса N, другой относительно полюса S, то достаточно рассмотреть процесс создания электродвижущей силы (сокращенно э. д. с.) только в каком-нибудь одном проводнике, например в проводнике ab. Предположим, что по всей длине активной части проводника, т. е. той его части, которая пересекает линии магнитного поля, индукция B имеет одно и то же значение. Если v — скорость вращения проводника относительно магнитного поля, то по закону электромагнитной индукции в формулировке Фарадея мгновенное

значение э. д. с., наводимой в проводнике при вращении якоря, определяется по формуле

$$e = Blv. \qquad (1\text{-}1)$$

Так как величины l и v заданы, то формулу (1-1) можно написать в виде

$$e = \text{const}\, B. \qquad (1\text{-}1а)$$

Таким образом, в рассматриваемых условиях характер изменения э. д. с. в проводнике в зависимости от времени целиком определяется характером распределения магнитной индукции под полюсом.

Условимся называть линию, которая проходит через центр якоря точно по середине между полюсами N и S, геометрической нейтралью, а часть окружности якоря τ, соответствующую одному полюсу, полюсным делением. Машина на рис. 1-1 имеет два полюсных деления соответственно одной паре полюсов.

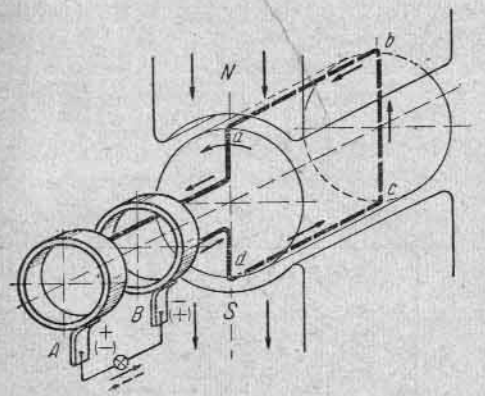


Рис. 1-1. Схема работы машины переменного тока

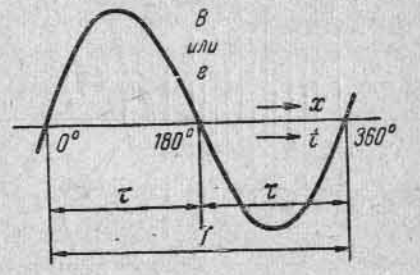


Рис. 1-2. Синусоида индукции или э. д. с.

Распределение магнитной индукции под полюсами реальной машины носит сложный характер (см. § 2-3). Но, пользуясь методом разложения кривых в ряд гармонических, можно выделить первую, или основную, гармоническую, т. е. считать, что магнитная индукция распределена под полюсами N и S синусоидально (рис. 1-2). В этом случае наводимая в проводнике э. д. с. изменяется во времени тоже синусоидально.

Направление наводимой э. д. с. проще всего определяется по правилу правой ладони, состоящему в следующем: ладонь правой руки располагают в магнитном поле так, чтобы линии магнитной индукции были направлены в ладонь, а большой палец отводят относительно других пальцев в плоскости ладони на 90° и направляют по движению проводника (рис. 1-3); тогда остальные пальцы руки покажут направление наведенной в проводнике э. д. с.

Прилагая это правило к проводнику ab на рис. 1-1, мы видим, что, когда он проходит под северным полюсом, то в нем наводится э. д. с., направленная к нам из-за плоскости чертежа, а когда он про-

ходит под южным полюсом, то в обратном направлении — от нас за плоскость чертежа. Таким образом, в проводнике *ab* наводится переменная во времени э. д. с., изменяющая свое направление два раза за один оборот якоря. Время T, за которое происходит одно полное изменение э. д. с., называется периодом э. д. с. Число периодов в одну секунду называется частотой и измеряется в герцах (*гц*). В общем случае, когда машина имеет p пар полюсов, частота наводимой э. д. с. увеличивается пропорционально p, т. е.

$$f = pn, \tag{1-2}$$

где n — скорость вращения, измеряемая числом оборотов в секунду. Обычно n измеряют числом оборотов в минуту, в этом случае

$$f = \frac{pn}{60}. \tag{1-2а}$$

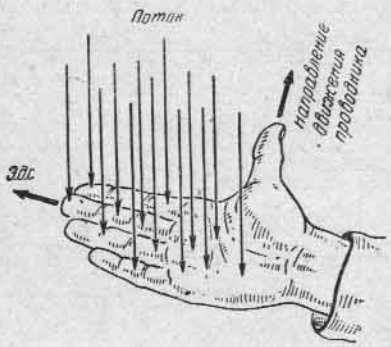


Рис. 1-3. Правило правой ладони

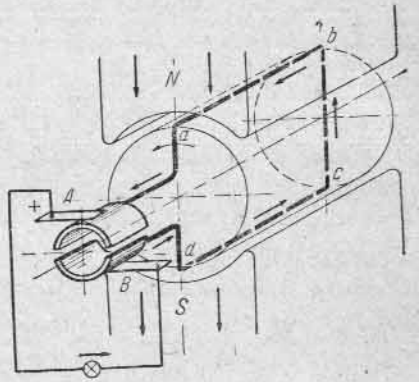


Рис. 1-4. Схема работы машины постоянного тока

Так, на рис. 1-6 представлен чертеж четырехполюсной машины постоянного тока, но число полюсов $2p$ может быть и значительно большим, например 24, но, конечно, всегда четным.

Рассматривая рис. 1-1, мы видим, что каждая из щеток соединена через кольцо только с каким-нибудь одним проводником, а именно, щетка A — с проводником *ab*, а щетка B — с проводником *cd*. Следовательно, *на зажимах внешней цепи появляется переменное во времени напряжение и по ней течет переменный ток, имеющий частоту f.*

Чтобы заставить этот ток протекать по внешней цепи в каком-нибудь одном направлении, т. е. выпрямить его, в машине выполняют специальное устройство, называемое коллектором. Принцип действия его состоит в следующем. Концы витка *ab—cd* присоединяются к двум медным сегментам — пластинам коллектора, изолированным как друг от друга, так и от вала, на который они посажены вглухую (рис. 1-4). На пластины наложены неподвижные в пространстве щетки A и B, к которым присоединяется внешняя цепь. При этом расположение щеток на пластинах, в противоположность их расположению на кольцах на рис. 1-1, не безразлично, а имеет существенное значение.

Чтобы выпрямить переменный ток полностью, нужно поставить щетки так, как это показано на рис. 1-4, а именно, чтобы наводимая в витке э. д. с. была равна нулю в момент перехода щетки с одной пластины на другую. Тогда при вращении якоря в витке *ab—cd* будет по-прежнему наводиться переменная э. д. с., но *каждая из щеток будет соприкасаться только с той коллекторной пластиной и соответственно только с тем из проводников, которые находятся под полюсом данной полярности*. Например, щетка A соприкасается всегда только с той пластиной, с которой соединен проводник, находящийся под северным полюсом; наоборот, щетка B соприкасается только с тем проводником, который находится под южным полюсом. Следовательно, по внешней цепи ток будет протекать только в одном направлении, а именно от щетки A к щетке B; другими словами, *происходит выпрямление наводимой в витке ab—cd переменной э. д. с. и соответственно переменного тока в пульсирующую э. д. с. и пульсирующий ток на щетках* и, стало быть, во внешнем участке цепи (рис. 1-5). Если, как это было условлено выше, машина работает в режиме генератора, то щетка A, от которой ток отводится во внешнюю цепь, считается положительной и обозначается знаком плюс, а щетка B, через которую ток поступает обратно в машину, считается отрицательной и обозначается знаком минус.

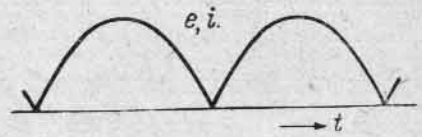


Рис. 1-5. Выпрямленная э. д. с. и ток

Пульсации тока на рис. 1-5 происходят в пределах от наибольшего его значения до нуля, т. е. носят резко выраженный характер.

Ниже будет показано (см. гл. 3), что пульсация э. д. с. сглаживается, если уложить на якорь обмотку, состоящую из большого числа проводников, определенным образом выполненную и соединенную с коллектором.

1-4. Основные элементы конструкции машины постоянного тока

Машина постоянного тока состоит из двух основных частей:

1) неподвижной части, предназначенной в основном для создания магнитного потока, и

2) вращающейся части, которая называется якорем и в которой происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую (электрический генератор) или обратно — электрической энергии в механическую (электродвигатель).

Неподвижная и вращающаяся части отделяются друг от друга зазором.

Неподвижная часть машины постоянного тока состоит из основных полюсов, предназначенных для создания основного магнитного потока; добавочных полюсов, устанавливаемых

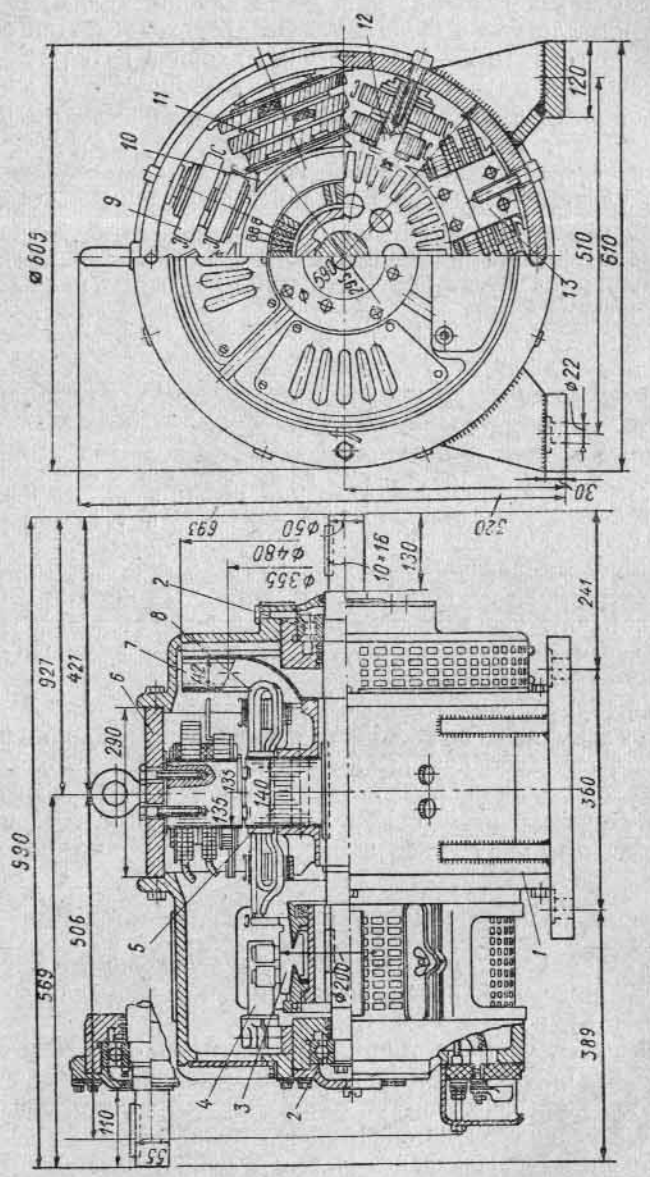


Рис. 1-6. Продольный и поперечный разрезы машины постоянного тока ПН-290

1 — станина; *2* — щитовой подшипник; *3* — коллектор; *4* — щеточный палец; *5* — сердечник якоря; *6* — ярмо; *7* — вентилятор; *8* — обмотка якоря; *9* — катушка добавочного полюса; *10* — полюсный наконечник; *11* — катушка основного полюса; *12* — сердечник добавочного полюса; *13* — сердечник основного полюса

между основными и служащих для достижения безыскровой работы щеток на коллекторе (при недостатке места в машинах очень малой мощности добавочные полюсы не устанавливаются); станины.

Якорь представляет собой цилиндрическое тело, вращающееся в пространстве между полюсами, и состоит из зубчатого сердечника якоря; уложенной на нем обмотки; коллектора и щеточного аппарата.

Приводим краткое описание главных конструктивных элементов машины постоянного тока.

А. Основные (главные) полюсы. В процессе развития машины постоянного тока конструкция ее магнитной системы претерпела много изменений. Поперечный и продольный разрезы современной машины показаны на рис. 1-6.

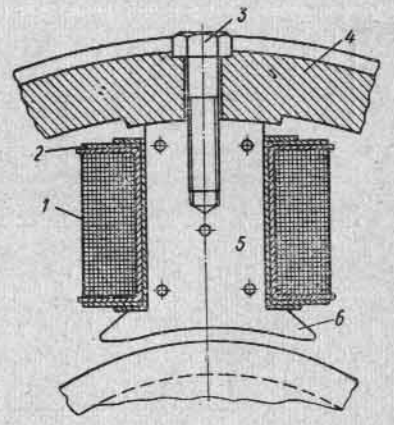


Рис. 1-7. Основной полюс

Основной полюс изображен на рис. 1-7. Он состоит из набираемого на шпильках сердечника *5* из листовой электротехнической стали толщиной 1 *мм*. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник имеет полюсный наконечник *6*, служащий для облегчения проведения магнитного потока через воздушный зазор. На сердечник полюса надевают катушку обмотки возбуждения *1*, по которой проходит постоянный ток. Катушка наматывается на каркас *2*, выполняемый либо из листовой стали толщиной 1—2 *мм* с оклейкой электротехническим картоном на толщину 2—3 *мм*, либо из пластмассы или бакелизированной бумаги. В машинах малой и средней мощности в настоящее время нередко выполняют бескаркасные катушки основных полюсов. С целью уменьшения гигроскопичности и увеличения теплопроводности катушки компаундируют или подвергают многократной пропитке в горячих лаках с последующей сушкой в печах. Для лучшего охлаждения катушку делят по высоте на две или несколько частей, между которыми оставляют достаточной ширины вентиляционные каналы. Крепление полюсов к станине *4* производится при помощи специальных болтов *3*.

Б. Добавочные полюсы (рис. 1-8). Добавочный полюс, так же как и основной, состоит из сердечника *1*, оканчивающегося полюсным наконечником той или иной формы, и надетой на сердечник катушки *2*. Добавочные полюсы устанавливаются строго по середине между основными полюсами и крепятся к станине болтами. Обычно добавочные полюсы делаются массивными, но в машинах, работающих при резко переменной нагрузке, они выполняются из листовой стали. О роли и значении добавочных полюсов — см. § 6-5.

В. Станина. Станиной называют неподвижную часть машины, к которой крепятся основные и добавочные полюсы и при помощи которой

машина крепится к фундаменту. Часть станины, служащая для проведения потока основных и добавочных полюсов, называется ярмом (*6* на рис. 1-6).

Станина делается из чугуна или стали с разъемом или без него в зависимости от типа и мощности машины. Если диаметр якоря не превосходит 35—45 *см*, то, кроме полюсов, к станине крепятся еще подшипниковые щиты, поддерживающие щитовые подшипники (*2* на рис. 1-6). Если диаметр щита превышает 1 *м*, то обычно переходят на стояковые подшипники, устанавливаемые отдельно от станины на фундаментной плите машины (рис. 1-9).

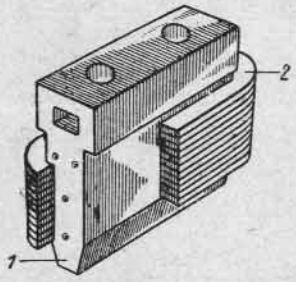


Рис. 1-8. Добавочный полюс
1 — сердечник; *2* — полюсная катушка

Щитовые, а иногда и стояковые подшипники выполняются как подшипники качения на шариках или роликах. Стояковые подшипники чаще всего выполняются как подшипники скольжения.

В машинах с большим диаметром якоря к станине часто крепится щеточная траверса.

Г. Якорь. Первоначально применявшиеся формы массивных якорей — Т-образные, дисковые, кольцевые — сейчас имеют только исторический интерес. В настоящее время применяются исключительно зубчатые якоря барабанного типа, выполненные из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 *мм* при нормальной для машин постоянного тока частоте перемагничивания якоря (20—60 *гц*). Листы стали набираются в осевом направлении машины и для уменьшения

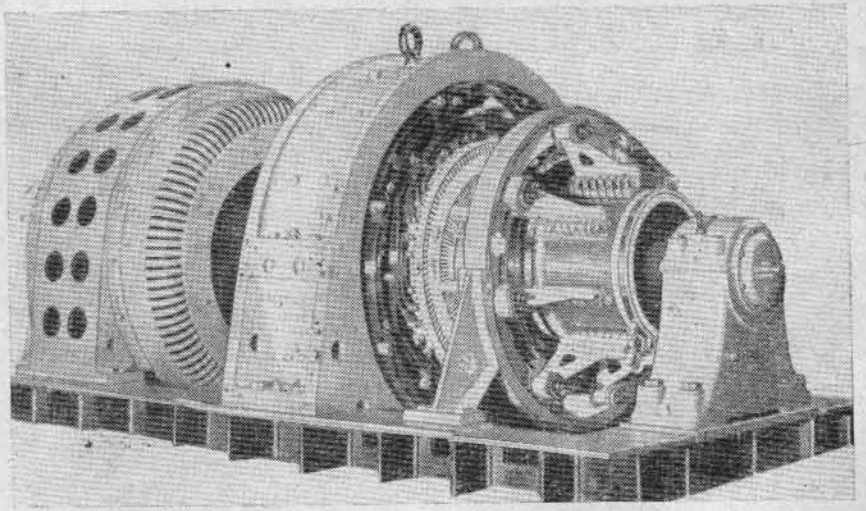


Рис. 1-9. Генератор постоянного тока мощностью 1000 *квт*, 250 *в*, 4000 *а*, 750 *об/мин*, со стояковым подшипником

потерь от вихревых токов изолируются друг от друга лаком или бумагой толщиной 0,03 — 0,05 *мм*. Машины постоянного тока малой мощности выполняются обычно с осевой системой вентиляции (рис. 1-10), машины относительно большой мощности имеют радиальную систему вентиляции (см. рис. 2-4). В последнем случае сердечник якоря состоит из двух или нескольких пакетов, размер каждого из которых в осевом направлении составляет 4—10 *см*; ширина вентиляционного канала между пакетами 8—10 *мм*. Сердечник якоря спрессовывается с обеих сторон посредством нажимных приспособлений, которые особым образом крепятся на валу или стягиваются болтами. Для улучшения охлаждения машины малой мощности снабжаются крылышками; в машинах большой мощности на вал насаживают вентилятор (см. *7* на рис. 1-6).

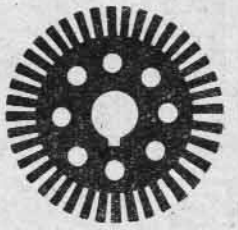


Рис. 1-10. Лист стали барабанного якоря с осевой системой вентиляции

Д. Обмотка якоря. Так же как и другие части машины, обмотка якоря машины постоянного тока претерпела ряд изменений. Применяемые в настоящее время обмотки якоря барабанного типа состоят из секций (рис. 1-11), изготовляемых чаще всего на особых шаблонах и укладываемых в пазах сердечника якоря. На рис. 1-12а представлен необмотанный якорь машины постоянного тока небольшой мощности, а на рис. 1-12б — тот же якорь в готовом виде. На рис. 1-13 приведена фотография обмотанного якоря многополюсной машины постоянного тока большой мощности.

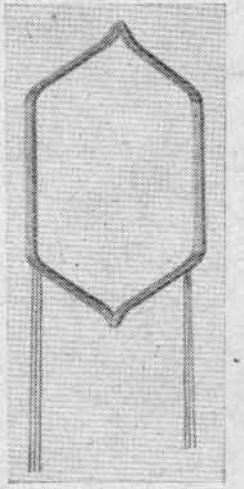


Рис. 1-11. Отдельная секция обмотки

Основные особенности конструкции обмотки якоря рассмотрены в § 3-8.

Е. Коллектор. Обмотка якоря присоединяется к коллектору, который имеет различное исполнение в зависимости главным образом от мощности машины и ее быстроходности. На рис. 1-14 показан коллектор простого цилиндрического типа. Обычно коллектор выполняется из мелких пластин *1* трапецеидальной формы, изолированных друг от друга и от корпуса посредством миканитовых прокладок и миканитовых манжет. Пластины закрепляются на ласточкиных хвостах, и после ряда запрессовок в горячем состоянии коллектор обтачивается, чтобы его поверхность была строго цилиндрической. Соединение обмотки якоря с коллектором можно производить различным образом. Если разница между диаметрами якоря и коллектора невелика, то концы секций якорной обмотки непосредственно впаиваются в пластины коллектора. При значительной разнице между этими диаметрами соединение производится с помощью соединительных звеньев (петушков), одна из возможных форм которых показана на рис. 1-14.

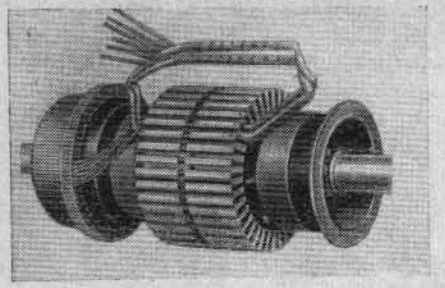


Рис. 1-12а. Необмотанный якорь машины постоянного тока

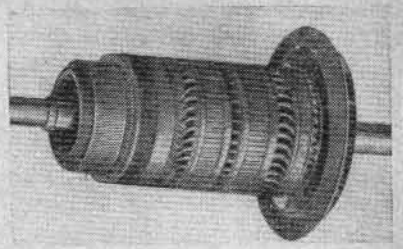


Рис. 1-12б. Якорь машины постоянного тока в готовом виде

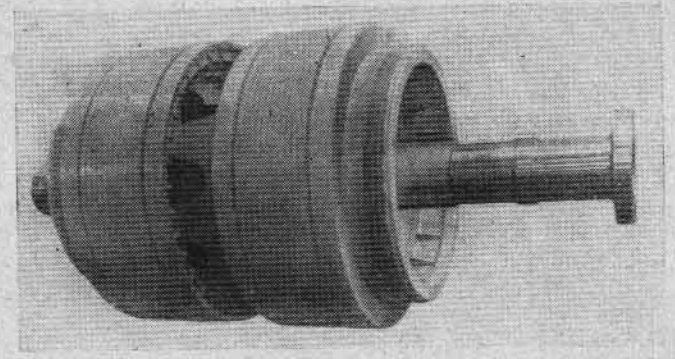


Рис. 1-13. Якорь двухъякорной машины постоянного тока большой мощности

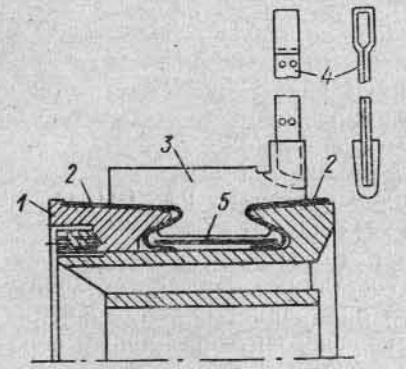


Рис. 1-14. Продольный разрез коллектора цилиндрического типа

1 — нажимные конусы; *2* — изолирующие манжеты; *3* — коллекторная пластина; *4* — петушок; *5* — изолирующая прокладка

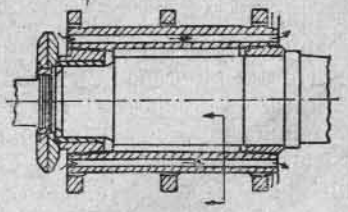


Рис. 1-15. Коллектор быстроходных машин

Машины большой мощности нормальной скорости вращения часто имеют двойной, или разделенный, коллектор. Такой коллектор состоит из двух половин, стягиваемых болтами и соединяемых медными перемычками, играющими роль добавочного вентилятора (см. рис. 1-9).

В быстроходных машинах мощностью от 15 *квт* и выше при больших скоростях вращения (3000 *об/мин* и выше) коллектор крепится дополнительно с помощью бандажных колец, с тем чтобы устранить выпучивание коллекторных пластин под действием центробежных сил и нагревания коллектора (рис. 1-15). В специальных случаях для устранения вибрации щеток при высоких окружных скоростях выполняют коллектор торцевого (дискового) типа, у которого контактная поверхность перпендикулярна оси вращения (рис. 1-16).

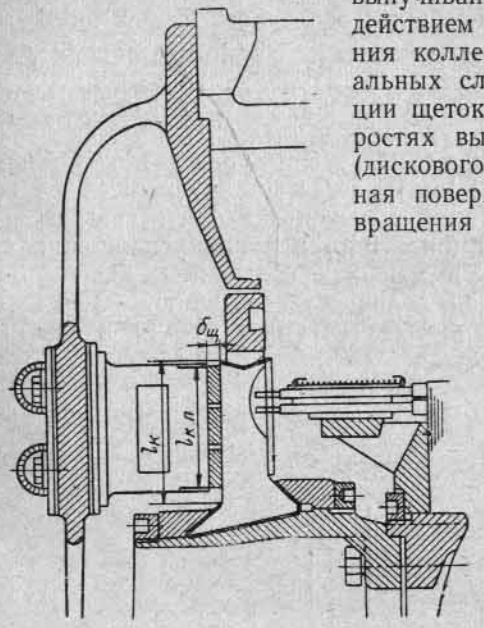


Рис. 1-16. Торцевой коллектор

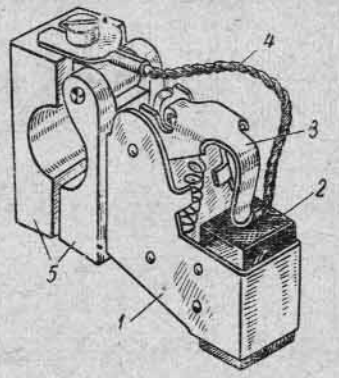


Рис. 1-17. Щеткодержатель

1 — обойма щеткодержателя; *2* — щетка; *3* — нажимная пружина; *4* — токоведущий тросик

Ж. Щеточный аппарат. Для отвода тока от вращающегося коллектора и подвода к нему тока применяется щеточный аппарат, состоящий из а) щеток, б) щеткодержателей, в) щеточных пальцев, г) щеточной траверсы и д) токособирающих шин.

Одна из типичных конструкций щеткодержателя машины постоянного тока показана на рис. 1-17. В современных машинах почти исключительно применяются угольнографитовые или металлоугольные щетки, последние — в коллекторных машинах постоянного тока низкого напряжения. Щетка помещается в щеткодержателе и посредством пружины прижимается к коллектору с силой 1,5 — 2,5 *н/см²*. Щеткодержатель закрепляется на пальце и удерживает щетку в определенном положении относительно коллектора. Наиболее распространен тип щеткодержателя, придающий щетке радиальное положение и

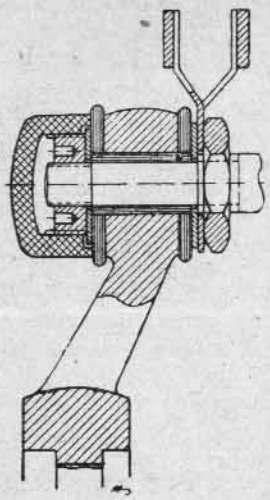


Рис. 1-18. Крепление щеточных пальцев в траверсе

позволяющий ей перемещаться в обойме щеткодержателя. Передача тока от щетки к пальцу осуществляется посредством гибкого кабеля *4* (рис. 1-17). На каждом пальце обычно помещают две или несколько щеток, работающих параллельно. Пальцы щеткодержателей имеют цилиндрическую или призматическую форму, закрепляются в щеточной траверсе и изолируются от нее изоляционными втулками. Один из способов крепления щеточных пальцев в траверсе показан на рис. 1-18. Траверса устанавливается на подшипниках в машинах малой и средней мощности (рис. 1-19) или прикрепляется к станине в машинах большой мощности (рис. 1-20 и 1-21). Все щетки одной полярности соединяются между собой сборными шинами, от которых затем идут отводы к зажимам машины.

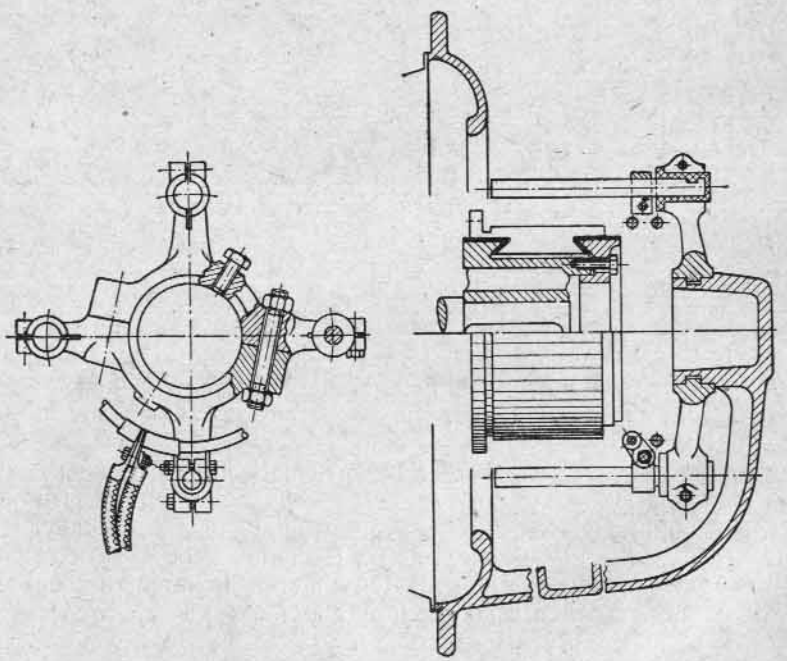


Рис. 1-19. Крепление щеточной траверсы на подшипнике

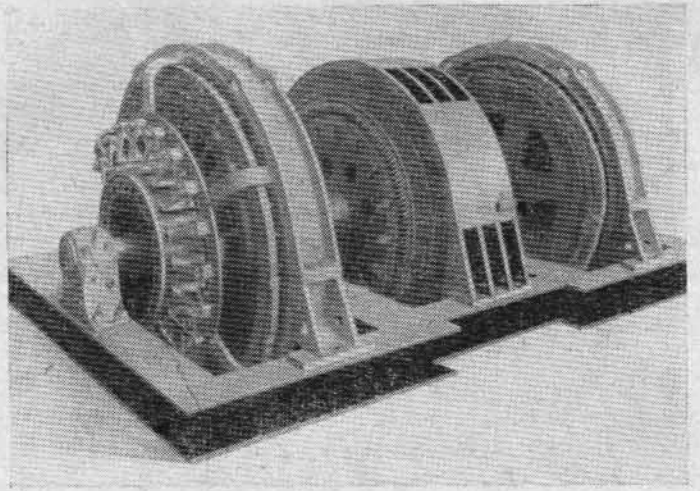


Рис. 1-20. Преобразовательный агрегат, состоящий из синхронного двигателя типа СМ 8100-375, 8100 *кв·а*, 6000 *в*, 375 *об/мин* и двух генераторов постоянного тока типа ГП 3600-375, 3600 *квт*, 800 *в*, 375 *об/мин*

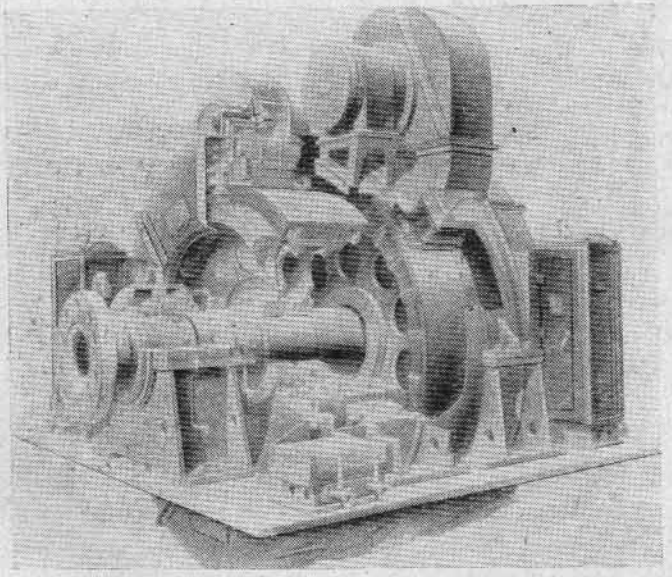


Рис. 1-21. Двухъякорный двигатель постоянного тока типа 2МП 9800-150, 2×3600 *квт*, 1200 *в*, 150/215 *об/мин*

1-5. Номинальные величины

Номинальным режимом работы электрической машины называется режим работы при условиях, для которых она предназначена изготовившим ее заводом.

Номинальный режим работы характеризуется величинами, обозначенными на заводском щитке машины и называемыми номинальными: номинальной мощностью, номинальным напряжением, номинальным током, номинальной скоростью вращения и т. д.

Однако термин «номинальный» может применяться и к величинам, не указанным на щитке машины, но относящимся к номинальному режиму работы. Например: номинальный момент вращения, номинальный коэффициент полезного действия и т. д.

Под номинальной мощностью машины постоянного тока понимают:

1) при работе машины генератором — электрическую мощность, отдаваемую во внешнюю цепь и выраженную в ваттах (*вт*) или киловаттах (*квт*);

2) при работе машины двигателем — полезную механическую мощность на валу, выраженную в тех же единицах, что в п. 1.

Номинальные величины не следует смешивать с нормальными. Если, например, номинальное напряжение двигателя 220 *в*, то в условиях действительной работы напряжение может колебаться и быть как больше, так и меньше номинального. Если взять среднее значение напряжения за достаточно длительный промежуток времени, то его условно можно назвать нормальным или рабочим напряжением машины. Из сказанного следует, что нормальные величины в общем случае могут быть не равны номинальным.

Машины постоянного тока выполняются в весьма широком диапазоне номинальных величин. По мощностям их можно условно разделить на следующие:

Микромашины	меньше 100 *вт*
Мелкие машины	от 100 *вт* до 1 *квт*
Машины малой мощности	от 1 до 10 *квт*
» средней мощности	» 10 до 100 *квт*
Крупные машины	от 100 до 1000 *квт*
Машины большой мощности	больше 1000 *квт*

По уровням номинальных напряжений обычно различают:

Машины низкого напряжения	меньше 100 *в*
» среднего »	от 100 до 1000 *в*
» высокого »	больше 1000 *в*

По скоростям вращения их чаще всего разделяют на машины:

Тихоходные	меньше 250 *об/мин*
Средней скорости	от 250 до 1000 *об/мин*
Быстроходные	от 1000 до 3000 *об/мин*
Сверхбыстроходные	больше 3000 *об/мин*

В ряде случаев, когда требуется весьма большая мощность постоянного тока, бывает целесообразно устанавливать на одном валу

вместо одной машины постоянного тока две, электрически соединяя их якоря последовательно или параллельно. На рис. 1-20 представлен преобразовательный агрегат, состоящий из синхронного двигателя 8100 *кв·а*, 375 *об/мин*, соединенный на одном валу с двумя многополюсными генераторами постоянного тока на 3600 *квт*, 800 *в*. Соответственно на рис. 1-21 представлен двухъякорный многополюсный двигатель постоянного тока, имеющий мощность 2×3600 *квт* $=$ 7200 *квт*, 1200 *в*, 150/215 *об/мин*, с общей фундаментной плитой и двумя стояковыми подшипниками.

Глава вторая

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

2-1. Общие замечания

Данная глава имеет целью изложить способы определения намагничивающей силы (н. с.) главных полюсов, необходимой для создания основного магнитного потока.

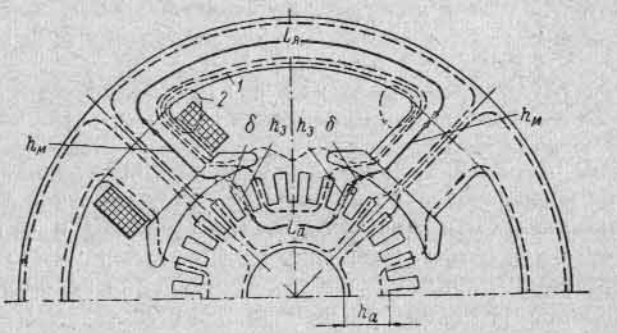


Рис. 2-1. Магнитная цепь основных полюсов машины постоянного тока

Под основным магнитным потоком машины постоянного тока понимают поток в зазоре Φ_0 на площади, соответствующей одному полюсному делению τ, при холостом ходе машины.

На рис. 2-1 показана в схематическом виде часть четырехполюсной машины постоянного тока и изображена картина магнитного потока, создаваемого основными полюсами (добавочные полюсы не показаны, чтобы не загромождать чертежа). Ввиду полной симметрии машины поток, создаваемый каждым из полюсов, делится относительно осевой линии полюса на две части, образующие два одинаковых магнитных контура, расположенных симметрично по обе стороны от осевой линии данного полюса. Число таких контуров равно числу полюсов

машины, но при расчете н. с. достаточно иметь в виду только какой-нибудь один из них.

Часть основного потока, соответствующая половине полюса, условно показана на рис. 2-1 жирными штриховыми линиями, определяющими внешнюю и внутреннюю границы контура, и одной сплошной линией, проходящей посередине контура.

Основной поток составляет только часть потока, создаваемого полюсом. Другая часть потока, называемая потоком рассеяния, ответвляется в пространство между полюсами и, следовательно, не проходит в якорь и не участвует в создании э. д. с. На рис. 2-1 поток рассеяния условно показан двумя штриховыми тонкими линиями *1* и *2*.

Если $\Phi_м$ — весь поток, создаваемый полюсом, и Φ_σ — поток рассеяния, то

$$\Phi_м = \Phi_0 + \Phi_\sigma = \Phi_0\left(1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_0}\right) = \Phi_0 k_\sigma. \qquad (2\text{-}1)$$

Коэффициент $k_\sigma = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_0}$ называется коэффициентом рассеяния основных полюсов. Обычно $k_\sigma = 1{,}12 \div 1{,}25$.

Н. с., необходимую для создания основного магнитного потока Φ_0, будем называть основной н. с.

2-2. Магнитная цепь машины постоянного тока. Определение основной н. с. [58, 59]

Из схемы на рис. 2-1 видно, что каждая линия основного магнитного потока последовательно проходит по ряду участков, образующих в совокупности магнитную цепь машины и отличающихся друг от друга как своими геометрическими размерами, так и физическими свойствами. В этом случае для определения искомой н. с. нужно исходить из закона магнитной цепи, а именно:

$$d\Phi = \frac{F}{R_\mu} = \frac{iw}{\oint \frac{1}{\mu}\frac{dl}{dS}},$$

откуда

$$F = d\Phi \oint \frac{dl}{\mu dS}.$$

В этих формулах: $F = iw$ — н. с. вдоль магнитной цепи; R_μ — магнитное сопротивление цепи; $d\Phi$ — поток элементарной трубки, выделенной в магнитном поле рассматриваемого контура; dl — элемент длины трубки; μ — магнитная проницаемость тел или сред, образующих данный участок цепи; dS — сечение элементарной трубки, нормальное к ее оси.

При расчете основной н. с. машины F_0 мы делим магнитную цепь на ряд участков с таким расчетом, чтобы в пределах каждого из этих участков можно было считать, что магнитный поток, проницаемость и сечение трубки остаются постоянными по всей ее длине l. В этих условиях мы можем рассматривать магнитный поток каждого участка как состоящий из некоторого числа одинаковых элементарных трубок длиной l, равномерно распределенных по площади поперечного сечения S данного участка. Основных участков магнитной цепи — пять, а именно: 1) зазор, 2) зубцовая зона, 3) спинка якоря, 4) сердечник полюса, включая полюсный наконечник, и 5) ярмо. Характерные для каждого участка магнитной цепи величины приводятся в табл. 2-1.

Таблица 2-1

Номер участка	Название участка	Поток участка	Индукция на участке	Площадь поперечного сечения участка	Напряженность магнитного поля	Длина пути на пару полюсов	Н. с. на пару полюсов
1	Зазор	Φ_0	B_δ	S_δ	H_δ	2δ	F_δ
2	Зубцовая зона (зубцы) . .	Φ_0	$B_з$	$S_з$	$H_з$	$2h_з$	$F_з$
3	Спинка якоря	$\Phi_a = \Phi_0/2$	B_a	S_a	H_a	L_a	F_a
4	Сердечник полюса с наконечником	$\Phi_м k_\sigma \Phi_0$	$B_м$	$S_м$	$H_м$	$2h_м$	$F_м$
5	Ярмо	$\Phi_я = \Phi_м/2$	$B_я$	$S_я$	$H_я$	$L_я$	$F_я$

Следует учесть, что длины элементарных трубок (магнитных линий) на участках в ярме и в спинке якоря неодинаковы; поэтому расчет н. с. этих участков ведут по длине средней магнитной линии (сплошная жирная линия на рис. 2-1). Тогда основная н. с. машины, рассчитанная на пару полюсов, может быть записана в виде:

$$F_0 = \Phi_0\frac{2\delta}{\mu_0 S_\delta} + \Phi_0\frac{2h_з}{\mu_з S_з} + \frac{\Phi_0}{2}\frac{L_a}{\mu_a S_a} + k_\sigma\Phi_0\frac{2h_м}{\mu_м S_м} + k_\sigma\frac{\Phi_0}{2}\frac{L_я}{\mu_я S_я}. \qquad (2\text{-}2)$$

Так как согласно условию, магнитный поток распределяется по сечению каждого участка равномерно, то

$$\frac{\Phi_{уч}}{S_{уч}} = B_{уч} = \mu_{уч}H_{уч}. \qquad (2\text{-}3)$$

В этих условиях уравнение (2-2) переписывается в следующем виде:

$$F_0 = 2\frac{B_\delta}{\mu_0}\delta + 2\frac{B_з}{\mu_з}h_з + \frac{B_a}{\mu_a}L_a + 2\frac{B_м}{\mu_м}h_м + \frac{B_я}{\mu_я}L_я =$$
$$= 2H_\delta\delta + 2H_з h_з + H_a L_a + 2H_м h_м + H_я L_я =$$
$$= F_\delta + F_з + F_a + F_м + F_я. \qquad (2\text{-}4)$$

Уравнение (2-4) показывает, что для определения н. с. F_0 нужно для каждого из пяти участков найти соответствующую ему напряженность магнитного поля H и умножить ее на длину пути потока на этом участке. Так как $H = B/\mu$, то напряженность поля данного участка зависит от величины магнитной индукции и магнитной проницаемости материала участка. Если поток и геометрические размеры всех участков заданы, то тем самым определяется магнитная индукция участка [см. формулу (2-3)]. Магнитная проницаемость участка зависит от магнитных свойств материала этого участка. Для немагнитных материалов, в частности воздушного зазора, имеем (см. табл. В-1):

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *гн/м* в рационализованных системах МКСА и СИ;

$\mu_0 = 4\pi$ в рационализованной системе СГСμ_0.

В заводской практике при расчетах магнитных цепей машин пользуются смешанной системой, в основу которой положена система СГСμ_0 с переводом единиц напряжения, тока, мощности и т. д. в практические единицы — вольт, ампер, ватт и т. д.

В этом случае

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-1}.$$

Для магнитных материалов магнитная проницаемость зависит от индукции, т. е. $\mu = f(B)$; зная эту зависимость для данного материала, можно определить напряженность поля H и построить кривую намагничивания $B = f(H)$ этого материала. Такие кривые показаны на рис. В-25.

Рассмотрим подробно способы определения н. с. каждого участка магнитной цепи.

2-3. Зазор. Кривая распределения индукции в зазоре

Зазор представляет собой основное сопротивление магнитному потоку, вследствие чего обычно н. с. зазора F_δ составляет не менее 60% от основной н. с. F_0. Поэтому точность расчета магнитного сопротивления зазора в значительной мере определяет точность расчета всей магнитной цепи. Для определения этого сопротивления и соответственно F_δ необходимо прежде всего нарисовать возможно более точную картину распределения магнитного поля в пространстве между полюсными наконечниками и якорем. Для этого обычно пользуются методом так называемых единичных магнитных трубок. Рассмотрим сначала наиболее простую конструкцию якоря — гладкий якорь и предположим, что его длина в осевом направлении весьма велика и что поэтому мы можем пренебречь влиянием торцевых частей якоря и полюсных наконечников. В этом случае можно считать, что картина распределения магнитного поля во всех сечениях, перпендикулярных оси машины, одна и та же и что, следовательно, мы можем изображать магнитные трубки поля в плоскости только какого-нибудь одного сечения (рис. 2-2).

Имея в виду обычные значения индукции в стали, принимаем, что ее проницаемость весьма велика и что, следовательно, поверхности якоря и полюсных наконечников являются поверхностями равного потенциала, которые должны пересекаться магнитными линиями в зазоре под прямым углом. Средняя линия, проведенная между полюсами через нейтральную точку на якоре, имеет по условиям симметрии тот же потенциал, что и поверхность якоря. При построении магнитного поля мы делим все пространство между равнопотенциальными поверхностями на единичные трубки с таким расчетом, чтобы *средняя ширина b_x каждой трубки была равна ее средней длине* δ_x. На рис. 2-2 все пространство между осевыми линиями северного и южного полюсов разделено примерно на $m = 7{,}5$ единичных трубок по $m/2 = 3{,}75$ трубок на каждую половину полюса. Если длина якоря l_a, то магнитная проводимость каждой такой трубки

$$\Lambda_{тр} = \mu_0 \frac{l_a b_x}{\delta_x} = \mu_0 l_a = \text{const},$$

т. е. *все единичные трубки*, построенные указанным выше способом, *имеют одинаковые магнитные проводимости*.

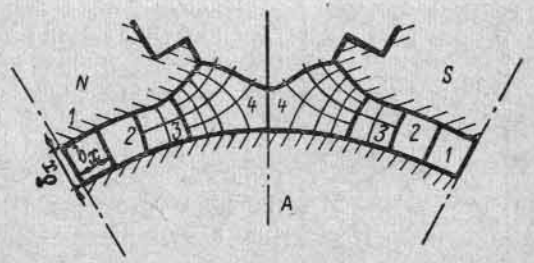


Рис. 2-2. Картина магнитного поля в зазоре машины с гладким якорем

Пусть $F_{\delta 0}$ — н. с. зазора для гладкого якоря, так как она действует между равнопотенциальными поверхностями, то для всех единичных трубок $F_{\delta 0} = \text{const}$. Следовательно,

$$\Phi_{тр} = F_{\delta 0}\Lambda_{тр} = F_{\delta 0}\mu_0 l_a,$$

т. е. *потоки всех элементарных трубок равны*. Тогда магнитный поток в зазоре может быть выражен в виде:

$$\Phi_0 = m\Phi_{тр} = mF_{\delta 0}\mu_0 l_a,$$

откуда

$$F_{\delta 0} = \frac{\Phi_0}{\mu_0 m l_a}. \qquad (2\text{-}5)$$

В картине поля на рис. 2-2 только трубки *1* и *2*, лежащие ближе к осевой линии полюса, представляют собой в сечении практически квадраты. Трубка *3* уже отступает от квадрата, а трубка *4* на краю полюсного наконечника представляет собой неправильный пятиугольник. Такая относительно грубая картина может служить для расчета лишь в первом приближении. Чтобы уточнить расчет, трубку *3* дополнительно делят на четыре частичные трубки, а трубку *4* — на 16 частичных трубок с соблюдением тех же условий, что и при построении единичных трубок. При делении единичных трубок на большое число частичных получаем сетку, делящую все рассматриваемое пространство (за исключением участков, граничащих с нейтральной зоной) практически на квадраты, вот почему такие картины поля часто называют квадратными.

Картина поля на рис. 2-2 позволяет определить наряду с н. с. $F_{\delta 0}$ распределение нормальной составляющей индукции в зазоре. Для этого достаточно разделить поток единичной трубки $\Phi_{тр} = F_{\delta 0}\mu_0 l_a$ на площадь ее среднего поперечного сечения $S_{трx} = b_{xcp}l_a = \delta_{xcp}l_a$ (так как поле разбито на квадраты), следовательно,

$$B_{\delta x} = \frac{\Phi_{тр}}{S_{трx}} = \frac{F_{\delta 0}\mu_0 l_a}{\delta_{xcp} l_a} = \mu_0 \frac{F_{\delta 0}}{\delta_{xcp}}. \qquad (2\text{-}6)$$

Таким образом, при заданном значении н. с. $F_{\delta 0}$ индукция $B_{\delta x}$ обратно пропорциональна средней длине трубки в зазоре. Пользуясь этим способом, можно построить кривую распределения индукции в зазоре вдоль развернутой окружности якоря (рис. 2-3). Следует отметить, что все построение ведется в известной мере «на глаз». Поэтому для большей точности нужно иметь несколько вариантов картин поля, чтобы можно было выбрать из них тот, при котором магнитная проводимость зазора и распределенный в нем поток имеют наибольшие значения.

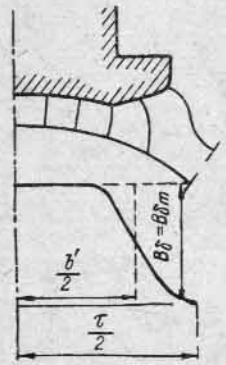


Рис. 2-3. Действительная и приведенная картины поля в зазоре в поперечном сечении гладкого якоря

2-4. Метод приведения. Расчетная полюсная дуга

Рассматривая кривую на рис. 2-3, мы видим, что индукция в зазоре изменяется по окружности якоря от точки к точке, достигая наибольшего значения $B_{\delta m}$ в области, прилегающей к середине полюса. Чтобы упростить расчет н. с. зазора $F_{\delta 0}$, не прибегая к построению кривых распределения индукции, вводят понятие о расчетной индукции в зазоре B_δ, пользуясь для этой цели методом приведения.

Сущность этого метода, широко применяемого в теории и расчете электрических машин, состоит в следующем. *Действительную, обычно физически сложную картину явления заменяют приведенной, которая должна, во-первых, иметь возможно простейший вид и, во-вторых, давать при расчете практически те же количественные результаты, что и действительная картина.*

В настоящем случае действительную трапецеидальную кривую распределения магнитной индукции в зазоре на полюсном делении заменяют прямоугольником с высотой $B_\delta = B_{\delta m}$ и основанием b', которое должно быть определено так, чтобы площади, ограничиваемые обеими кривыми, были равновелики. Основание b' называют расчетной полюсной дугой, а отношение

$$\alpha' = b'/\tau \qquad (2\text{-}7)$$

называют расчетным коэффициентом полюсной дуги.

Коэффициент α' — одна из важнейших в электромашиностроении величин. В машинах постоянного тока без добавочных полюсов $\alpha' = 0{,}7 \div 0{,}8$, в машинах с добавочными полюсами $\alpha' = 0{,}62 \div 0{,}72$.

2-5. Расчетная длина якоря

Произведенный выше расчет распределения поля в зазоре по окружности якоря основывался на предположении, что поля в плоскостях, перпендикулярных оси машины, по всей длине якоря одинаковы. В действительности следует учесть влияние торцевых частей, где происходит выпучивание магнитных линий, и наличие радиальных вентиляционных каналов (в машинах с радиальной системой вентиляции). Соответствующая картина распределения поля по длине якоря представлена на рис. 2-4. Здесь $l_м$ — длина полюса по оси машины; l_a — полная длина якоря, которую часто берут на несколько миллиметров больше $l_м$ для уменьшения потерь в стали торцевых частей якоря; $b_в$ — ширина вентиляционного канала. Если $n_в$ — число каналов, то длина якоря без каналов, т. е. длина пакетов, составляет:

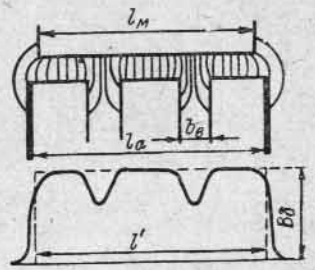


Рис. 2.4 Действительная и приведенная картины поля в зазоре в продольном сечении якоря

$$l = l_a - n_в b_в. \qquad (2\text{-}8)$$

Так же как выше, мы заменяем действительную кривую распределения индукции по длине якоря приведенным прямоугольником, имеющим высоту B_δ и площадь, равновеликую площади, охватываемой действительной кривой. Основание прямоугольника l' называется расчетной длиной якоря. С достаточной точностью можно считать, что

$$l' = 0{,}5(l_м + l). \qquad (2\text{-}9)$$

2-6. Н. с. зазора для гладкого якоря

Пользуясь установленными выше расчетными величинами B_δ: b' и l', мы можем выразить основной магнитный поток машины в виде,

$$\Phi_0 = B_\delta b' l' = B_\delta \alpha' \tau l'. \qquad (2\text{-}10)$$

Зная B_δ, можно определить н. с. зазора на пару полюсов для гладкого якоря [формулу (2-4)]:

$$F_{\delta 0} = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta. \qquad (2\text{-}11)$$

2-7. Н. с. зазора для зубчатого якоря

Обмотка якоря машин постоянного тока укладывается в пазы открытой или полузакрытой формы (см. рис. 3-23). Поэтому поле распределяется в зазоре неравномерно — оно сгущается над зубцами и разрежается над пазами (рис. 2-5). Вследствие большой густоты трубок над зубцами площадь поперечного сечения каждой трубки уменьшается, тогда как трубки, проходящие в зубец через паз сбоку, имеют относительно большое сечение, но зато проходят путь, длина которого значительно больше δ. В результате магнитное сопротивление зазора увеличивается. Мы можем учесть это увеличение сопротивле-

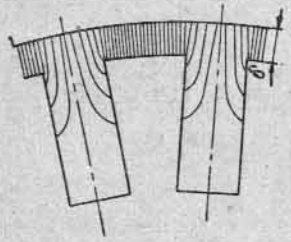


Рис. 2-5. Магнитная индукция в зазоре зубчатого якоря

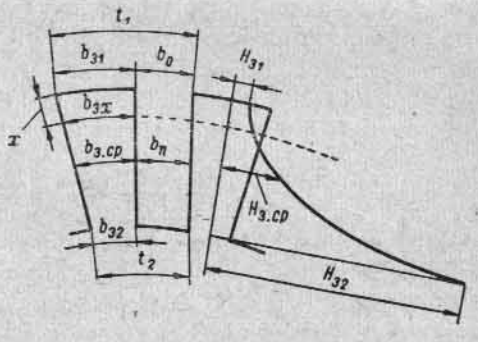


Рис. 2-6. Н. с. зубцов

ния, приведя зубчатый якорь к гладкому путем увеличения зазора до величины

$$\delta' = \delta k_\delta. \tag{2-12}$$

Величина δ′ называется расчетной величиной зазора, а коэффициент k_δ — коэффициентом зазора.

Коэффициент зазора определяется математическим путем и выражается в виде:

$$k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma\delta}. \tag{2-13}$$

Здесь t_1 — зубцовый шаг по окружности якоря; γ — сложная функция отношения b_0/δ, где b_0 — открытие паза (размеры t_1 и b_0 — см. рис. 2-6). С достаточным приближением можно считать, что

$$\gamma = \frac{(b_0/\delta)^2}{5 + (b_0/\delta)^2}. \tag{2-14}$$

Существует ряд эмпирических формул, позволяющих упростить расчет коэффициента k_δ. Наибольшее распространение имеет формула

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{з1} + 10\delta}, \tag{2-15}$$

где $b_{з1}$ — размер (ширина) верхней части зубца по окружности якоря (рис. 2-6).

Если при зубчатом якоре мы хотим иметь такой же поток в зазоре, как и при гладком, то нужно умножить н. с. зазора на коэффициент зазора. Таким образом,

$$F_\delta = F_{\delta 0} k_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta k_\delta \delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta'. \tag{2-16}$$

2-8. Ориентировочные данные

В машинах обычного исполнения индукция B_δ зависит от мощности машины, колеблясь в пределах 0,4 — 0,65 *тл* в машинах малой мощности (примерно до 10 *квт*) и достигая 1,0 — 1,05 *тл* в машинах большой мощности. Воздушный зазор имеет значения 0,7 — 3 *мм* для машин мощностью до 50 *квт* и достигает 10 *мм* в машинах большой мощности; коэффициент зазора $k_\delta = 1{,}05 \div 1{,}1$ для полузакрытых пазов якоря и $1{,}2 \div 1{,}3$ для открытых пазов.

2-9. Н. с. зубцовой зоны

Пройдя через зазор, поток Φ_0 вступает в зубцовую зону и здесь идет по двум параллельным путям — частью по зубцам, а частью по пазам. Соотношение между этими двумя частями потока зависит от соотношения между магнитными проводимостями зубца и паза. Так, например, если наибольшая индукция в зубце $B_{з2} \leqslant 1{,}8$ *тл*, то проводимость зубца так велика по сравнению с проводимостью паза, что можно пренебречь частью потока, ответвляющейся в паз, и считать, что поток идет только по зубцу. В этом случае расчет н. с. зубцов упрощается, но все же типичным остается случай, когда индукция $B_\delta > 1{,}8$ *тл* и когда мы уже не можем пренебречь частью потока, ответвляющейся в паз.

Расчет н. с. зубцов достаточно вести на один зубцовый шаг t_1, так как все зубцы проводят поток параллельно и находятся в одинаковых магнитных условиях на протяжении полюсной дуги b' соответственно прямоугольнику потока на рис. 2-3.

Рассчитаем н. с. зубцов для трапецеидального зубца (рис. 2-6).

Поток в зазоре на один зубцовый шаг

$$\Phi_t = B_\delta t_1 l'.$$

Проведем сечение концентрически с поверхностью якоря на расстоянии x от вершины зубца. Если $\Phi_{зx}$ и $\Phi_{пx}$ — потоки в зубце и в пазу, соответствующие этому сечению, то

$$\Phi_t = \Phi_{зx} + \Phi_{пx}.$$

Разделим обе части этого равенства на площадь зубца в том же сечении. Тогда

$$\frac{\Phi_t}{S_{зx}} = \frac{\Phi_{зx}}{S_{зx}} + \frac{\Phi_{пx}}{S_{зx}}. \tag{2-17}$$

Величину $\Phi_t/S_{зх}$ мы будем называть расчетной магнитной индукцией в зубце $B'_{зх}$, т. е. такой, которая имела бы место в данном сечении зубца, если бы поток Φ_t шел только по зубцу.

Первое слагаемое в правой части равенства (2-17) представляет собой действительную индукцию в зубце $B_{зх}$ в том же сечении зубца.

Второе слагаемое мы можем представить в виде:

$$\frac{\Phi_{пх}}{S_{зх}} = \frac{\Phi_{пх}}{S_п}\frac{S_п}{S_{зх}} = B_{пх}k_{зх} = \mu_0 H_{пх}k_{зх}.$$

Здесь $S_п$ — поперечное сечение паза, не зависящее при прямоугольном пазе от его высоты; $B_{пх}$ — индукция в данном сечении паза; $k_{зх} = S_п/S_{зх}$ — зубцовый коэффициент, определяемый только геометрическими размерами зубца и паза; $H_{пх}$ — напряженность магнитного поля в данном сечении паза.

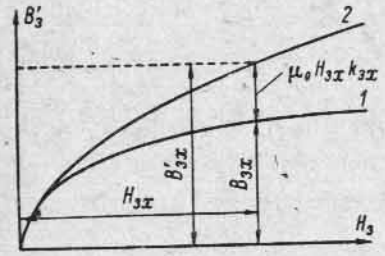


Рис. 2-7. Кривые $B'_з = f(H_з)$

Предположим, что цилиндрические поверхности, которыми мы пересекаем зубцы и пазы на различном расстоянии от вершины зубца (см., например штриховую линию на рис. 2-6), одновременно являются равнопотенциальными поверхностями. В этом случае падения магнитного напряжения по высоте зубца и паза равны и, следовательно, $H_{пх} = H_{зх}$. Тогда равенство (2-17) приобретает вид:

$$B'_{зх} = B_{зх} + \mu_0 H_{зх}k_{зх}. \qquad (2\text{-}18)$$

Чтобы воспользоваться этой формулой для расчета н. с. зубцов, поступают следующим образом. Строят кривую намагничивания для электротехнической стали данной марки (кривая *1* на рис. 2-7). Если известны размеры паза и зубца, то этим определяется коэффициент $k_{зх}$. Задавшись действительной индукцией в зубце $B_{зх}$ и определив по кривой *1* соответствующую ей величину $H_{зх}$, найдем произведение $\mu_0 H_{зх}k_{зх}$ и затем по формуле (2-18) расчетную индукцию в зубце $B'_{зх}$. Проделав такой расчет для ряда индукций $B_{зх}$, мы можем построить (рис. 2-7) кривую *2*, представляющую собой зависимость $B'_{зх} = f(H_{зх})$ для данного значения коэффициента $k_{зх}$.

Ряд таких кривых для электротехнической стали марок Э11, Э12 и Э21 и для значений $k_{зх}$ в пределах от 0 до 2,4 построен на рис. 2-8.

Имея эти кривые, мы можем использовать их в обратном порядке, а именно: сначала определить для данного сечения зубца расчетную индукцию $B'_{зх}$ и зубцовый коэффициент $k_{зх}$, а затем по соответствующей кривой на рис. 2-8 действительную индукцию $B_{зх}$ и напряженность поля $H_{зх}$.

Согласно сказанному выше, расчетные индукции определяются из условия, что поток идет только по зубцу.

Следовательно,

$$\Phi_{зх} = \Phi_t \quad \text{или} \quad B'_{зх}b_{зх}lk_c = B_\delta t_1 l',$$

откуда

$$B'_{зх} = B_\delta \frac{t_1 l'}{b_{зх}lk_c}. \qquad (2\text{-}19)$$

Здесь $b_{зх}$ — ширина зубца в данном сечении; l — длина всех пакетов якоря и k_c — коэффициент заполнения пакетов сталью, учитывающий изоляцию листов стали, т. е. представляющий собой отношение

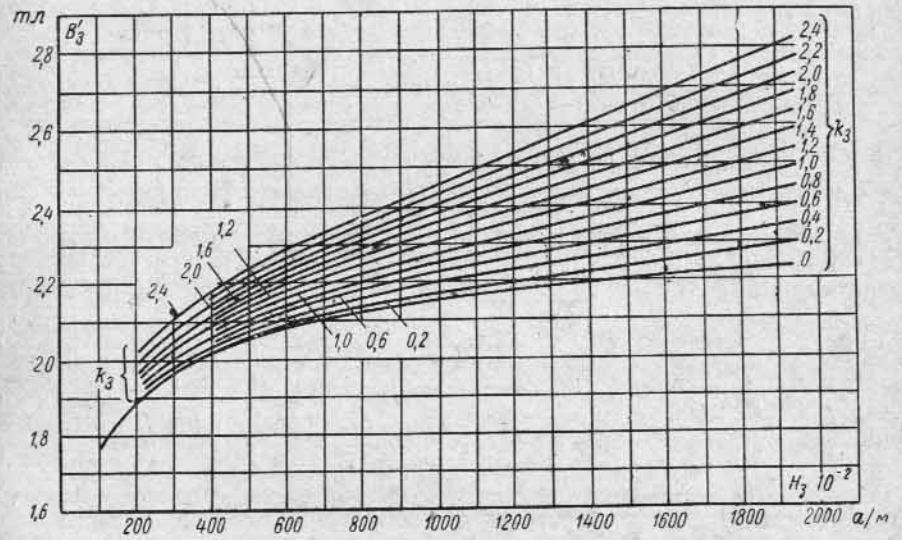


Рис. 2-8. Кривые $B'_з = f(H_з)$ для листовой стали марок Э11, Э12 и Э21

длины только стали пакета ко всей длине пакета. Для листов стали толщиной 0,5 *мм*, оклеенных бумагой, $k_c = 0{,}88 \div 0{,}90$; для лакированных листов $k_c = 0{,}91 \div 0{,}93$.

Зубцовый коэффициент определяется по формуле:

$$k_{зх} = \frac{S_п}{S_{зх}} = \frac{S_{tx} - S_{зх}}{S_{зх}} = \frac{t_x l'}{b_{зх}lk_c} - 1. \qquad (2\text{-}20)$$

Если мы рассчитаем по формуле (2-19) индукцию $B'_{зх}$ для ряда точек по высоте зубца, а затем определим соответствующие им значения $H_{зх}$ по кривым на рис. 2-8, то получим зависимость $H_{зх} = f(x)$, имеющую параболический характер (см. рис. 2-6).

Для практических целей достаточно взять только три точки по высоте зубца — в верхнем, нижнем и среднем его сечении. Исходя

из размеров на рис. 2-6, имеем:

$$B'_{з1} = B_\delta \frac{t_1 l'}{b_{з1} l k_c}; \qquad (2\text{-}21а)$$

$$B'_{з.\,ср} = B_\delta \frac{t_1 l'}{b_{з.\,ср} l k_c}; \qquad (2\text{-}21б)$$

$$B'_{з2} = B_\delta \frac{t_1 l'}{b_{з2} l k_c}. \qquad (2\text{-}21в)$$

Для этих же сечений находим зубцовые коэффициенты и по кривым на рис. 2-8 определяем напряженности поля $H_{з1}$, $H_{з.\,ср}$ и $H_{з2}$.

Расчетное значение напряженности поля $H_з$ находим по формуле Симпсона как среднее для параболической кривой на рис. 2-6:

$$H_з = \frac{1}{6}(H_{з1} + 4H_{з.\,ср} + H_{з2}). \qquad (2\text{-}22)$$

Если $h_з$ — высота зубца, то н. с. зубцов на пару полюсов будет

$$F_з = 2H_з h_з. \qquad (2\text{-}23а)$$

Часто для упрощения расчета определяют индукцию и соответственно напряженность поля только в одном сечении, находящемся на расстоянии $h_з/3$ от основания зубца. В этом случае

$$F_з = 2H_{з\,1/3} h_з. \qquad (2\text{-}23б)$$

В машинах постоянного тока индукция $B_{з2} = 1{,}8 \div 2{,}3$ *тл*, (18 000 — 23 000 *гс*), но в некоторых случаях, как, например, в тяговых двигателях, она доходит до 2,6 *тл* и выше.

2-10. Н. с. спинки якоря

Поток в спинке якоря распределяется неравномерно по ее высоте: в поперечном сечении якоря наибольшая индукция наблюдается в точках, ближайших к зубцу, т. е. у наружной поверхности спинки, а наименьшая — у ее внутренней поверхности. Но разница между этими индукциями обычно невелика, поэтому при практических расчетах исходят из среднего значения индукции в спинке якоря B_a. Так как поток в спинке якоря $\Phi_a = \Phi_0/2$ (см. табл. 2-1) и площадь поперечного сечения спинки $S_a = h_a l k_c$, где h_a — высота спинки (см. рис. 2-1), то

$$B_a = \frac{\Phi_0}{2S_a} = \frac{\Phi_0}{2h_a l k_c}. \qquad (2\text{-}24)$$

По кривой намагничивания для стали данной марки находим напряженность поля H_a. Тогда н. с. спинки якоря

$$F_a = H_a L_a, \qquad (2\text{-}25)$$

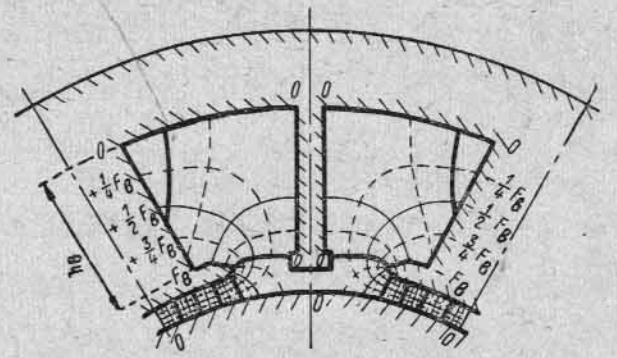
где L_a — длина средней магнитной линии в стали спинки.

Обычно индукция B_a выбирается в пределах от 1,0 до 1,5 *тл*.

2-11. Н. с. полюсов и ярма

Ход расчета н. с. для этих участков магнитной цепи тот же, что и для якоря, но при этом нужно учесть, что поток этих участков больше основного на величину потока рассеяния Φ_σ, возникающего в пространстве между полюсами и в торцевых частях полюсов.

На рис. 2-9 изображена картина магнитного поля в машине с гладким якорем и добавочными полюсами при холостом ходе машины. Картина построена по такому же методу единичных трубок, как и картина поля в зазоре на рис. 2-2. Для упрощения построения считаем, что обмотка возбуждения каждого полюса равномерно распределена в тонком слое по высоте $h_в$ полюсного сердечника и, следовательно,


0
0
0

тов согласно сказанному выше (см. § 2-3). Поток рассеяния в пространстве между полюсами определяется по формуле, аналогичной формуле (2-5), а именно:

$$\Phi_{\sigma 1} = \mu_0 m_\sigma l_м F_0,$$

где m_σ — число единичных трубок потока рассеяния; $l_м$ — длина полюсного сердечника в осевом направлении.

На рис. 2-10 изображена картина поля рассеяния в торцевой части полюса. Подсчет потока рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ торцевых частей производится аналогично. Весь поток рассеяния представляет собой сумму потоков $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, т. е.

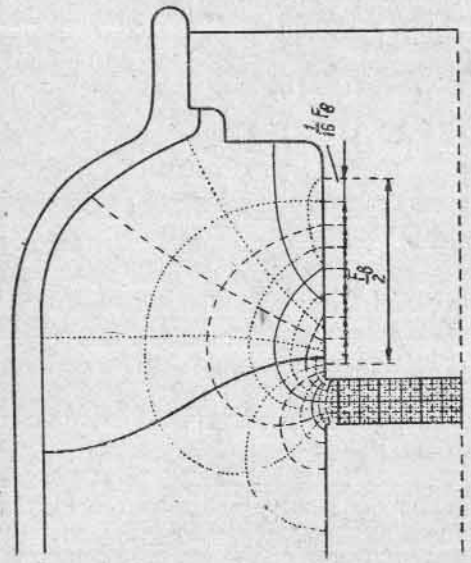


Рис. 2-10. Поле и равнопотенциальные поверхности торцевой части полюса машины постоянного тока

$$\Phi_\sigma = \Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2}.$$

В обычных условиях для упрощения принимают, что поток полюса в любом сечении по его длине составляет

$$\Phi_м = \Phi_0 + \Phi_\sigma = k_\sigma \Phi_0. \quad (2\text{-}26)$$

Соответственно поток в ярме

$$\Phi_я = \frac{\Phi_м}{2} = \frac{1}{2} k_\sigma \Phi_0. \quad (2\text{-}27)$$

Если геометрические размеры полюсного сердечника и ярма заданы, то средние индукции на этих участках определяются по формулам:

$$B_м = \Phi_м / S_м \quad (2\text{-}28а)$$

и

$$B_я = \Phi_м / (2S_я). \quad (2\text{-}28б)$$

Обычно $B_м = 1{,}2 \div 1{,}6$ *тл* и $B_я = 0{,}8 \div 1{,}4$ *тл*, если ярмо выполнено из стали, и составляет примерно половину этих величин, если ярмо выполнено из чугуна.

Взяв по кривым намагничивания напряженности поля $H_м$ и $H_я$ соответственно индукциям $B_м$ и $B_я$, находим н. с. полюсов и ярма:

$$F_м = 2H_м h_м \quad (2\text{-}29а)$$

и

$$F_я = H_я L_я. \quad (2\text{-}29б)$$

Размеры $h_м$ и $L_я$ — см. рис. 2-1.

Следует заметить, что точное определение коэффициента рассеяния отнимает много времени; поэтому при практических расчетах им чаще всего задаются на основании имеющегося опыта в соответствии с данными табл. 2-2.

Таблица 2-2

$2p$	Диаметр якоря D_a, *см*	k_σ
4	До 25	1,28
>4	25—75	1,25
>4	75—150	1,20
>4	>150	1,15

2-12. Кривая намагничивания машины

Зная н. с. отдельных участков магнитной цепи, можем определить н. с. на пару полюсов по формуле (2-4).

Будем считать, что номинальному значению напряжения и номинальной скорости вращения машины соответствует номинальное значение основного потока $\Phi_0 = 1$. Задавшись рядом значений основного потока, например 0,5; 0,8; 1,1 и 1,2, можем для каждого из них рассчитать F_0. Зависимость $\Phi_0 = f(F_0)$, построенная в прямоугольных координатах (рис. 2-11), называется кривой намагничивания машины. Тут же можно построить кривые для участков магнитной цепи.

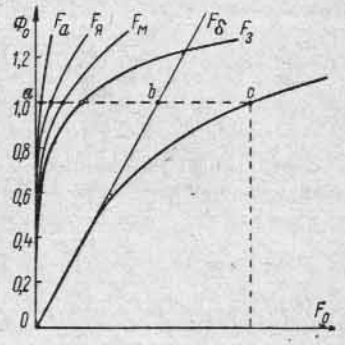


Рис. 2-11. Кривые намагничивания машины

В начальной части кривая намагничивания имеет практически прямолинейный характер, так как при малых значениях потока Φ_0 сталь машины слабо насыщена и главное значение имеет н. с. зазора. Продолжив прямолинейную часть кривой, получим зависимость $F_\delta = f(\Phi_0)$. Для значения $\Phi_0 = 1$ н. с. F_δ выражается отрезком ab на рис. 2-11.

По мере увеличения потока Φ_0 все бóльшая часть н. с. необходима для проведения потока по стали. Для того же значения потока $\Phi_0 = 1$ эта часть н. с. определяется отрезком bc. По отношению

$$k_\mu = F_0 / F_\delta = ac/ab,$$

называемому коэффициентом насыщения, можно судить о степени насыщения магнитной цепи машины при заданном значении потока Φ_0. В машинах нормального исполнения $k_\mu = 1{,}10 \div 1{,}35$. Из последующего (см. гл. 8) мы узнаем, что степень насыщения оказывает большое влияние на свойства машины и характер ее работы.

2-13. Численный пример

Рассчитаем н. с. F_0, необходимую для создания магнитного потока Φ_0 в машине постоянного тока типа ПН-290, продольный и поперечный разрезы которой представлены на рис. 1-6. Считаем, что машина работает генератором при номинальных условиях нагрузки.

Основные данные машины: номинальная мощность $P_н = 23$ *квт*; номинальное напряжение $U_н = 230$ *в*; номинальный ток $I_н = 100$ *а*; номинальная скорость вращения $n = 970$ *об/мин*; число полюсов $2p = 4$; наружный диаметр якоря $D_a = 295$ *мм*; внутренний диаметр якоря $D_{авн} = 70$ *мм*; длина якоря $l_a = 140$ *м*; число пазов якоря $Z = 33$; число проводников в пазу $s_п = 16$; обмотка — простая волновая; $a = 1$, с одной мертвой секцией; размеры паза: $b_п = 10{,}8$ *мм*, $h_п \mp h_з = 36{,}2$ *мм*; зазор под основными полюсами $\delta = 2$ *мм*; размеры основного полюса: длина в осевом направлении $l_м = 135$ *мм*; ширина в поперечном направлении $b_м = 100$ *мм*; высота в радиальном направлении, включая полюсный

наконечник, $h_м = 113{,}5\ мм$; расчетный коэффициент полюсной дуги $\alpha' = 0{,}65$; сечение ярма (приближенно) $S_я = 28 \times 290\ мм^2 = 78{,}4 \cdot 10^{-4}\ м^2$. Сердечники полюсов выполнены из стали марки Э11, сердечник якоря — из стали марки Э12.

По данным размерам якоря и паза определяем (см. рис. 2-1 и 2-6.):

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} = \frac{\pi \cdot 295}{4} = 232\ мм; \quad t_1 = \frac{\pi D_a}{Z} = \frac{\pi \cdot 295}{33} = 28{,}1\ мм;$$

$$b_{з1} = t_1 - b_п = 28{,}1 - 10{,}8 = 17{,}3\ мм;$$

$$t_2 = \frac{\pi (D_a - 2h_з)}{Z} = \frac{\pi (295 - 2 \cdot 36{,}2)}{33} = 21{,}2\ мм;$$

$$b_{з2} = 21{,}2 - 10{,}8 = 10{,}4\ мм;$$

$$t_{ср} = \frac{1}{2}(t_1 + t_2) = \frac{1}{2}(28{,}1 + 21{,}2) = 24{,}7\ мм;$$

$$b_{з.\,ср} = t_{ср} - b_п = 24{,}7 - 10{,}8 = 13{,}9\ мм.$$

Так как машина имеет осевую систему вентиляции, то можно считать, что средняя длина якорной и полюсной систем

$$l' = \frac{l_a + l_м}{2} = \frac{140 + 135}{2} = 137{,}5\ мм.$$

Расчет проведем в единицах СИ и параллельно в смешанной системе единиц. Принимая падение напряжения в якорной цепи $\Delta U = 0{,}08 U_н = 19\ в$, определим э. д. с. $E_0 = U_н + \Delta U = 249\ в$. Для получения такой э. д. с. необходим поток Φ_0 [см. формулу (3-29)]:

$$\Phi_0 = \frac{E_0 a}{pnN} = \frac{249 \cdot 1}{2 \cdot 16{,}15 \cdot 524} = 1{,}47 \cdot 10^{-2}\ вб = 1{,}47 \cdot 10^6\ мкс,$$

где

$$n = 970/60 = 16{,}15\ об/сек;$$

$$N = Zs_п - 2w_s = 33 \cdot 16 - 2 \cdot 2 = 524.$$

По формуле (2-10) находим:

$$B_\delta = \frac{\Phi_0}{\alpha' \tau l'} = \frac{1{,}47 \cdot 10^{-2}}{0{,}65 \cdot 232 \cdot 10^{-3} \cdot 137{,}5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}71\ тл$$

или

$$B_\delta = \frac{\Phi_0}{\alpha' \tau l'} = \frac{1{,}47 \cdot 10^6}{0{,}65 \cdot 232 \cdot 10^{-1} \cdot 137 \cdot 5 \cdot 10^{-1}} = 7100\ гс.$$

Коэффициент зазора определяем по формуле (2-15):

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{з1} + 10\delta} = \frac{28{,}1 + 10 \cdot 2}{17{,}3 + 10 \cdot 2} = 1{,}29.$$

Тогда н. с. зазора по формуле (2-16) будет

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} 0{,}71 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}29 =$$

$$= \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-1}} 7100 \cdot 2 \cdot 10^{-1} \cdot 1{,}29 = 2920\ а.$$

Для определения индукций в зубцах принимаем коэффициент заполнения пакета сталью $k_с = 0{,}9$, тогда по формуле (2-21а) находим:

$$B_{з1} = \frac{B_\delta t_1 l'}{k_с b_{з1} l} = \frac{0{,}71 \cdot 28{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 137{,}5 \cdot 10^{-3}}{0{,}9 \cdot 17{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 137{,}5 \cdot 10^{-3}} = 1{,}28\ тл = 12\,800\ гс.$$

Индукция по высоте зубца изменяется обратно пропорционально ширине зубца, соответственно имеем:

$$B'_{з.\,ср} = B'_{з1} \frac{b_{з1}}{b_{з.\,ср}} = 1{,}28 \frac{17{,}3}{13{,}9} = 1{,}60\ тл = 16\,000\ гс;$$

$$B'_{з2} = B'_{з1} \frac{b_{з1}}{b_{з2}} = 1{,}28 \frac{17{,}3}{10{,}4} = 2{,}14\ тл = 21\,400\ гс.$$

Таблица 2-3

Параметр	E_0, в				
	115	200	230	249	276
Φ_0, *вб*	$0{,}68 \cdot 10^{-2}$	$1{,}18 \cdot 10^{-2}$	$1{,}36 \cdot 10^{-2}$	$1{,}47 \cdot 10^{-2}$	$1{,}63 \cdot 10^{-2}$
B_δ, *тл*	0,338	0,572	0,657	0,710	0,790
F_δ, *а* при $k_\delta = 1{,}29$	1350	2350	2700	2920	3240
$B_{з1}$, *тл*	0,61	1,03	1,18	1,28	1,42
$B_{з\,ср}$, *тл*	0,76	1,29	1,48	1,60	1,78
$B_{з2}$, *тл*	0,89	1,72	1,98	2,14	2,38
$H_{з1} \cdot 10^{-2}$, *а/м* при $k_{з1} = 0{,}80$	1,5	5,5	8,0	11,0	18,0
$H_{з.\,ср} \cdot 10^{-2}$, *а/м* при $k_{з.\,ср} = 0{,}97$	3	11	24	50	100
$H_{з2} \cdot 10^{-2}$, *а/м* при $k_{з2} = 1{,}26$	4	90	230	500	1200
$H_з \cdot 10^{-2}$, *а/м*	3	23,2	55,6	119	270
$F_з$, *а*	22	168	403	860	1955
B_a, *тл*	0,35	0,61	0,70	0,76	0,84
$H_a \cdot 10^{-2}$, *а/м*	—	1,5	2,6	3,0	3,5
F_a, *а*	—	18	30	35	40
$\Phi_м$, *вб* при $\sigma = 1{,}25$	$0{,}84 \cdot 10^{-2}$	$1{,}47 \cdot 10^{-2}$	$1{,}69 \cdot 10^{-2}$	$1{,}83 \cdot 10^{-2}$	$2{,}03 \cdot 10^{-2}$
$B_м$, *тл*	0,63	1,09	1,26	1,36	1,51
$H_м \cdot 10^{-2}$, *а/м*	2,2	6,5	10	14	27
$F_м$, *а*	50	148	227	318	614
$B_я$, *тл*	0,54	0,94	1,08	1,17	1,30
$H_я \cdot 10^{-2}$, *а/м*	4,3	8,5	10	12	16
$F_я$, *а*	187	370	435	522	695
F_0, *а*	1607	3054	3795	4655	6544
i_0, *а*	0,643	1,22	1,52	1,86	2,62

По кривым для стали Э12 на рис. В-25 находим $H_{з1} \cdot 10^{-2} = 11\ а/м$ и $H_{з.\,ср} \cdot 10^{-2} = 50\ а/м$. По формуле (2-20) определяем коэффициент $k_{з2} = 1{,}26$ и по соответствующей кривой на рис. 2-8 находим $H_{з2} \cdot 10^{-2} = 500\ а/м$. Так как $h_з = h_п = 3{,}62\ см$, то по формулам (2-22) и (2-23) получаем для $E_0 = 249\ в$:

$$H_з \cdot 10^{-2} = \frac{1}{6}(H_{з1} + 4H_{з.\,ср} + H_{з2}) = \frac{1}{6}(11 + 4 \cdot 50 + 500) = 119\ а/м$$

и

$$F_з = 2H_з h_з = 2 \cdot 119 \cdot 3{,}62 = 860\ а.$$

Высота спинки якоря

$$h_a = \frac{D_a - 2h_з - D_{a\,вн}}{2} = \frac{295 - 2\cdot 36\cdot 2 - 70}{2} = 76{,}3\ мм.$$

Индукция в спинке якоря по формуле (2-24)

$$B_a = \frac{\Phi_0}{2h_a l k_c} = \frac{147\cdot 10^{-2}}{2\cdot 76{,}3\cdot 10^{-3}\cdot 140\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}9} = 0{,}76\ тл = 7600\ гс.$$

Соответствующая этой индукции напряженность магнитного поля $H_a\cdot 10^{-2} = 3$ *а/м*. Длину средней магнитной линии в спинке якоря определяем как $^1/_4$ окружности, имеющей диаметр $D_a - 2h_з - h_a = 29{,}5 - 2\cdot 3{,}62 - 7{,}63 = 14{,}63$ *см*; следовательно,

$$L_a = \frac{\pi\cdot 14{,}63}{4} = 11{,}5\ см$$

и

$$F_a = 3\cdot 11{,}5 \approx 35\ а.$$

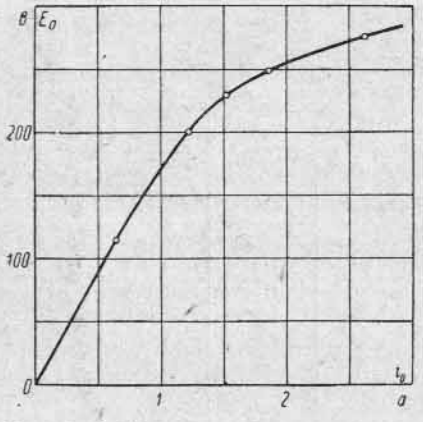


Рис. 2-12. Характеристика холостого хода генератора ПН-290

Чтобы определить н. с. полюса и ярма, задаемся коэффициентом рассеяния $k_\sigma = 1{,}25$ (см. табл. 2-2); тогда

$$\Phi_м = k_\sigma \Phi_0 = 1{,}25\cdot 1{,}47\cdot 10^{-2} = 1{,}83\cdot 10^{-2}\ вб = 1{,}83\cdot 10^6\ мкс.$$

Индукция в сердечнике полюса

$$B_м = \frac{\Phi_м}{S_м} = \frac{1{,}83\cdot 10^{-2}}{135\cdot 10^{-3}\cdot 100^{-3}} = 1{,}36\ тл = 13\,600\ гс.$$

По кривой для стали Э11 на рис. В-25 находим $H_м\cdot 10^{-2} = 14$ *а/м*, тогда $F_м = 2H_м h_м = 2\cdot 14\cdot 11{,}35 = 318\ а$.

Для ярма имеем:

$$B_я = \frac{\Phi_м}{2S_я} = \frac{1{,}83\cdot 10^{-2}}{2\cdot 78{,}4\cdot 10^{-4}} = 1{,}17\ тл = 11\,700\ гс.$$

Соответственно для литой стали $H_я\cdot 10^{-2} = 12$ *а/м*. Длину $L_я$ средней магнитной линии в ярме определяем как $^1/_4$ окружности, имеющей диаметр

$$D_a + 2\delta + 2h_м + h_я = 295 + 2\cdot 2 + 2\cdot 113{,}5 + 28 = 554\ мм = 55{,}4\ см.$$

Следовательно,

$$L_я = \frac{\pi\cdot 55{,}4}{4} = 43{,}5\ см \quad и \quad F_я = H_я L_я = 12\cdot 43{,}5 = 522\ а.$$

Н. с. на пару полюсов, необходимая для создания основного потока $\Phi_0 = 1{,}47\cdot 10^{-2}$ *вб*, составляет

$$F_0 = F_\delta + F_з + F_a + F_м + F_я = 2920 + 860 + 35 + 318 + 522 = 4655\ а.$$

Шунтовая обмотка возбуждения имеет на полюс 1250 витков круглого провода диаметром $d = 1$ *мм*, сечением $s_0 = 0{,}785$ *мм*, поэтому ток возбуждения будет

$$i_0 = \frac{4655}{1250\cdot 2} = 1{,}86\ а.$$

Плотность тока в обмотке возбуждения получается равной

$$j_0 = \frac{i_0}{s_0} = \frac{1{,}86}{0{,}785} = 2{,}38\ а/мм^2.$$

Подобным же образом рассчитываются токи возбуждения для других напряжений (табл. 2-3), после чего может быть построена кривая зависимости э. д. с. E_0 от тока возбуждения i_0 машины, представленная на рис. 2-12.

Глава третья

ОБМОТКИ И Э. Д. С. ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

[30 а, 33, 63, 73, 74]

3-1. Предварительные замечания

Обмотка якоря является важнейшим элементом машины, поскольку при ее непосредственном участии происходит процесс преобразования энергии одного вида в энергию другого вида. В соответствии с этим к обмотке предъявляются разнородные и часто противоречивые требования, из числа которых наибольшее значение имеют следующие: а) обмотка должна быть выполнена с наилучшим использованием материала как по весу, так и в отношении к. п. д.; б) обмотка должна обеспечить необходимую механическую, термическую и электрическую прочность машины соответственно обычному эксплуатационному сроку службы машины (16—20 лет); в) в машинах постоянного тока должны быть обеспечены удовлетворительные условия токосъема с коллектора (отсутствие вредного искрения).

Мы начнем изучение обмоток якоря машины постоянного тока с кольцевых обмоток, хотя в настоящее время применяются только барабанные обмотки. Это объясняется тем, что между кольцевыми и барабанными обмотками нет большой разницы в отношении рассмотрения основных процессов при работе машин постоянного тока, но кольцевая обмотка, будучи менее совершенной технически, в то же время гораздо проще барабанной. Это позволяет изучить сущность обмотки сначала на простейших типах кольцевых обмоток, а затем уже перейти к изучению более сложных барабанных обмоток, так как опыт показывает, что при первоначальном знакомстве с обмотками якорей машин постоянного тока такая последовательность является целесообразной.

Выше было уже сказано (см. § 1-3), что в обмотке якоря машины постоянного тока наводится переменная э. д. с. Для анализа этой э. д. с. мы строим звезды векторов э. д. с. и потенциальные многоугольники, или полигоны э. д. с. Этот метод используется и при изучении обмоток машин переменного тока и, следовательно, имеет весьма важное значение в теории электрических машин. Во многих случаях он является единственным надежным средством для того, чтобы разобраться в сложной сущности обмотки и составить себе отчетливое представление о наводимых в ней э. д. с.

При изложении кольцевых обмоток мы не будем касаться вопросов их технологии, так как в настоящее время с этой точки зрения они не представляют интереса.

3-2. Классификация обмоток якорей машин постоянного тока

Независимо от типа якоря (кольцевой или барабанный) мы имеем следующие типы обмоток якоря машин постоянного тока: а) простая петлевая; б) простая волновая; в) сложная петлевая; г) сложная волновая.

Простые обмотки образуют всегда только одну замкнутую на себя систему проводников, тогда как сложные обмотки могут образовать и одну и несколько таких систем. В первом случае будем называть сложную обмотку однократнозамкнутой, во втором — многократнозамкнутой.

В первый период развития машины постоянного тока приобрели некоторое значение так называемые разомкнутые обмотки, но в настоящее время они имеют только исторический интерес.

3-3. Принцип выполнения простых обмоток кольцевого якоря и их основные характеристики

Основным элементом любой обмотки якоря машины постоянного тока является секция.

> **Секцией называется часть обмотки якоря, состоящего из одного, двух или в общем случае нескольких витков и присоединенная к двум коллекторным пластинам, следующим друг за другом по схеме обмотки.**

Для простоты будем изображать только одновитковые секции.

На рис. 3-1 показаны три секции простой петлевой обмотки, характеризуемой тем, что *начало и конец каждой секции присоединяются к двум рядом лежащим коллекторным пластинам*, например секции *1* — к пластинам *1* и *2*, секции *2* — к пластинам *2* и *3* и т. д. Чтобы выполнить обмотку в виде замкнутой на себя системы, *начало каждой последующей секции присоединяют к концу предыдущей*. Например, к пластине *2* присоединяются конец секции *1* и начало секции *2*, к пластине *3* — конец секции *2* и начало секции *3* и т. д. Проводник, соединяющий обмотку с коллектором, подводится к середине коллекторной пластины, откуда и производится счет коллекторных делений. Здесь и в дальнейшем изложении будем понимать под коллекторным делением ширину одной коллекторной пластины с изоляцией, отделяющей ее от соседней пластины.

> **Расстояние $y_к$ между делениями коллектора, к которым присоединена секция, измеренное числом коллекторных делений, называется шагом обмотки по коллектору или просто коллекторным шагом.**

Мы видим, что в простой петлевой обмотке шаг по коллектору равен одному коллекторному делению, т. е.

$$y_к = 1. \qquad (3\text{-}1)$$

На рис. 3-2 показаны секции *1*, *6*, *11* и *2* простой волновой обмотки; она характеризуется тем, что при ее выполнении мы обходим якорь и соответственно коллектор, укладывая на якоре под каждой парой полюсов одну секцию, а по коллектору делая шаг $y_к$. Основное условие, которому должна удовлетворять простая волновая обмотка, состоит в том, что *после одного обхода якоря и соответственно коллектора мы должны прийти к коллекторному делению, лежащему рядом с исходным, налево или направо от последнего*. Если машина имеет p пар полюсов и коллектор состоит из K коллекторных

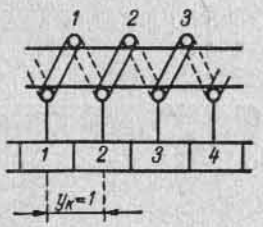


Рис. 3-1. Секция простой петлевой обмотки кольцевого якоря

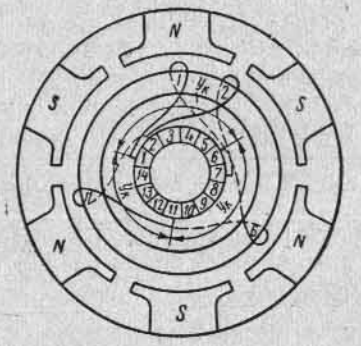


Рис. 3-2. Одновитковые секции простой волновой обмотки кольцевого якоря

делений, то при одном обходе мы укладываем на якоре p секций, а по коллектору сдвигаемся на $py_к$ коллекторных делений. Согласно условию,

$$py_к = K \mp 1,$$

откуда

$$y_к = \frac{K \mp 1}{p}. \qquad (3\text{-}2)$$

Пусть, например, в машине на рис. 3-2 $p = 3$ и $K = 14$, тогда

$$y_к = \frac{14 + 1}{3} = 5.$$

Предположим, что первую секцию мы укладываем под серединой северного полюса и делаем первый шаг $y_к = 5$, соединив деление *1* с делением $1 + 5 = 6$. Вторую секцию, следующую за первой по схеме обмотки, укладываем приблизительно под серединой второго северного полюса, делаем по коллектору второй шаг $y_к = 5$ и соединяем деление *6* с делением $6 + 5 = 11$. Наконец, третью секцию, следующую за второй по схеме обмотки, укладываем приблизительно под серединой третьего северного полюса и, сделав по коллек-

тору третий шаг $y_к = 5$, приходим к делению $11 + 5 = 16 - 14 = 2$, которое лежит рядом с исходным и переходит за него на одно деление коллектора. Но если бы мы имели $p = 3$ и $K = 16$, то получили бы прежний шаг $y_к = 5$, не дойдя на одно деление коллектора до первого:

$$y_к = \frac{16 - 1}{3} = 5.$$

Сопоставляя между собой секции простой петлевой и волновой обмоток (рис. 3-1 и 3-2), мы видим, что основная разница между ними заключается в том, что в первой из них шаг $y_к = 1$, т. е. значительно меньше полюсного деления, а во второй шаг $y_к \approx K/p$, т. е. равен приблизительно двойному полюсному делению, измеренному числом коллекторных делений.

Так как независимо от типа обмотки к каждой пластине присоединяется конец одной секции и начало следующей за нею секции, то, следовательно, каждой секции обмотки якоря соответствует одно деление коллектора. Если число секций S, а число делений коллектора K, то

$$S = K. \qquad (3\text{-}3)$$

Установленные здесь зависимости (3-1), (3-2) и (3-3) для простых обмоток кольцевого якоря распространяются полностью и на простые обмотки барабанного якоря.

3-4. Простая петлевая обмотка кольцевого якоря

Выполнение простой петлевой обмотки на кольцевом якоре весьма просто. Пусть, например, $2p = 4$ и $S = K = 14$ (рис. 3-3, *а*, *б*). Расположим секции равномерно по окружности якоря и перенумеруем их в последовательном порядке, идя в каком-нибудь направлении, например по вращению часовой стрелки. Присоединим начало секции *1* к пластине, которую обозначим тоже цифрой *1*, и перенумеруем коллекторные пластины в той же последовательности, что и секции якоря. Чтобы выполнить простую петлевую обмотку, достаточно соединить между собой все 14 секций последовательно в порядке их расположения на якоре, каждый раз при укладке секции делая по коллектору шаг $y_к = 1$.

При вращении такой обмотки в магнитном поле, созданном основными полюсами, в ней наводится э. д. с. Чтобы выяснить характер этого процесса, сначала рассмотрим э. д. с. одной секции.

Отличительная особенность секции кольцевого якоря та, что она имеет только одну активную сторону, расположенную на наружной поверхности якоря, тогда как другая сторона секции, расположенная во внутренней полости якоря, является неактивной, поскольку в этой полости магнитного потока нет. На этом основании мы можем говорить об э. д. с., имея в виду э. д. с. только одной активной стороны секции.

Выше (см. рис. 2-3) мы видели, что кривая распределения магнитной индукции в зазоре под полюсом имеет характер, близкий к трапецеидальному, причем мы заменили ее расчетным прямоугольником. На рис. 3-4 показаны два прямоугольника соответственно одной паре полюсов. Мы можем разложить их в ряд гармонических, состоящий из основной, или первой, гармонической и высших гармонических (на рис. 3-4 показаны пятая и седьмая гармонические). Пренебрегая

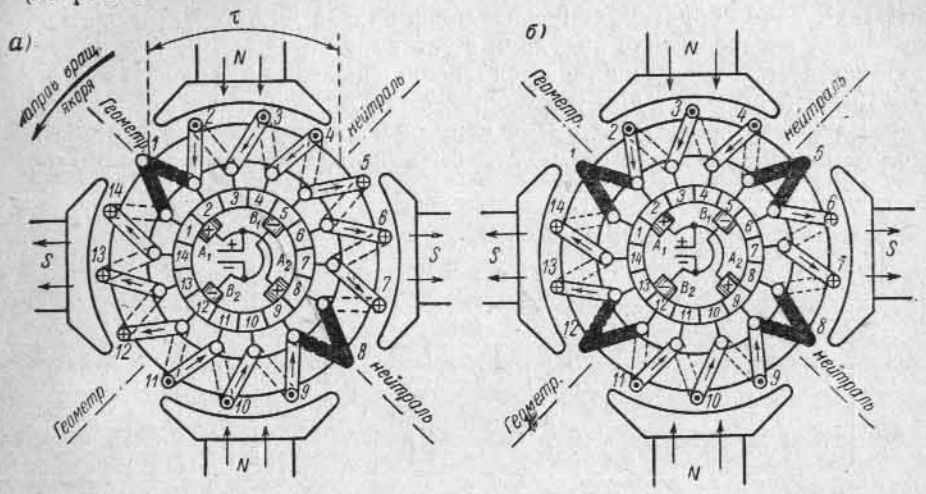


Рис. 3-3. Радиальная схема простой петлевой обмотки кольцевого якоря: $2p = 4$; $S = K = 14$

высшими гармоническими, можно считать, что индукция в зазоре под полюсами распределена синусоидально. В этом случае каждой паре полюсов, т. е. двойному полюсному делению по окружности якоря 2τ, соответствует одна полная синусоида кривой распределения индукции в зазоре. Если машина имеет p пар полюсов, то по окружности якоря размещается p синусоид. Машина на рис. 3-3 имеет $p = 2$, следовательно, по окружности якоря распределяются две волны синусоиды магнитной индукции (рис. 3-5, *а*). В угловом измерении полная синусоида соответствует 2π радианам или 360 градусам. Таким образом, окружность якоря, соответствующая геометрически углу 2π или 360°, в электрическом отношении соответствует углу $p \cdot 2\pi$ или $p \cdot 360°$. На этом основании углы $p \cdot 2\pi$ и $p \cdot 360°$ называются электрическими, в соответствии с чем говорят об электрических радианах или электрических градусах. Из сказанного следует, что один геометрический радиан или градус соответствует p электрическим радианам или p электрическим градусам. В дальнейшем при

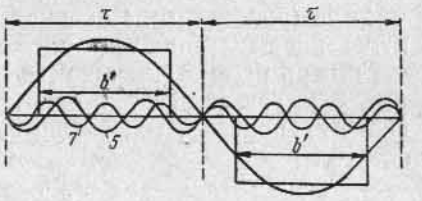


Рис. 3-4. Разложение расчетной кривой индукции на основную и высшие гармонические

отсутствии специального указания будем выражать углы только в электрических радианах или в электрических градусах.

При вращении якоря в синусоидальном поле в секции наводится э. д. с., изменяющаяся во времени тоже синусоидально [см. формулу (1-1а)]. Таким образом, синусоидальная кривая на рис. 3-5, *а*, определяющая распределение индукции в зазоре под полюсами, т. е. в пространстве, в то же время является кривой изменения во времени э. д. с., наводимой в секции при постоянной скорости вращения якоря.

Как было показано в § В-5, синусоидальная кривая, в частности синусоидальная э. д. с., может быть изображена вектором,

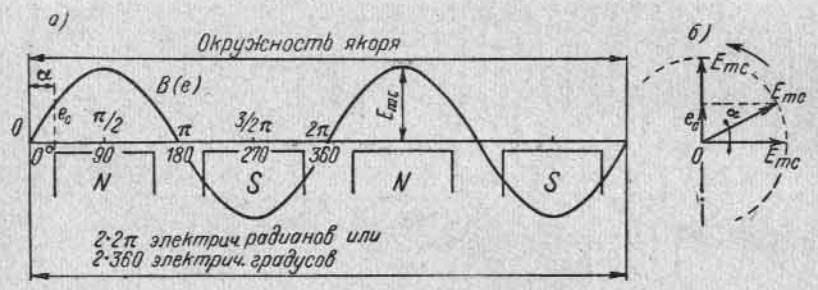


Рис. 3-5. Понятие об электрическом угле (*а*) и векторный способ изображения синусоидальной э. д. с. (*б*)

равным по величине амплитуде э. д. с.— в нашем случае амплитуде э. д. с. секции E_{mc} — и вращающимся против часовой стрелки с угловой частотой $\omega = 2\pi f = 2\pi pn$ (рис. 3-5, *б*). Проекция вектора E_{mc} на ось ординат дает нам мгновенное значение э. д. с. секции e_c.

Теперь рассмотрим процесс наведения э. д. с. в обмотке якоря на рис. 3-3. Так как секции обмотки якоря распределены по его окружности равномерно, то каждая секция смещена относительно соседней на угол

$$\alpha = \frac{p \cdot 2\pi}{S} \text{ электрорадианов} \qquad (3\text{-}4а)$$

или

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{S} \text{ электроградусов.} \qquad (3\text{-}4б)$$

В нашем случае (см. рис. 3-3) $p = 2$ и $S = 14$, следовательно,

$$\alpha = \frac{2 \cdot 360^\circ}{14} = 51^\circ\,{}^3/_7\,.$$

Для момента времени, показанного на рис. 3-3, *а*, якорь занимает положение, при котором секция *1* находится на линии геометрической

нейтрали. Следовательно, э. д. с. этой секции $e_1 = 0$ и на векторной диаграмме изображается вектором *1*, совмещенным с осью абсцисс (рис. 3-6, *а*).

При заданном направлении вращения якоря против часовой стрелки секция *2* следует за секцией *1*, секция *3* за секцией *2* и т. д. Следовательно, э. д. с. секций *2*, *3* и т. д. отстают от э. д. с. секций *1*, *2* и т. д. на угол $\alpha = 51^\circ\,{}^3/_7$. Поэтому на векторной диаграмме мы должны изобразить э. д. с. секции *2* вектором *2*, смещенным относительно вектора *1* на угол $\alpha = 51^\circ\,{}^3/_7$ против направления вращения векторов; соответственно э. д. с. секции

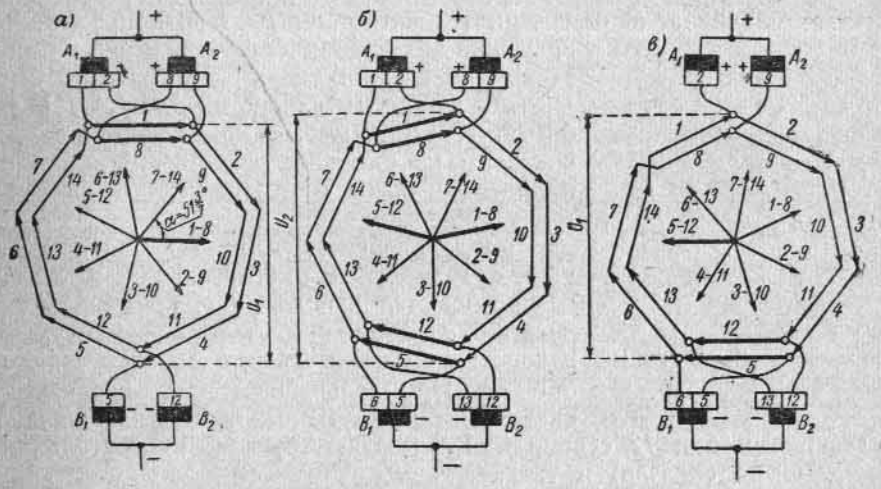


Рис. 3-6. Звезды и многоугольники э. д. с. обмотки на рис. 3-3 для трех различных моментов времени

3 — вектором *3*, смещенным в том же направлении еще на угол $51^\circ\,{}^3/_7$ и т. д. Обойдя первые семь секций обмотки, мы получим правильную семилучевую звезду э. д. с., состоящую из векторов *1*, *2*, *3*, . . . , *7*. Если же затем мы будем продолжать обход обмотки, то вектор *8* совместится с вектором *1*, вектор *9* — с вектором *2* и т. д. Это значит, что в секциях *8*, *9*, *10*, . . . , *14* наводятся те же по величине и направлению э. д. с., что в секциях *1*, *2*, . . . , *7*. В результате получается вторая звезда э. д. с., налагающаяся на первую и отличающаяся от нее только номерами секций.

Так как все секции обмотки якоря соединены между собой последовательно так, что к концу предыдущей секции присоединяется начало следующей, то наводимые в секциях э. д. с. складываются геометрически. Для этого из конца вектора *1*, проведенного параллельно вектору *1* звезды э. д. с. (рис. 3-6, *а*), проводим вектор *2*, равный и параллельный вектору *2* звезды э. д. с., из конца вектора *2* — вектор, равный и параллельный вектору *3* звезды э. д. с. и т. д. В результате получаются два равновеликих семиугольника, которые, однако, ради ясности изображены на рис. 3-6, *а*, *б* и *в* раздельно.

Для получения наибольшего напряжения на щетках они должны быть установлены на коллекторе по линиям геометрических нейтралей. Ширина щетки в схеме на рис. 3-3 принята равной одному коллекторному делению. При заданном на рис. 3-3, *а* положении якоря щетки A_1 и A_2 замыкают накоротко секции *1* и *8*. Соответствующие этим секциям векторы *1* и *8* звезды и многоугольника э. д. с. на рис. 3-6, *а* вычерчены жирными линиями. Чтобы показать связь между многоугольником э. д. с. и коллектором, начало и конец векторов *1* и *8* на рис. 3-6, *а* присоединены к пластинам *1* и *2*, *8* и *9*, к которым присоединены начало и конец секций *1* и *8* на рис. 3-3, *а*.

При повороте якоря на угол $\alpha/4 = 12^{\circ}\,6/7$ (рис. 3-3, *б*) звезда и многоугольник э. д. с. повернутся на тот же угол по направлению вращения векторов (рис. 3-6, *б*). В рассматриваемом положении якоря щетками A_1 и A_2, B_1 и B_2 замкнуты накоротко секции *1* и *8*, *5* и *12*. Как и раньше, векторы *1—8* и *5—12* показаны на рис. 3-6, *б* жирными линиями и присоединены к соответствующим коллекторным пластинам.

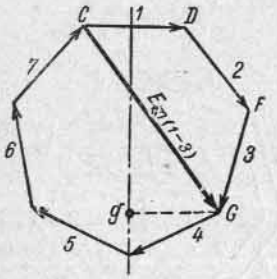


Рис. 3-7. Э. д. с. группы секций

При дальнейшем повороте якоря еще на угол $\alpha/4$ звезда и многоугольник э. д. с. поворачиваются в положение, показанное на рис. 3-6, *в*. Здесь оказываются замкнутыми накоротко щетками B_1 и B_2 только секции *5* и *12*. При дальнейшем вращении якоря окажутся замкнутыми накоротко наряду с секциями *5* и *12* секции *2* и *9* (соответствующий многоугольник э. д. с. не показан) и т. д.

Рассматривая многоугольники э. д. с. при различных положениях якоря, мы можем сделать ряд выводов, имеющих существенное значение для понимания устройства обмотки якоря машины постоянного тока и ее работы.

А. Э. д. с. данной части обмотки. Выше (см. рис. 3-5, *а*) мы видели, что при синусоидальном распределении индукции под полюсами э. д. с. секции обмотки якоря изменяются во времени тоже синусоидально. Но это справедливо и в отношении любой группы секций, т. е. в отношении любой части обмотки якоря. Возьмем, например, группу секций *1, 2, 3* обмотки якоря на рис. 3-3, *а*; соответствующие им э.д. с. показаны на рис. 3-7 векторами $\overline{CD}$, $\overline{DF}$ и $\overline{FG}$. Так как каждый вектор многоугольника представляет собой амплитуду э. д. с. соответствующей секции, то, сложив геометрически векторы $\overline{CD}$, $\overline{DF}$ и $\overline{FG}$, получим замыкающую $\overline{CG}$, которая является амплитудой результирующей э. д. с. $E_{m\,(1—3)}$ рассматриваемой группы секций. Мгновенное значение э. д. с. этой группы $e_{1—3}$ для заданного момента времени выражается проекцией результирующей э. д. с. на ось ординат. При вращении якоря многоугольник и, следовательно, вектор результирующей э. д. с. $\overline{CG}$ вращаются с угловой скоростью $\omega = 2\pi f$ против часовой стрелки; при этом мгновенное значение э. д. с. $e_{1—3}$ изменяется во времени синусоидально, проходя через нуль, когда $\overline{CG}$ располагается перпендикулярно оси ординат, и достигая максимума в момент, когда вектор $\overline{CG}$ располагается параллельно последней.

Б. Число ветвей простой петлевой обмотки. Схему обмотки на рис. 3-3, *а* можно представить в виде электрической схемы соединений, изображенной на рис. 3-8. Мы видим, что в данном случае обмотка якоря состоит из четырех участков, которые условимся называть ветвями. В пределах каждой ветви секции соединены между собой последовательно и находятся между двумя соседними щетками разной полярности. Так, например, ветвь, образованная секциями *2—3—4*, находится между щетками A_1 и B_1, ветвь с секциями *5—6—7* — между щетками B_1 и A_2 и т. д. Если щетки стоят на нейтрали (см. 3-3, *а*), то э. д. с. всех секций, составляющих ветвь, направлены одинаково и, следовательно, складываются, образуя э. д. с. ветви E_a'. По контуру обмотки э. д. с. двух любых соседних ветвей действуют относительно друг друга встречно и находятся во взаимном равновесии, если э. д. с. E_a обеих ветвей равны по величине. Но по отношению к внешней цепи все ветви обмотки работают параллельно, а именно, через щетки A_1 и A_2 во внешнюю цепь отводится ток $2i_a + 2i_a = 4i_a$, где i_a — ток одной ветви; из внешней цепи ток $4i_a$ поступает обратно в машину через щетки B_1 и B_2. Обращаясь теперь к рис. 3-6, видим, что векторы э. д. с. секций *1, 2, 3, . . . 7*, лежащих под одной парой полюсов и составляющих одну пару параллельных ветвей, образуют один многоугольник э. д. с., а секции *8, 9, 10, . . . , 14*, находящиеся под второй парой полюсов, образуют вторую пару параллельных ветвей и соответственно второй многоугольник э. д. с.

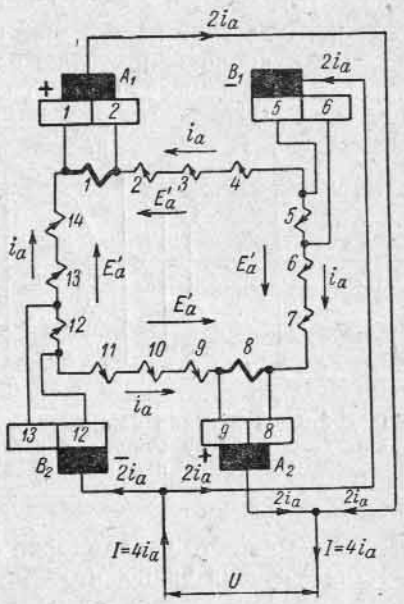


Рис. 3-8. Электрическая схема обмотки на рис. 3-3, *а*

Этот вывод можно обобщить на вариант машины, имеющей p пар полюсов. Рассуждая аналогично, найдем, что *в машинах постоянного тока с простой петлевой обмоткой число пар ветвей «а» обмотки якоря, определяемое числом многоугольников э. д. с., равно числу пар полюсов машины «p»*. Таким образом,

$$a = p \quad \text{или} \quad 2a = 2p. \tag{3-5}$$

Эта зависимость является одной из самых важных характеристик простой петлевой обмотки.

Соответственно числу пар ветвей $a = p$ или числу многоугольников э. д. с. на коллекторе машины с простой петлевой обмоткой необходимо установить число пар щеток (щеточных пальцев), равное числу пар полюсов, причем все щетки каждой полярности соединяются между собой электрически. Если по-прежнему E_a' и i_a — э. д. с. и ток одной ветви, а E_a и I_a — э. д. с. машины и ток, отдаваемый машиной во внешнюю сеть или вводимый в нее из сети, то

$$E_a = E_a' \quad \text{(3-6а)} \quad \text{и} \quad I_a = 2ai_a. \quad \text{(3-6б)}$$

В. Пульсация напряжения на щетках. При конечном числе секций обмотки якоря напряжение на щетках изменяется в некоторых пределах в зависимости от положения якоря в магнитном поле. Этот вывод легко сделать при рассмотрении многоугольников э. д. с. на рис. 3-6, *а*, *б* и *в*. Мы видим, что напряжение на щетках изменяется (пульсирует) в пределах от U_1 на рис. 3-6, *а* до U_2 на рис. 3-6, *б*; затем оно опять приобретает значение U_1 на рис. 3-6, *в* и т. д.

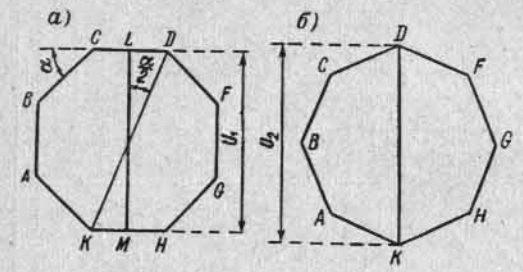


Рис. 3-9. Пульсация напряжения на щетках при четном числе секций в ветви обмотки якоря

Пульсации напряжения на щетках происходят в больших пределах, если многоугольник э. д. с. состоит из четного числа сторон (например, восьми — на рис. 3-9, *а*, *б*). Из построения видно, что

$$LM = U_1 = DK\cos\frac{\alpha}{2} = U_2\cos\frac{\alpha}{2}.$$

Среднее значение напряжения на щетках равно полусумме напряжений U_1 и U_2, т. е.

$$U_{ср} = \frac{1}{2}U_2\left(1+\cos\frac{\alpha}{2}\right).$$

Это напряжение больше U_1 и меньше U_2 на величину $\Delta U = \frac{1}{2}U_2\left(1-\cos\frac{\alpha}{2}\right)$. Пульсация э. д. с. определяется отношением

$$\frac{\Delta U}{U_{ср}} = \frac{\frac{1}{2}U_2\left(1-\cos\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{1}{2}U_2\left(1+\cos\frac{\alpha}{2}\right)} = \operatorname{tg}^2\frac{\alpha}{4}. \quad \text{(3-7)}$$

Напомним [см. формулу (3-4 а)], что

$$\alpha = \frac{p\cdot 2\pi}{S} = \frac{\pi}{S/2p},$$

где $S/2p = K/2p$ — число секций или число коллекторных делений на полюс.

Ниже приведены значения $\frac{\Delta U}{U_{ср}}\cdot 100 = f\left(\frac{K}{2p}\right)$:

$K/2p$	1	2	3	5	8	15	30
$(\Delta U/U_{ср})\cdot 100$	100	17	7,2	2,5	0,97	0,28	0,07

Мы видим, что уже при $K/2p = 8$ пульсация напряжения меньше 1%, т. е. становится практически незаметной:

$$\frac{\Delta U}{U_{ср}}\cdot 100 = f\left(\frac{K}{2p}\right). \quad \text{(3-8)}$$

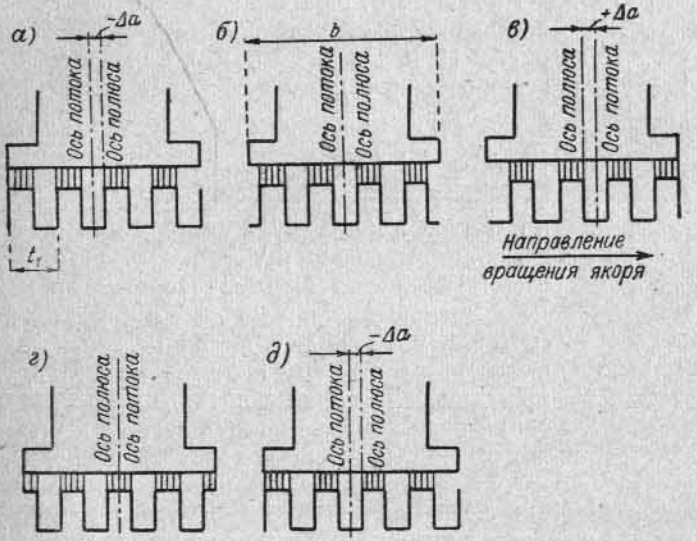


Рис. 3-10. Поперечные колебания магнитного потока

Если многоугольник э. д. с. состоит из нечетного числа сторон, как на рис. 3-6, то, рассуждая аналогично, найдем, что пульсация напряжения уменьшается почти в четыре раза $\left(\operatorname{tg}^2\frac{\alpha}{8}\right)$.

При вычислении $\Delta U/U_{ср}$ мы исходили из основной гармонической поля, но более подробный анализ показывает, что при обычных значениях коэффициента полюсной дуги ($\alpha' \approx 2/3$) высшие гармонические практически не влияют на величину пульсации э. д. с.

Если якорь зубчатый, то э. д. с. обмотки может иметь добавочные пульсации, вызываемые поперечными или продольными колебаниями магнитного потока.

Предположим, что ширина полюсного наконечника b содержит целое число зубцовых делений t_1, например $b = 4t_1$ (рис. 3-10). В момент времени, изображенный на рис. 3-10, *а*, ось потока смещена относительно оси полюса на величину Δa против

направления вращения якоря (— Δa). В последующие моменты времени, соответствующие перемещению якоря на одно зубцовое деление (рис. 3-10, *б*, *в*, *г*, *д*), ось магнитного потока совершит одно полное колебание в поперечном направлении относительно оси полюса (— Δa, + Δa, — Δa). Такие поперечные колебания потока вызывают добавочные пульсации э. д. с., налагающиеся на основную э. д. с. машины и имеющие частоту $f_з = Zn$. Для ослабления этих пульсаций рекомендуется скашивать либо пазы якоря на одно зубцовое деление по оси полюсного наконечника, либо края полюсного наконечника при прямых зубцах якоря.

Теперь предположим, что зубцовое деление не укладывается целое число раз в полюсной дуге b, например $b = 3{,}5t_1$ (рис. 3-11). Сопоставляя два предельных положения якоря на рис. 3-11, *а* и *б*, видим, что при вращении якоря ось магнитного потока занимает неизменное положение в пространстве, но магнитное сопротивление зазора непрерывно изменяется, так как под полюсным наконечником находятся поочередно то четыре, то три зубца. Вследствие этого возникают продольные пульсации магнитного потока и соответствующие пульсации э. д. с. с той же, что и в предыдущем случае, частотой $f_з = Zn$. Для уменьшения продольной пульсации потока и соответственно э. д. с. якоря целесообразно брать число пазов на пару полюсов нечетным, так как при этом изменение магнитного сопротивления под одним полюсом заметно компенсируется изменением этого сопротивления под другим полюсом.

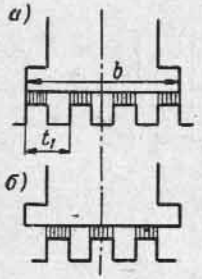


Рис. 3-11. Продольная пульсация магнитного поля

Г. Условие симметрии обмотки кольцевого якоря. Рассматривая многоугольники э. д. с. на рис. 3-6, *а*, видим, что геометрическая сумма э. д. с. каждого многоугольника равна нулю. Физически это объясняется тем, что в каждой паре ветвей, находящихся под полюсами разной полярности, наводятся э. д. с., равные по величине, но направленные по контуру обмотки встречно относительно друг друга. Это справедливо при любом положении якоря относительно полюсов. Другими словами, при симметрии магнитного поля э. д. с. внутри обмотки взаимно уравниваются независимо от положения якоря в магнитном поле. Следовательно, уравнительные токи внутри обмотки не возникают, и на этом основании такие обмотки называются уравновешенными или симметричными.

Из сказанного следует, что все пары ветвей симметричной обмотки должны состоять из одинакового и притом целого числа секций, т. е.

$$S/a = K/a = \text{целое число (ц. ч.)}.$$

Это условие имеет важное значение, так как если оно не соблюдено, то это означает, что разные пары ветвей состоят из разного числа секций, соответственно чему в них наводятся разные по величине э. д. с. В результате в обмотке якоря возникает уравнительный ток, который может существенно осложнить работу машины.

3-5. Простая волновая обмотка кольцевого якоря

Пусть $2p = 4$ и $S = K = 15$ (рис. 3-12а). Согласно формуле (3-2) имеем:

$$y_к = \frac{15 \mp 1}{2} = 7 \text{ или } 8.$$

Остановимся на первом варианте и построим звезду э. д. с. Угол между двумя соседними секциями на якоре определяется по формуле (3-4б):

$$\alpha = \frac{2 \cdot 360°}{15} = 48°.$$

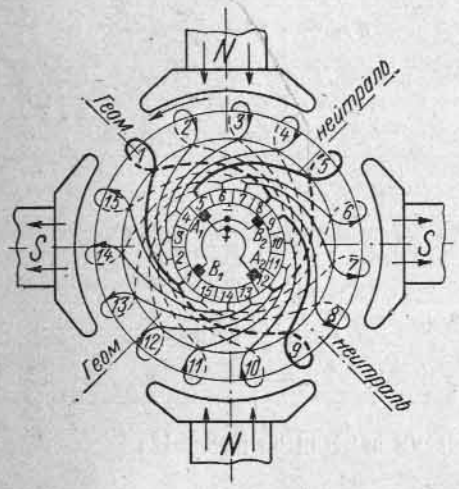


Рис. 3-12а. Радиальная схема простой волновой обмотки кольцевого якоря: $2p = 4$; $S = K = 15$

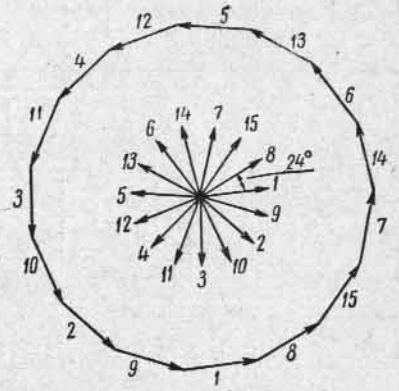


Рис. 3-12б. Звезда и многоугольник э. д. с. для обмотки на рис. 3-12а

На такой же угол сдвинуты и векторы э. д. с., наводимых в секциях *1*, *2*, *3*, . . . , *15* (рис. 3-12б).

Чтобы облегчить построение звезды э. д. с., можно выписать номера секций или коллекторных делений, приняв, что в данный момент времени секция *1* находится в нейтральной зоне:

Номер секции и коллекторного деления .	1	2	3	4	5	6	7	8
Угол сдвига (в эл. градусах)	0	48	96	144	192	240	288	336
Номер секции и коллекторного деления .	9	10	11	12	13	14	15	1
Угол сдвига (в эл. градусах)	336+48=360+24	72	120	168	216	264	312	0

Как видно, звезда э. д. с. состоит из 15 лучей, смещенных каждый относительно соседнего на 24° (рис. 3-12б). *При выполнении простой волновой обмотки секции нужно соединять в той последовательности,*

в какой идут лучи в звезде э. д. с. Возьмем секцию *1* за исходную и расположим ее по нейтрали так, чтобы ее лобовые части были симметричны относительно секции. Пластину, к которой присоединяется начало секции *1*, обозначим тоже цифрой *1*; тогда конец секции *1* мы должны присоединить к пластине $1 + 7 = 8$, сделав по коллектору шаг $y_к = 7$. К пластине *8* присоединяем начало секции *8*, находящейся под правым южным полюсом; сделав следующий шаг по коллектору, приходим к пластине $8 + 7 = 15$ и присоединяем к ней начало секции *15*, лежащей под левым южным полюсом рядом с секцией *1*; продолжая выполнение обмотки, соединим последовательно между собой сначала все секции, находящиеся под обоими южными полюсами, а затем все

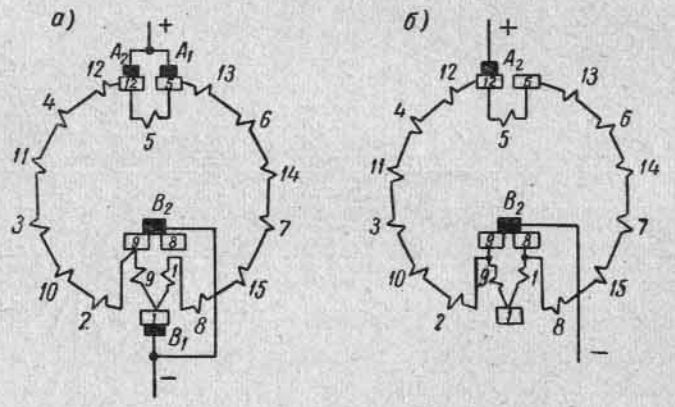


Рис. 3-13. Электрические схемы обмотки на рис. 3-12а

секции под обоими северными, замкнув обмотку на исходную секцию. Порядок, в котором соединяются между собой секции обмотки и соответственно деления коллектора, приводится ниже:

Под обоими южным полюсами		Под обоими северными полюсами
1—8—15—7—14—6—13—5	—	*12—4—11—3—10—2—9—1*

Соответственно порядку соединения секций строим правильный замкнутый на себя пятнадцатиугольник э. д. с. (рис. 3-12б). Поставив щетки по линиям геометрических нейтралей (рис. 3-12а), можем представить обмотку на рис. 3-12а в виде электрической схемы на рис. 3-13, *а*. Мы видим, что группа секций *12—4—11—3—10—2*, расположенных под северными полюсами и входящих в левую часть многоугольника э. д. с., образует одну ветвь обмотки якоря, а другая группа секций *13—6—14—7—15—8*, расположенных под южными полюсами и входящих в правую часть многоугольника э. д. с., образует вторую ветвь обмотки якоря. Таким образом, в нашем случае число пар параллельных ветвей, определяемое числом многоугольников э. д. с., составляет $a = 1$, тогда как число полюсов $2p = 4$. Но принятый нами способ выполнения обмотки не зависит от числа полюсов, так как при любом числе последних все секции, находящиеся

под всеми полюсами одной полярности, мы соединяем последовательно между собой и этим образуем одну ветвь обмотки, а все секции под полюсами другой полярности, соединенные также последовательно, образуют другую ветвь. Таким образом, *в простой волновой обмотке* мы имеем *независимо от числа полюсов всегда только одну пару ветвей обмотки якоря и соответственно только один многоугольник э. д. с.* Следовательно,

$$a = 1 \quad \text{или} \quad 2a = 2.$$

Это свойство простой волновой обмотки является одной из самых важных ее характеристик.

Соответственно числу ветвей обмотки мы могли бы ограничиться наложением на коллектор только двух щеток, например A_1 и B_1. Но обычно устанавливают полное число щеток (щеточных пальцев), т. е. равное числу полюсов, как это показано на рис. 3-12а. Это делают частично для того, чтобы распределить ток на большее число щеток и тем самым уменьшить активную длину коллектора, а главным образом для того, чтобы обеспечить симметрию обеих ветвей. Действительно, при установке полного числа щеток (рис. 3-13, *а*) мы имеем три секции, замкнутые накоротко щетками: секции *1* и *9* замыкаются накоротко через щетку B_2, а секция *5* замыкается накоротко щетками A_1 и A_2 через соединительную шину (на рис. 3-12а короткозамкнутые секции вычерчены жирными линиями). Из схемы видно, что обе ветви обмотки состоят из шести секций каждая, т. е. являются симметричными.

При установке только двух щеток, например A_2 и B_2 (рис. 3-13, *б*), секции *1* и *9* продолжают оставаться замкнутыми накоротко, тогда как секция *5* теперь входит в левую ветвь обмотки, увеличивая число ее секций до семи. При этом возникает несимметрия ветвей и неравенство их э. д. с. Следует также учесть и то, что при полном комплекте щеток секции *1* и *9*, замкнутые накоротко щетками B_1 и B_2, включены по отношению друг к другу параллельно, а при наличии только щетки B_2 — последовательно. В этом случае ухудшаются условия коммутации тока (см. § 5-9), что является безусловно нежелательным. Из этих соображений неполное число щеточных пальцев в машинах с простой волновой обмоткой устанавливают только в тех случаях, когда в машине недостает места, как, например, в тяговых двигателях небольшой мощности.

Из схем на рис. 3-13 следует, что в машине с простой волновой обмоткой, так же как в машине с простой петлевой обмоткой, напряжение на щетках определяется э. д. с. только одной ветви обмотки, а ток, отдаваемый машиной в сеть,— суммой токов обеих ветвей [см. формулы (3-6а) и (3-6б)].

3-6. Э. д. с. кольцевого якоря

Из сказанного выше в § 3-4 и 3-5 следует, что независимо от типа обмотки напряжение между разнополярными щетками определяется суммой э. д. с. всех секций, образующих в данный момент времени

какую-нибудь одну ветвь обмотки. Будем считать, что щетки установлены по линиям геометрических нейтралей (рис. 3-14, *а*) и что напряжение на зажимах машины постоянно по величине, так как при достаточно большом числе секций обмотки пульсациями напряжения на щетках можно пренебречь.

При вращении якоря в магнитном поле в произвольно взятом на якоре проводнике наводится э. д. с. $e_x = B_x lv$ [см. формулу (1-1)]. Если обмотка состоит из N проводников и образует $2a$ параллельных ветвей, то каждая ветвь обмотки состоит из $N/2a$ последовательно соединенных проводников, причем в петлевой обмотке эти проводники располагаются только под каким-нибудь одним полюсом (см. рис. 3-3),

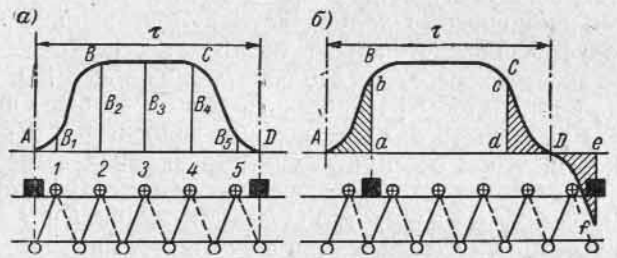


Рис. 3-14. Э. д. с. ветви при щетках, расположенных на нейтрали (*а*) и щетках, сдвинутых с нейтрали (*б*)

а в волновой обмотке — под всеми полюсами данной полярности (см. рис. 3-12а).

Чтобы получить напряжение на щетках E_a, нужно просуммировать э. д. с. всех проводников, составляющих ветвь обмотки. Таким образом,

$$E_a = e_1 + e_2 + e_3 + \ldots + e_{\frac{N}{2a}} = \sum_1^{\frac{N}{2a}} e_x =$$

$$= \left(B_1 + B_2 + B_3 + \ldots + B_{\frac{N}{2a}}\right) lv = \sum_1^{\frac{N}{2a}} B_x lv. \qquad (3\text{-}9)$$

При достаточно большом числе секций $\sum_1^{\frac{N}{2a}} B_x = B_{\text{ср}} \frac{N}{2a} = \text{const}$,

где среднее значение индукции $B_{\text{ср}} = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} B_x dx$. Тогда

$$E_a = B_{\text{ср}} \frac{N}{2a} lv.$$

Скорость вращения якоря

$$v = \pi Dn = 2p \frac{\pi D}{2p} n = 2p\tau n.$$

Следовательно,

$$E_a = B_{\text{ср}} \frac{N}{2a} l \cdot 2p\tau n$$

или, так как $B_{\text{ср}} l\tau = \Phi$, то окончательно имеем:

$$E_a = pn \frac{N}{a} \Phi. \qquad (3\text{-}10)$$

Здесь под потоком Ф следует понимать полезный магнитный поток, т. е. поток, используемый в якоре для создания э. д. с. Если щетки стоят на нейтрали, как на рис. 3-3, 3-12а или 3-14, *а*, то полезный поток равен основному, т. е. $\Phi = \Phi_0$. Если же мы сдвинем щетки с нейтрали (рис. 3-14, *б*), то ветвь обмотки образуется секциями с э. д. с. разных знаков, а это эквивалентно уменьшению полезного магнитного потока на величину заштрихованных площадок Aab и $Ddc = Def$. Использованная часть потока оставлена на рис. 3-14, *б* незаштрихованной. Очевидно, что если бы мы сдвинули щетки на половину полюсного деления $\tau/2$, то полезный поток Ф и соответственно напряжение на зажимах машины были бы равны нулю.

3-7. Принципы выполнения обмоток барабанного типа

Кольцевой якорь имеет ряд существенных недостатков — повышенный расход меди (так как внутренние проводники обмотки якоря являются неактивными), трудные условия охлаждения, особенно внутренних проводников, необходимость выполнения обмоток вручную и т. д. Поэтому в настоящее время кольцевой якорь полностью заменен барабанным. *Чтобы преобразовать кольцевой якорь в барабанный, нужно, не нарушая порядка соединения секций ни между собой, ни с коллектором, вынести их неактивные стороны, находящиеся во внутренней полости кольцевого якоря, на наружную поверхность его так, чтобы обе стороны секции могли пересекать линии магнитного потока.* На рис. 3-15 показана секция обмотки барабанного якоря. Условимся называть части секции, лежащие в пазах, активными частями ее, а части секции, посредством которых активные стороны секции соединяются между собой и с коллектором,— лобовыми частями секции.

Таким образом, секция барабанного якоря имеет две активные стороны, тогда как секция кольцевого якоря — только одну. Но так как, согласно сказанному выше, порядок соединения секций обмотки барабанного якоря тот же, что и в кольцевой обмотке, то и основные типы обмоток — простая петлевая и простая волновая — и их характеристики в обоих случаях одни и те же. Следовательно, обмотка барабанного якоря повторяет собой обмотку кольцевого якоря, но с лучшими показателями и, в частности, с лучшим использованием меди.

Рассмотрим, как нужно уложить секцию на поверхности барабанного якоря, чтобы получить наилучшие результаты с точки зрения создания э. д. с.

На рис. 3-16 показаны три секции: *ab*, *cd* и *ef*. Ширина первой секции $y_1 = \tau$, ширина второй $y_1 < \tau$ и ширина третьей $y_1 > \tau$. Контур первой секции охватывает весь поток Ф, соответствующий площади *ABCDA*, контуры второй и третьей секций охватывают только часть этого потока, соответствующую незаштрихованной части площади *cgBChd*. Поэтому э. д. с. секции *ab* достигает при прочих равных условиях наибольшей величины, т. е. $e_{cd} < e_{ab} > e_{ef}$. Таким образом, *активные стороны секции барабанной обмотки должны быть расположены относительно друг друга на расстоянии, равном или приблизительно равном полюсному делению.*

Практически, как правило, выполняются только обмотки с полным (диаметральным) шагом, у которых $y_1 = \tau$, и обмотки с укороченным шагом, у которых $y_1 < \tau$. Обмотки же с удлиненным шагом встречаются лишь как исключение, так как для создания такой же э. д. с., как в обмотке с укороченным шагом, они требуют больше меди на выполнение лобовых частей.

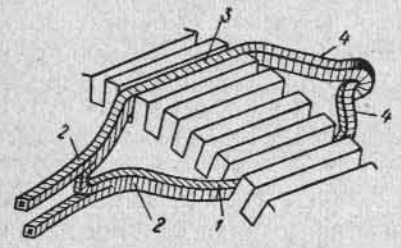


Рис. 3-15. Расположение секции обмотки барабанного якоря
1 и *3* — верхняя и нижняя активные стороны; *2* и *4* — лобовые части

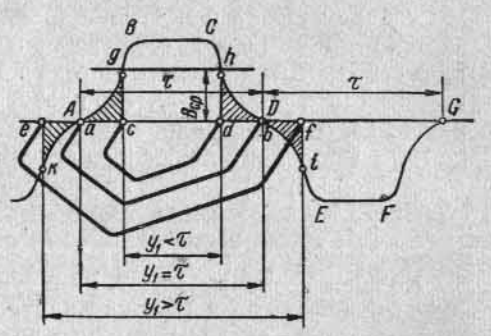


Рис. 3-16. Секции барабанного якоря с полным, укороченным и удлиненным шагом

Так как при приближении к нейтральной зоне происходит резкое спадание индукции в зазоре, то небольшое сокращение (или увеличение) шага обмотки очень мало влияет на уменьшение потока, пронизывающего контур секции, и соответственно на уменьшение э. д. с. обмотки. В то же время, как это мы узнаем из последующего изложения, такие обмотки имеют заметные преимущества в отношении коммутации тока (см. § 5-10).

Вторая характерная особенность барабанной обмотки состоит в том, что она выполняется как д в у х с л о й н а я, т. е. так, что одна активная сторона каждой секции располагается в верхней части паза, а другая в нижней (см. рис. 3-15). Если же мы стали бы укладывать обе стороны секции в одной плоскости, то в такой однослойной обмотке лобовые части секций стали бы пересекаться, что потребовало бы отгиба этих частей и с конструктивно-производственной точки зрения явилось бы крайне нежелательным.

Будем называть слой, лежащий ближе к внешней поверхности якоря, в е р х н и м, а другой слой — н и ж н и м. Переход из одного слоя в другой делается посредине лобовой части, как это показано на рис. 3-15.

Таким образом, *переход от обмотки кольцевого якоря к обмотке барабанного якоря состоит в том, что внутренняя, неактивная сторона секции кольцевого якоря укладывается на наружной поверхности барабанного якоря на расстоянии, равном или близком полюсному делению, так что одна сторона секции занимает место в верхнем слое паза, а другая — в нижнем.* Это позволяет считать, что

барабанная обмотка является кольцевой, имеющей при заданном числе секций двойное число активных сторон.

3-8. Конструкция обмоток барабанного якоря

Основным конструктивным элементом обмотки барабанного якоря машины постоянного тока, так же как и кольцевого, является с е к ц и я о б м о т к и. Напомним, что *секцией называется часть обмотки*

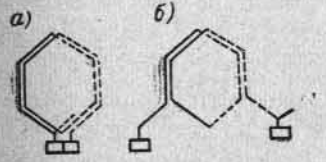


Рис. 3-17. Двухвитковые секции обмоток: *а* — простой петлевой и *б* — простой волновой

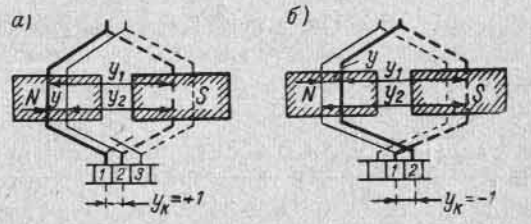


Рис. 3-18. Простая петлевая обмотка: *а* — правая; *б* — левая

между двумя коллекторными пластинами, следующими друг за другом по схеме обмотки (см. § 3-3).

В общем случае секция может состоять из $w_c > 1$ витков и, следовательно, каждая сторона ее — из $w_c > 1$ проводников. На рис. 3-17, *а*, *б* показаны в схематическом виде двухвитковые секции петлевой и волновой обмоток, стороны каждой из которых состоят из двух проводников. Самыми простыми секциями являются одновитковые, широко применяемые в машинах средней и большой мощности. В дальнейшем будем рассматривать только схемы с одновитковыми секциями (условимся обозначать стороны секций в верхнем слое сплошными линиями, а в нижнем — штриховыми), так как увеличение числа витков влияет только на величину э. д. с.

В отношении выполнения лобовых частей со стороны коллектора различают обмотки н е п е р е к р е щ и в а ю щ и е с я и п е р е к р е щ и в а ю щ и е с я.

На рис. 3-18, *а* и *б* показаны секции петлевой обмотки первого и второго рода. В первом случае вторая секция, следующая за первой,

лежит направо от нее, а во втором — налево. Поэтому обмотку на рис. 3-18, *а* часто называют п р а в о х о д о в о й или просто п р а в о й, а обмотку на рис. 3-18, *б* — л е в о х о д о в о й или л е в о й.

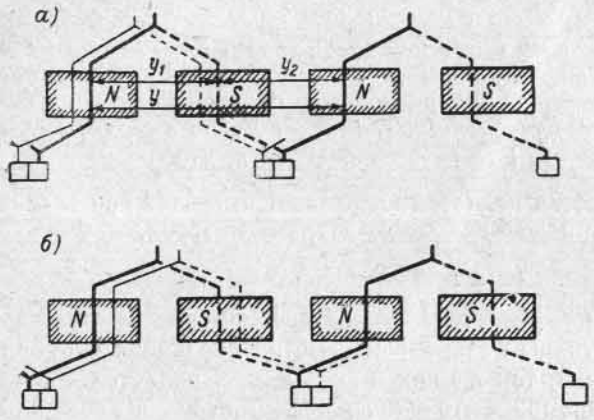


Рис. 3-19. Простая волновая обмотка: *а* — левая; *б* — правая

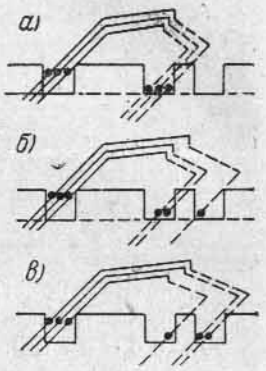


Рис. 3-20. Равносекционная и ступенчатая обмотки

Для суждения о волновой обмотке нужно обойти один раз якорь и соответственно коллектор. Если при этом мы не доходим до исходной пластины (рис. 3-19, *а*), то обмотка неперекрещивающаяся, а если переходим ее (рис. 3-19, *б*), то — перекрещивающаяся. Первую называют л е в о й волновой обмоткой, вторую — п р а в о й.

Обычно отдают предпочтение неперекрещивающимся петлевым обмоткам, так как они требуют несколько меньше меди на выполнение лобовых частей.

В зависимости от способа выполнения лобовых частей различают обмотки: р а в н о с е к ц и о н н ы е, в которых все секции имеют одинаковые размеры (рис. 3-20, *а*), и с т у п е н ч а т ы е, в которых начала двух каких-нибудь секций лежат в одном реальном пазу, а их концы — в разных пазах, и у которых, следовательно, лобовые части секций имеют попеременно разные размеры (рис. 3-20, *б* и *в*).

Секции обмотки выполняются из медных проводников круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей, эмалью, шелком, микалентой и т. д.

При большом числе секций и относительно малом числе пазов (машины малой и средней

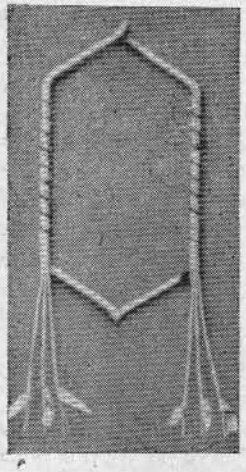


Рис. 3-21. Катушка, состоящая из трех одновитковых секций

мощности) две, три и в общем случае *n* секций соединяются в катушку, имеющую общую относительно паза изоляцию.

На рис. 3-21 показана катушка петлевой обмотки, состоящая из трех одновитковых секций. Переход от верхнего слоя к нижнему производится путем изгиба проводников посредине лобовой части

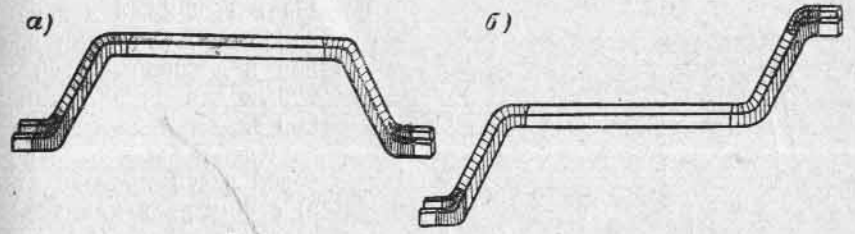


Рис. 3-22. Полукатушки обмоток стержневого типа: *а* — петлевой; *б* — волновой

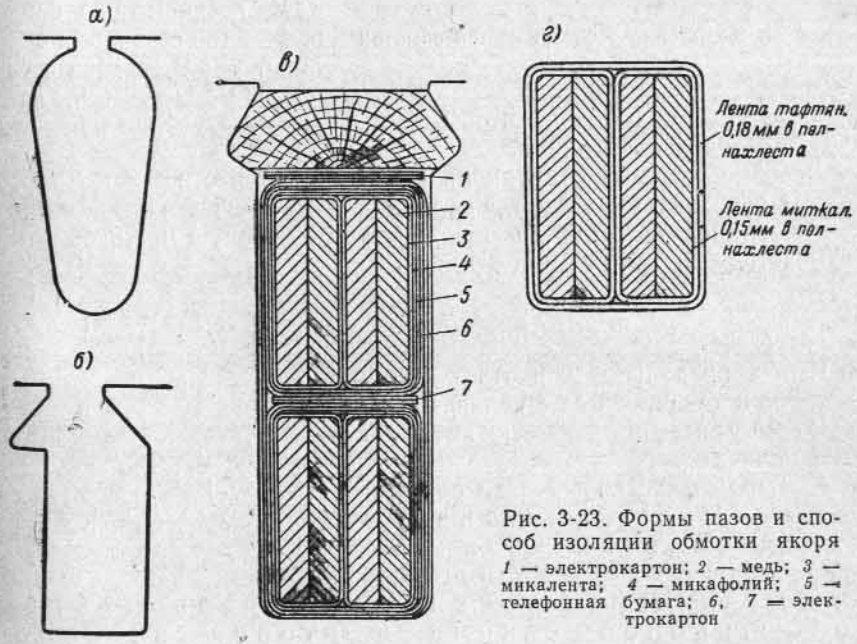


Рис. 3-23. Формы пазов и способ изоляции обмотки якоря
1 — электрокартон; *2* — медь; *3* — микалента; *4* — микафолий; *5* — телефонная бумага; *6*, *7* — электрокартон

катушки. Обмотка, выполненная таким образом, называется к а т у ш е ч н о й.

При большом сечении проводника изгиб его в лобовой части затрудняется. В этом случае выполняют с т е р ж н е в у ю обмотку, каждая катушка которой состоит из двух полукатушек. При укладке обмотки верхние и нижние стороны полукатушек соединяются между собой в лобовых частях посредством специальных хомутиков на пайке. На рис. 3-22, *а* и *б* показаны полукатушки, состоящие из двух

одновитковых полусекций петлевой и волновой обмоток стержневого типа.

Чтобы обеспечить катушкам надлежащую форму, их обычно изготовляют на шаблонах.

Катушки укладываются в пазы овальной полузакрытой или прямоугольной полуоткрытой или открытой формы (рис. 3-23, *а, б, в*). На рис. 3-23, *в* и *г* показан способ изоляции пазовой и лобовой частей катушек для напряжений до 500 *в*.

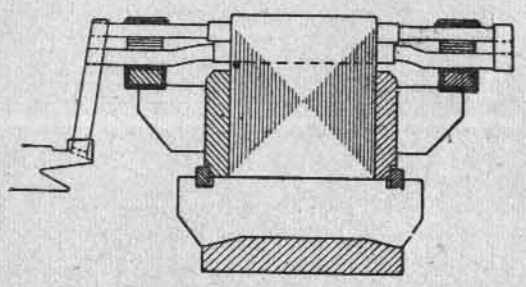


Рис. 3-24. Крепление лобовых частей обмоток якоря

Крепление обмотки в пазовой части производится: а) с помощью клиньев из твердого дерева (бука) или из изоляционного материала, например гетинакса, или б) с помощью бандажей из стальной проволоки, укладываемой в специальные канавки, оставленные в стали якоря, чтобы бандаж не выступал за пределы наружного диаметра якоря.

Лобовые части обмотки якоря также крепятся с помощью проволочных бандажей (рис. 3-24), с силой прижимающих эти части к опорной поверхности. Деталь, поддерживающая лобовую часть обмотки, называется обмоткодержателем.

3-9. Шаги обмотки

Чтобы правильно уложить обмотку на якоре и соединить ее с коллектором, необходимо знать шаги обмотки по якорю и по коллектору.

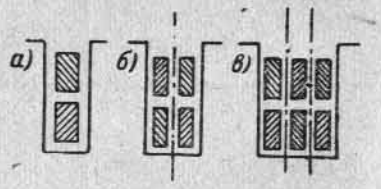


Рис. 3-25. Пазы якоря, состоящие из одного (*а*), двух (*б*) и трех (*в*) элементарных пазов

А. Первый частичный шаг обмотки по якорю. Первым частичным шагом обмотки по якорю или сокращенно первым шагом обмотки y_1 называют расстояние между первой активной стороной секции и второй активной стороной той же секции (см. рис. 3-18 и 3-19). Согласно принципу осуществления барабанных обмоток, этот шаг должен быть равен или приблизительно равен полюсному делению. В практических условиях шаг y_1 выражают числом реальных пазов, которые содержатся между обеими активными сторонами секции. Но при предварительном изучении обмотки удобнее измерять y_1 числом так называемых элементарных пазов, понимая под элементарным пазом паз с двумя активными сторонами (рис. 3-25, *а*). Такие пазы обычно встречаются в машинах с большим

током в ветви i_a. Если же реальный паз содержит 4, 6, . . . , $2u$ активных сторон, то можно его разделить на 2, 3, . . . , u элементарных пазов (рис. 3-25, *б* и *в*). Так как две активные стороны в пазу, т. е. один элементарный паз, соответствуют одной секции или одному делению коллектора, то

$$S = K = Z_э, \tag{3-11}$$

где $Z_э$ — число элементарных пазов.

В одном полюсном делении содержится $Z_э/2p$ элементарных пазов. Но часто $Z_э/2p$ не делится без остатка на $2p$, тогда как при принятом нами способе измерения шаг y_1 может быть равен только целому числу элементарных пазов. Чтобы удовлетворить этому условию, мы сокращаем или удлиняем шаг секции относительно полюсного деления на ε долей элементарного паза так, чтобы было

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon = \text{ц. ч.} \tag{3-12}$$

Поскольку формула (3-12) вытекает из принципа выполнения барабанной обмотки, она справедлива по отношению к любой обмотке барабанного типа.

Б. Второй частичный шаг обмотки по якорю. Вторым частичным шагом обмотки по якорю или сокращенно вторым шагом обмотки y_2 называют расстояние между второй активной стороной секции и первой активной стороной секции, следующей за первой по схеме (см. рис. 3-18 и 3-19). Второй шаг обмотки, так же как первый, измеряется числом элементарных пазов.

В. Результирующий шаг обмотки якоря.

> **Результирующим шагом обмотки якоря y называют расстояние, измеряемое числом элементарных пазов между соответствующими активными сторонами (т. е. сторонами, лежащими в верхнем либо в нижнем слое) двух секций, следующих друг за другом по схеме обмотки (см. рис. 3-18 и 3-19).**

Между частичными шагами обмотки и ее результирующим шагом существует общая для обоих типов обмоток зависимость:

$$y_2 = y - y_1. \tag{3-13}$$

Г. Шаг обмотки по коллектору. Для барабанных обмоток остается в силе все, что было сказано ранее относительно шага обмотки по коллектору $y_к$ для кольцевых обмоток (см. § 3-3). Следовательно,

а) для простой петлевой обмотки (см. рис. 3-18, *а, б*)

$$y_к = \pm 1; \tag{3-14}$$

б) для простой волновой обмотки (см. рис. 3-19, *а*, *б*)

$$y_к = \frac{K \mp 1}{p}. \qquad (3\text{-}15)$$

Верхние знаки в формулах (3-14) и (3-15) относятся к неперекрещивающимся обмоткам, а нижние — к перекрещивающимся.

Между шагом обмотки по коллектору $y_к$ и ее результирующим шагом y существует прямая зависимость, вытекающая из требования, чтобы *ход обмотки по коллектору соответствовал ходу обмотки по якорю*. Из схем обмоток на рис. 3-18 и 3-19 видим, что при выполнении секции мы делаем шаг, т. е. смещаемся по коллектору на $y_к$ делений коллектора и в то же время смещаемся по якорю на y элементарных пазов. Для правильного выполнения обмотки эти шаги должны находиться во взаимном соответствии, а это значит, что ход обмотки по коллектору не должен ни опережать хода обмотки по якорю, ни отставать от него.

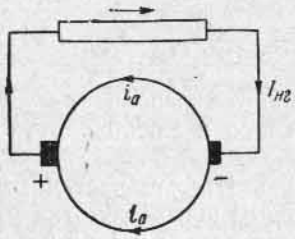


Рис. 3-26. Направление токов в обмотке якоря и во внешней цепи генератора постоянного тока

Так как одному элементарному пазу соответствует одно деление коллектора [см. формулу (3-11)], то для соответствия шагов $y_к$ и y нужно, чтобы они были численно равны между собой, т. е.

$$y_к = y. \qquad (3\text{-}16)$$

Эта формула, так же как формула (3-12), справедлива для любой обмотки барабанного якоря.

Ниже рассматривается ряд примеров простых обмоток барабанного якоря. При этом будем изображать схемы обмоток в развернутом виде, так как этот способ отличается большей простотой и наглядностью.

Д. Правила сравнения петлевых и волновых обмоток якоря. При выполнении схем различных типов петлевых и волновых обмоток барабанного якоря для возможности их сравнения друг с другом выбираем для всех случаев одно и то же направление вращения якоря в генераторном режиме — против часовой стрелки.

Поскольку при барабанном якоре шаги обмотки выбираются близкими к диаметральному, то щетки замыкают накоротко секции, находящиеся в нейтральной зоне и охватывающие северные и южные полюсы. При указанных условиях можно получить общие правила для всех типов петлевых и волновых обмоток барабанного якоря при вращении его в генераторном режиме против часовой стрелки (рис. 3-26).

Будем считать, что на развернутых схемах обмоток (рис. 3-27 и 3-28) полюсы N, S находятся над обмотками.

Располагаем против всех северных полюсов N щетки, обозначаемые буквами A_1, A_2, . . . , A_n, и против южных полюсов S — щетки,

обозначаемые буквами B_1, B_2, . . . , B_n. Тогда получаем следующее правило для определения полярности щеток, учитывая, что во внутренней цепи обмоток якоря направление тока совпадает с направлением индуктированных внутри обмоток э. д. с. и поэтому ток протекает от

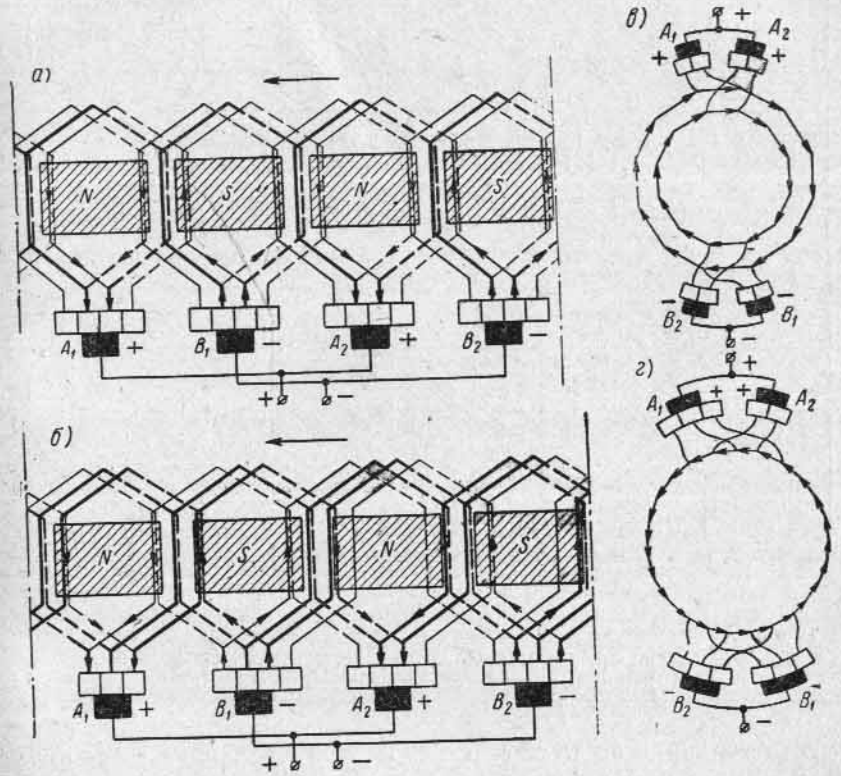


Рис. 3-27. Полярность щеток и многоугольники э. д. с. неперекрещивающихся петлевых и волновых обмоток

отрицательных щеток к положительным, а во внешней цепи, наоборот, от положительных щеток к отрицательным (рис. 3-26):

Петлевые правоходовые обмотки (рис. 3-27, *а*) и волновые левоходовые неперекрещивающиеся обмотки (рис. 3-27, *б*). Щетки A_1, A_2, . . . , A_n являются положительными со знаком «плюс» (+).

Щетки B_1, B_2, . . . , B_n являются отрицательными со знаком «минус» (—).

Петлевые левоходовые обмотки (рис. 3-28, *а*) и волновые правоходовые перекрещивающиеся обмотки (рис. 3-28, *б*). Щетки A_1, A_2, . . . , A_n являются отрицательными со знаком «минус» (—).

Щетки B_1, B_2, . . . , B_n являются положительными со знаком «плюс» (+).

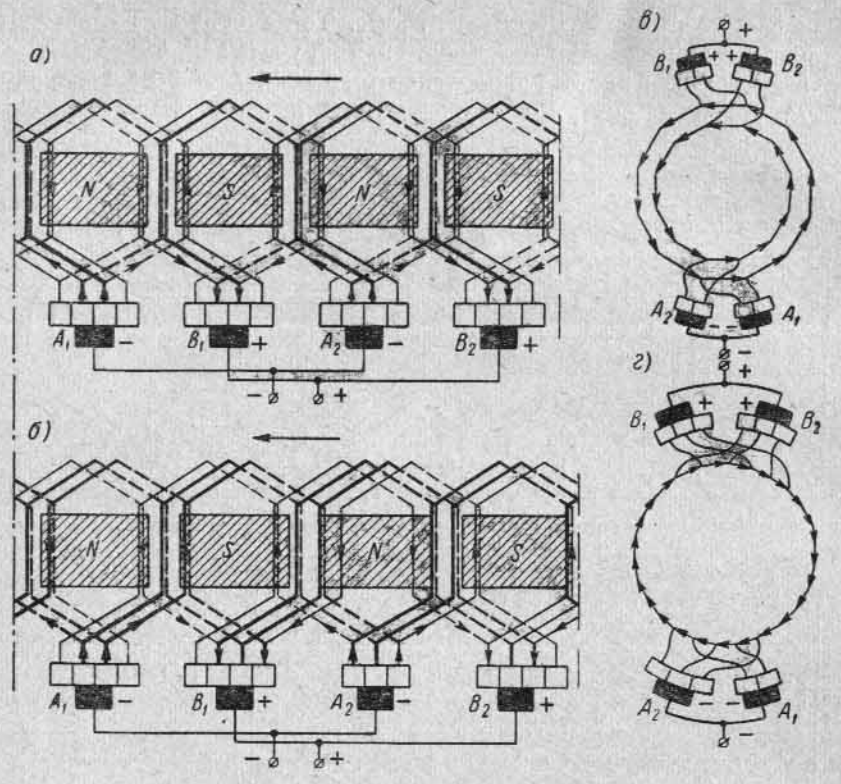


Рис. 3-28. Полярность щеток и многоугольники э. д. с. перекрещивающихся петлевых и волновых обмоток

В многоугольнике э. д. с. секций щетки с положительными знаками $+A_1$, $A_2, \ldots, A_n$ располагаются в верхней части диаграммы э. д. с., а щетки с отрицательными знаками $-B_1$, $B_2, \ldots, B_n$ располагаются в нижней части диаграммы э. д. с., причем при петлевых правоходовых обмотках векторы э. д. с. располагаются по часовой стрелке (рис. 3-27, *в*), а при волновых левоходовых обмотках — против часовой стрелки (рис. 3-27, *г*).

В многоугольнике э. д. с. секций щетки с положительными знаками $+B_1$, $B_2, \ldots, B_n$, располагаются в верхней части диаграммы э. д. с., а щетки с отрицательными знаками $-A_1$, $A_2, \ldots, A_n$ располагаются в нижней части диаграммы э. д. с., причем при петлевых левоходовых обмотках векторы э. д. с. секций располагаются против часовой стрелки (рис. 3-28, *в*), а при волновых правоходовых обмотках — по часовой стрелке (рис. 3-28, *г*).

При изменении направления вращения якоря, так же как при изменении полярности полюсов, знаки напряжений на щетках

$A_1, A_2, \ldots, A_n$ и на щетках $B_1, B_2, \ldots, B_n$ и соответственно порядок следования векторов в многоугольниках э. д. с. изменяются на обратные по отношению к знакам и направлению следования векторов в многоугольниках э. д. с. по отношению к вышеуказанным правилам.

3-10. Простые петлевые обмотки барабанного якоря

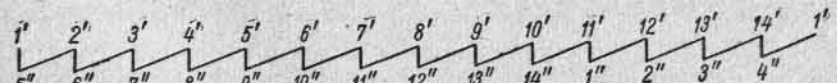
А. 1-й пример. Правоходовая неперекрещивающаяся петлевая обмотка с удлиненным шагом. С целью сопоставления обмоток кольцевого и барабанного типов выполним простую петлевую обмотку барабанного якоря по тем же данным, что и для кольцевого якоря (см. рис. 3-3), а именно: число полюсов $2p = 4$; число секций обмотки якоря и число коллекторных делений $S = K = 14$. Число реальных пазов, в которых размещается выполняемая обмотка, $Z = 14$; число активных сторон по ширине паза $u = 1$; следовательно, число элементарных пазов $Z_э = Z = 14$.

Условимся, что обмотка правоходовая с удлиненным шагом. Согласно формулам (3-14), (3-16), (3-12) и (3-13) имеем:

$$y_к = y = +1; \quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} \pm \varepsilon = \frac{14}{4} + \frac{2}{4} = 4; \quad y_2 = -3.$$

При выполнении обмотки будем называть активную сторону секции, расположенную в верхнем слое, ее началом, а сторону секции в нижнем слое — ее концом. Условимся обозначать одной и той же цифрой номер секции, номер паза, в который укладывается верхняя сторона секции, и номер пластины коллектора, к которой присоединяется начало секции. Так как в каждом пазу лежат две активные стороны — одна в верхнем слое, а другая в нижнем, то верхнюю сторону будем обозначать номером паза со штрихом, а нижнюю — номером того же паза с двумя штрихами, например, активные стороны в пазу *5* будем обозначать цифрами *5′* и *5″*.

Начнем выполнение обмотки с секции *1*, начало которой *1′* расположим, согласно условию, в пазу *1* (рис. 3-29). Пусть в рассматриваемый момент времени паз *1* находится по оси южного полюса. Пронумеруем пазы в последовательном порядке, идя слева направо. Так как шаг $y_1 = 4$, то вторая, нижняя, сторона секции *1* должна быть уложена в пазу $1 + 4 = 5$ и обозначена цифрой *5″*. Начало секции *1* присоединим к пластине *1* и пронумеруем пластины коллектора в той же последовательности, что и пазы на якоре. Конец *5″* секции *1* присоединим к пластине *2* ($y_к = +1$) и этим закончим укладку на якоре секции *1*. Начало *2′* секции *2* присоединим к пластине *2* и уложим в паз *2*, а конец *6″* этой секции присоединим к пластине *3*. В этом же порядке соединим между собой все остальные секции:



Обычно активные стороны секции и ее лобовые части располагаются симметрично относительно пластин, к которым присоединяется секция, но в машинах малой мощности из конструктивных соображений иногда располагают лобовые части со стороны коллектора несимметрично относительно точек присоединения их к пластинам коллектора.

При размещении щеток на коллекторе их нужно устанавливать, так же как в случае кольцевого якоря, *по линиям геометрических нейтралей на строго равном расстоянии друг от друга*, т. е. в нашем случае на расстоянии, равном 3,5 коллекторного деления (рис. 3-29).

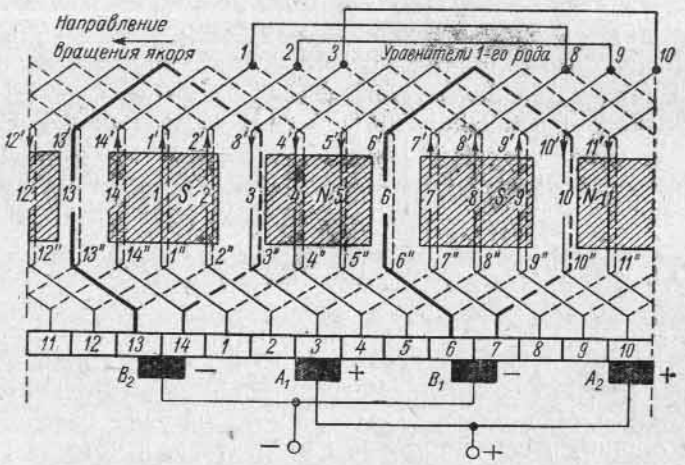


Рис. 3-29. Развернутая схема простой петлевой неперекрещивающейся обмотки: $2p = 4$; $S = K = 14$; $u = 1$; $Z_э = Z = 14$

Но нужно заметить, что в барабанном якоре положение нейтрали на якоре и ее положение на коллекторе различаются. Так, например, на рис. 3-29 активные стороны секции *6* расположены по нейтрали на якоре, тогда как нейтраль на коллекторе, определяемая положением пластин *6* и *7*, к которым присоединяется секция, располагается на оси полюса *S* или вблизи нее.

Теперь построим звезду и многоугольник э. д. с. активных сторон секций обмотки на рис. 3-29. Сначала покажем способ построения векторов э. д. с. сторон только какой-нибудь одной секции, например секции *1* со сторонами *1′* в пазу *1* под южным полюсом и *5″* в пазу *5* под северным полюсом (рис. 3-30, *а*). В рассматриваемый момент времени сторона *1′* лежит точно на оси южного полюса. Следовательно, в ней наводится наибольшая по величине э. д. с., направленная по контуру секции от коллектора вверх. Изобразим ее вектором *1′*, совпадающим с положительным направлением оси ординат (рис. 3-30, *б*). Во второй стороне секции наводится э. д. с., направленная по контуру секции к коллектору вниз, и если бы секция имела

полный шаг, т. е. $y_1 = \tau$, то э. д. с. этой стороны мы должны были бы изобразить вектором, равным по величине вектору *1′*, но направленным в отрицательном направлении оси ординат (штриховая линия на рис. 3-30, *б*). В действительности секция имеет шаг, удлиненный на $\varepsilon = 1/2$, т. е. на половину элементарного паза. Так как угол между двумя элементарными пазами, выражаемый в электрических градусах, составляет

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z_э} = \frac{2 \cdot 360^\circ}{14} = 51^\circ \frac{3}{7},$$

то расстояние между активными сторонами секции в пазах *1* и *5* определяется углом

$$4\alpha = 4\,\frac{2 \cdot 360^\circ}{14} = 180^\circ + 25^\circ \frac{5}{7} = 180^\circ + \frac{\alpha}{2}.$$

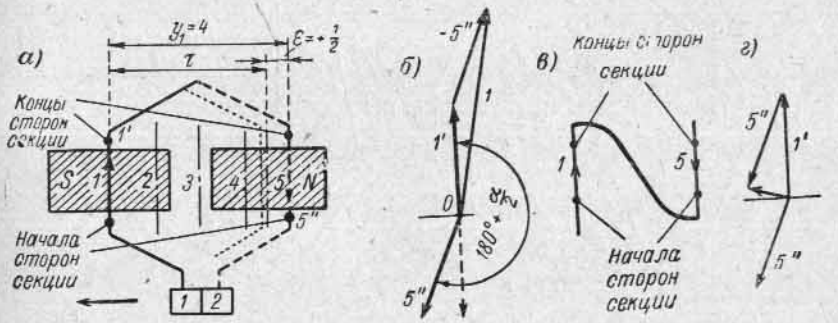


Рис. 3-30. Векторное изображение э. д. с. сторон секции *1* обмотки на рис. 3-29

Поэтому вектор э. д. с. *5″* нужно повернуть на этот угол относительно вектора *1′* против направления вращения векторов (рис. 3-30, *б*).

Операции, которые мы проводим с векторами э. д. с. *1′* и *5″* для получения результирующей э. д. с. секции, зависят от способа соединения сторон секции между собой. В электрических машинах стороны секции всегда соединяются между собой так, как это показано на рис. 3-30, *а*, т. е. так, что к концу первой стороны *1′* присоединяется конец второй стороны *5″*; в этом случае, обходя контур секции, мы меняем направление обхода, так как сперва идем от начала стороны *1′* к ее концу, а затем от конца стороны *5″* к ее началу. *Такому изменению направления обхода контура секции соответствует операция геометрического вычитания векторов э. д. с. 1′ и 5″* на рис. 3-30, *б*; для этого мы поворачиваем вектор *5″* на 180° и проводим вектор — *5″* из конца вектора *1′*; замыкающая *1* представляет собой вектор результирующей э. д. с. секции *1* и равна приблизительно удвоенному значению э. д. с. стороны соответственно согласному действию по контуру секции э. д. с. ее обеих сторон.

Если бы мы соединили стороны секции в пазах *1* и *5* так, как это показано на рис. 3-30, *в*, то обходя контур секции, мы не изменили бы направления обхода (начало и конец первой стороны и начало и конец второй стороны). В этом случае производится операция геометрического сложения векторов, состоящая в том, что из конца первого вектора *1′* (рис. 3-30, *г*) проводится вектор, равный и параллельный второму вектору *5″*. Получается весьма небольшая по величине замыкающая соответственно

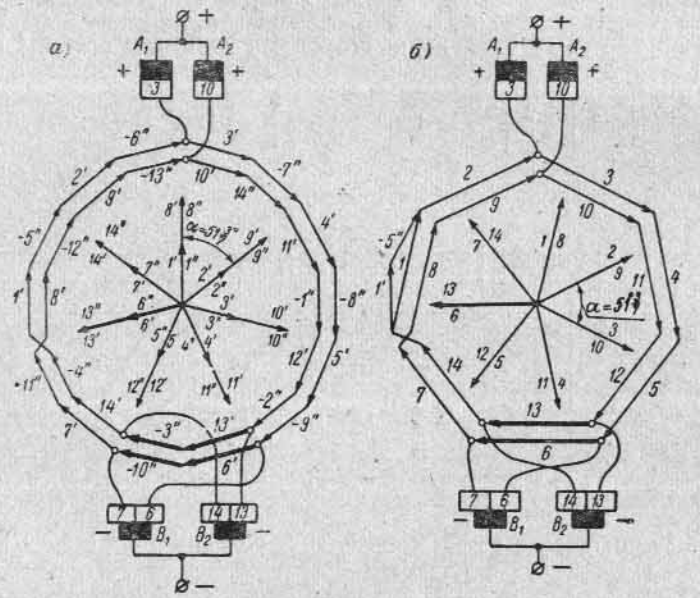


Рис. 3-31. Звезда и многоугольник э. д. с. обмотки на рис 3-29: *а* — сторон секций; *б* — секций

встречному действию по контуру секции э. д. с. ее обеих сторон.

Имея в виду способ соединения сторон секции, показанный на рис. 3-30, *а*, можем построить звезду э. д. с. обмотки на рис. 3-29. Элементарный паз *1* содержит две активные стороны *1′* и *1″*, в которых наводятся равные по величине и совпадающие по фазе э. д. с. Так как в рассматриваемый момент времени паз *1* лежит точно под серединой полюса, то векторы *1′* и *1″* э. д. с. этих сторон должны быть совмещены с осью ординат (рис. 3-31, *а*). При принятом направлении вращения якоря секция *2* следует за секцией *1*, секция *3* — за секцией *2* и т. д. Поэтому э. д. с. этих секций отстают по фазе от э. д. с. секции *1*, и векторы *2′—2″*, *3′—3″* и т. д. в сторонах пазов *2*, *3* и т. д. должны быть сдвинуты относительно векторов *1′—1″* на угол $\alpha = 51°\,^3/_7$ против направления вращения векторов. Продолжая построение, получим семилучевую звезду э. д. с. активных сторон секций сначала

под первой парой полюсов (*1′—1″*, *2′—2″*, . . . , *7′—7″*), а затем под второй (*8′—8″*, *9′—9″*, . . . , *14′—14″*).

Соответственно звезде э. д. с. строим два многоугольника э. д. с., каждый из которых состоит из 14 сторон, смещенных одна относительно другой на угол $\alpha/2 = 25°\,^5/_7$. Для удобства изображения многоугольники построены подобными, хотя их стороны должны быть равны. При построении многоугольника производим для каждой секции ту же операцию геометрического вычитания, что и для секции *1* на рис. 3-30, *б*; в результате получаются векторы *1′* и *— 5″*, *2′* и *— 6″*, . . . , *8′* и *— 12″* и т. д. Здесь же вычерчены жирными линиями векторы э. д. с. секций *6* и *13*, замкнутых накоротко щетками B_1 и B_2 (см. схему обмотки на рис. 3-29).

Из многоугольника э. д. с. на рис. 3-31, *а* можно сделать все те же выводы, что и из аналогичного многоугольника на рис. 3-6 для кольцевого якоря. Мы видим, что обмотка на рис. 3-29 имеет две пары параллельных ветвей, т. е. $a = 2$, соответственно числу многоугольников, причем каждая из четырех ветвей состоит из трех секций. Результирующие э. д. с. всех четырех ветвей равны друг другу, и поэтому уравнительные токи внутри замкнутой на себя обмотки отсутствуют, т. е. обмотка является уравновешенной.

Можно упростить построение звезды и многоугольника э. д. с., если ограничиться изображением э. д. с. только секций. На рис. 3-31, *б* повторено построение вектора *1* э. д. с. секции *1*, данное на рис. 3-30, *б*. Векторы *2*, *3* и т. д. э. д. с. соответствующих секций смещены каждый относительно соседнего на угол $\alpha = 51°\,^3/_7$ против направления вращения векторов. Получается семилучевая звезда для секций *1*, *2*, . . ., *7*, на которую налагается вторая такая же звезда для секций *8*, *9*, . . ., *14*. Соответственно звезде э. д. с. строятся два семиугольника э. д. с. со сторонами, каждая из которых смещена относительно соседней на угол $\alpha = 51°\,^3/_7$. Секции *6* и *13*, замкнутые накоротко щетками B_1 и B_2, выделены жирными линиями. Преимущество такого способа изображения только секционных э. д. с. состоит в его большей простоте и наглядности, но этот метод применим только в тех случаях, когда нет необходимости интересоваться потенциалами сторон секций с другой стороны якоря. Последнее является необходимым, например, для случаев, когда определяются равнопотенциальные точки обмоток якоря для нахождения возможных мест присоединения уравнительных соединений.

Б. 2-й пример. Левоходовая перекрещивающаяся петлевая обмотка. Выполним теперь простую петлевую левоходовую перекрещивающуюся обмотку с теми же основными данными, что и в 1-м примере:

$$2p = 4; \quad S = K = 14; \quad u = 1; \quad Z_э = Z = 14.$$

В данном случае, однако,

$$y_к = y = -1; \quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} - \varepsilon = \frac{14}{4} - \frac{2}{4} = 3; \quad y_2 = -4,$$

т. е. обмотка выполнена с сокращенным шагом $y_1 = 3$. Порядок соединений всех секций представлен ниже:

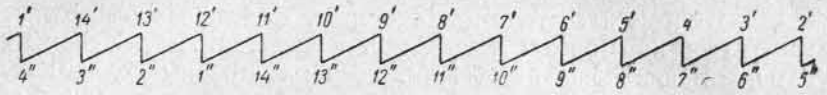


Схема обмотки показана на рис. 3-32.

Построение звезды э. д. с. сторон секций и многоугольников э. д. с. сторон секций и полных секций произведено на рис. 3-33, *а*, *б* и *в* по такому же методу, как и в 1-м примере для простой петлевой пра-

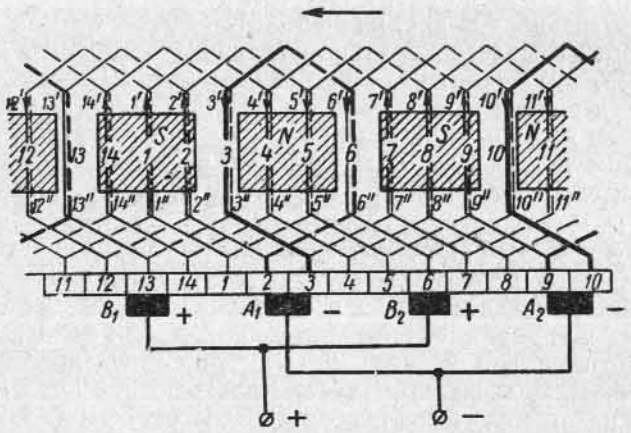


Рис. 3-32. Развернутая схема простой петлевой перекрещивающейся обмотки: $2p = 4$; $S = K = 14$; $u = 1$; $Z_э = Z = 14$

воходовой неперекрещивающейся обмотки (см. рис. 3-29). Обмотка на рис. 3-32 является левоходовой, поэтому векторы э. д. с. сторон секций и полных секций сдвигаются в обратном порядке против часовой стрелки по сравнению с обмоткой на рис. 3-29. Интересно сравнить многоугольники э. д. с. сторон секций на рис. 3-33, *а* и секций на рис. 3-33, *б* левоходовой перекрещивающейся обмотки (рис. 3-32) с соответствующими многоугольниками э. д. с. (рис. 3-31, *а* и 3-31, *б*) правоходовой перекрещивающейся обмотки на рис. 3-29. Мы видим, что в первом случае щетки A_1 и A_2 становятся отрицательными и находятся в нижней части диаграммы э. д. с., а щетки B_1 и B_2 становятся положительными и находятся в верхней части диаграммы э. д. с., как это и должно быть согласно приведенному ранее общему правилу для обмоток различного рода и их диаграмм э. д. с. (см. § 3-9, п. Д).

Таким образом, переход от правоходовой неперекрещивающейся петлевой обмотки к левоходовой петлевой перекрещивающейся обмотке изменяет полярности (знаки) щеток на обратные. Переход от правоходовой неперекрещивающейся петлевой обмотки к левоходовой

перекрещивающейся петлевой обмотке может быть достигнут изменением порядка присоединения концов многовитковых секций (см. рис. 3-15) или одновитковых стержневых секций (см. рис. 3-21) к коллектору, что может быть выполнено изменением порядка припайки концов секций обмотки к коллекторным пластинам.

В. 3-й пример. Правоходовая равносекционная петлевая обмотка.

Придерживаясь тех же обозначений, что в примере 1-м, выполним простую петлевую обмотку по данным: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 28$; $u = 2$; $Z = 14$.

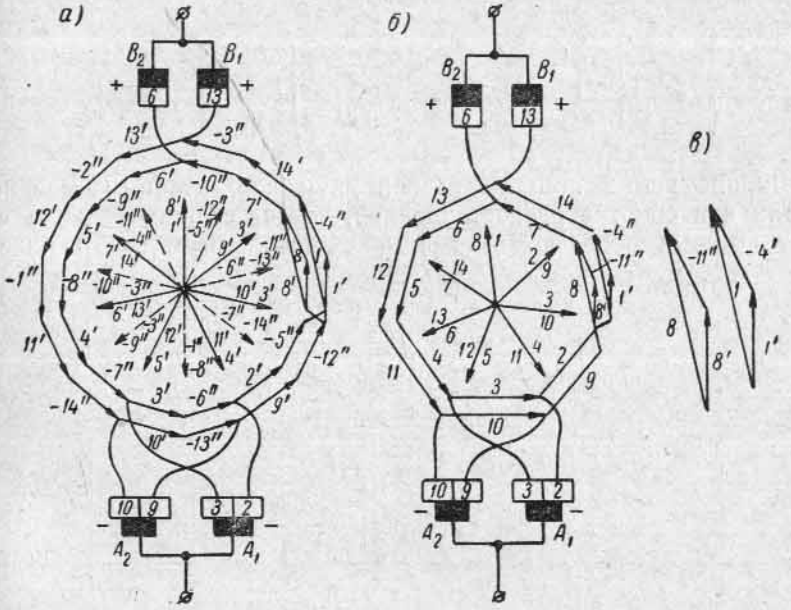


Рис. 3-33. Звезда и многоугольник э. д. с. обмотки на рис. 3-32: *а* — сторон секций; *б* — секций; *в* — э. д. с. 1-й и 8-й секций

Если в пазу укладываются рядом две или несколько активных сторон, то обмотка может быть выполнена как: а) равносекционная, у которой все секции имеют одинаковые размеры (см. рис. 3-20, *а*), или б) ступенчатая, у которой начала двух или более секций лежат в одном пазу, а их концы — в разных пазах (см. рис. 3-20, *б* и *в*).

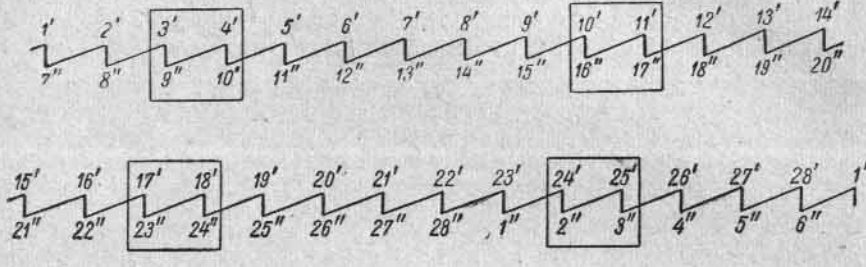
Выполним нашу обмотку как правоходовую равносекционную с укороченным шагом. Согласно расчетным формулам для простой петлевой обмотки (см. § 3-9) имеем:

$$y_к = y = +1; \quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon = \frac{28}{4} - \frac{4}{4} = 6; \quad y_2 = -5.$$

Развернутая схема обмотки показана на рис. 3-34. Цифры в среднем горизонтальном ряду означают номера реальных пазов; цифры,

поставленные сверху и снизу у каждого реального паза, соответствуют номерам секций, уложенных в паз, или номерам элементарных пазов.

Ниже показаны соединения сторон секций; прямоугольными контурами обведены цифры, соответствующие короткозамкнутым секциям:



Ширина щетки принята равной двум коллекторным делениям.

Так как обмотка равносекционная, то две секции, верхние стороны которых попадают в один какой-нибудь паз, имеют нижние

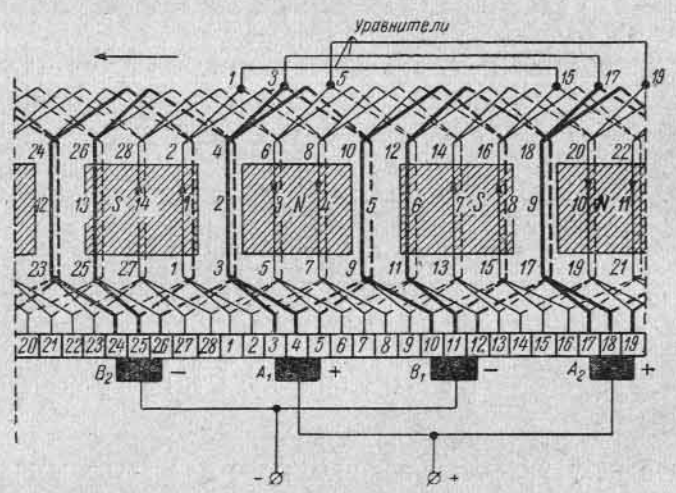


Рис. 3-34. Развернутая схема простой петлевой равносекционной обмотки: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 28$; $u = 2$; $Z = 14$

стороны также в одном пазу (рис. 3-20, *а*). Поэтому э. д. с. обеих этих секций совпадают не только по величине, но и по фазе.

Мы ограничимся построением звезды и многоугольника э. д. с. только секций. В рассматриваемый момент времени верхняя сторона *13'* секции *13* лежит в элементарном пазу *13* (реальный паз *7*) как раз под серединой южного полюса; следовательно, э. д. с. этой стороны секции мы должны изобразить вектором *13'*, совпадающим с осью ординат (рис. 3-35, *а*). Вторая сторона секции *13* лежит в элементарном пазу $13 + 6 = 19$ и соответственно обозначается цифрой *19''*. Так как угол сдвига между двумя соседними элементарными пазами $\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z_э} = \frac{2 \cdot 360^\circ}{28} = 25^\circ\,^5/_7$, то вектор э. д. с. *19''* нужно повернуть относительно ветора *13'* на $6 \times 25^\circ\,^5/_7 = 154^\circ\,^2/_7 = 180^\circ - 25^\circ\,^5/_7 = 180^\circ - \alpha$ против направления вращения векторов. Произведя операцию геометрического вычитания векторов э. д. с. *13'* и *19''*, получим вектор *13* результирующей э. д. с. секции *13*. После этого строим звезду секционных э. д. с. Вектор *13* на рис. 3-35, *б* проводим параллельно вектору *13* на рис. 3-35, *а* (в уменьшенном масштабе). С вектором *13* совмещаем вектор *14*, поскольку секции *13* и *14* лежат в одном пазу. Группы секций *15—16*, *17—18* и т. д., следующие за секциями *13—14*, смещены каждая относительно соседней в направлении против вращения векторов на угол, соответствующий одному реальному пазу или двум элементарным пазам, т. е. на $2\alpha = 51^\circ\,^3/_7$. Получается семилучевая звезда э. д. с. для первой пары полюсов. Продолжая построение, получаем вторую такую же звезду для второй пары полюсов, налагающуюся на первую.

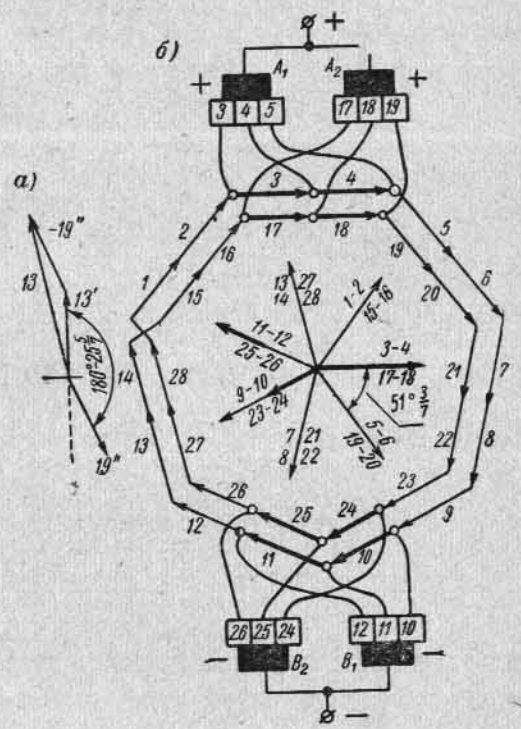


Рис. 3-35. Диаграмма э. д. с. секции, звезда и многоугольник э. д. с. обмотки на рис. 3-34

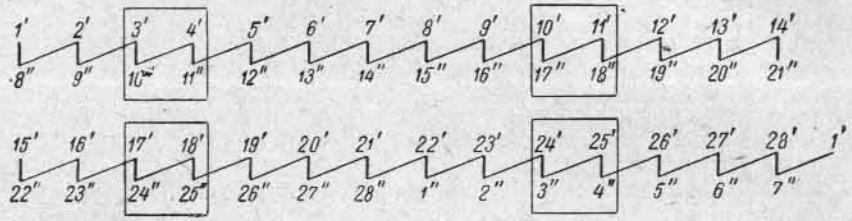
Соответственно звездам э. д. с. строим два многоугольника э. д. с., каждый из которых состоит из семи сторон, смещенных каждая относительно соседней на угол $2\alpha = 51^\circ\,^3/_7$ (рис. 3-35, *б*). Секции *3—4* и *17—18*, замкнутые накоротко щетками A_1 и A_2, и секции *10—11* и *24—25*, замкнутые накоротко щетками B_1 и B_2, вычерчены жирными линиями и показаны в соединении с соответствующими им коллекторными пластинами. Мы видим, что выполненная обмотка имеет две пары ветвей соответственно двум многоугольникам э. д. с., причем каждая ветвь состоит из пяти последовательно соединенных секций. Обмотка является уравновешенной, так как результирующие э. д. с. всех четырех ветвей равны друг другу.

Г. 4-й пример. Правоходовая ступенчатая петлевая обмотка. По тем же данным, что в примере 3-м, а именно: $2p = 4$, $S = K =$

$= Z_э = 28$, $u = 2$, $Z = 14$, выполним правоходовую простую петлевую ступенчатую обмотку с полным шагом. В этом случае имеем

$$y_к = y = +1; \quad y_1 = \frac{28}{4} = 7; \quad y_2 = -6.$$

Развернутая схема обмотки показана на рис. 3-36. Цифры в среднем, нижнем и верхнем горизонтальных рядах имеют то же значение, что в примере 3-м. Соединения сторон секций указаны ниже:



Ширину щетки примем равной двум коллекторным делениям.

Построим диаграмму э. д. с. для пары секций, верхние стороны которых лежат в каком-нибудь одном реальном пазу, например для

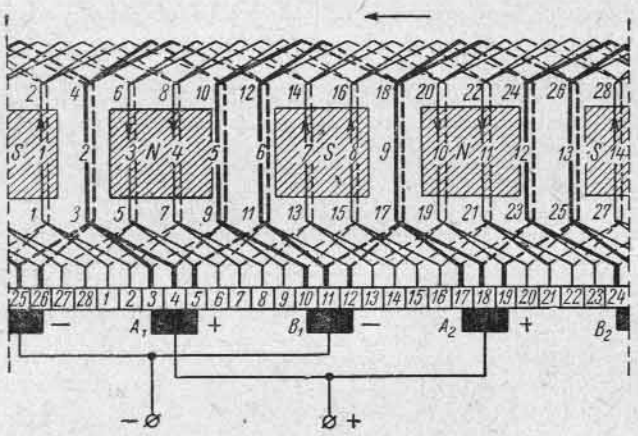


Рис. 3-36. Развернутая схема простой петлевой ступенчатой обмотки: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 28$; $u = 2$; $Z = 14$

секций *13* и *14*, лежащих в 7-м реальном пазу (рис. 3-37, *а*). Нижние стороны секций *13* и *14* должны лежать: первая в $13 + 7 = 20$-м элементарном пазу или в 10-м реальном пазу, а вторая в $14 + 7 = 21$-м элементарном пазу или в 11-м реальном пазу. Таким образом, мы имеем ступенчатую обмотку, у которой шаг $y_{1\,(13)}$ 13-й секции равен трем реальным пазам, а шаг $y_{1\,(14)}$ 14-й секции — четырем реальным пазам, хотя шаги по элементарным пазам для всех секций одинаковы.

Так как угол между двумя соседними реальными пазами $\alpha_р = \frac{p \cdot 360°}{Z} = \frac{2 \cdot 360°}{14} = 51° {}^3/_7$, то вторая, нижняя, сторона секции *13* смещена относительно верхней ее стороны на угол $3 \times 51° {}^3/_7 = 180° - 25° {}^5/_7 = 180° - \alpha_р/2$, а вторая сторона секции *14* — на угол $4 \times 51° {}^3/_7 = 180° + 25° {}^5/_7$. Соответственно этому построена обычным путем диаграмма э. д. с. секций *13* и *14* (рис. 3-37, *б*). Сопоставляя векторы результирующих э. д. с. секций *13* и *14*, видим, что они сдвинуты относительно друг друга на угол $\alpha_р/2 = 25° {}^5/_7$.

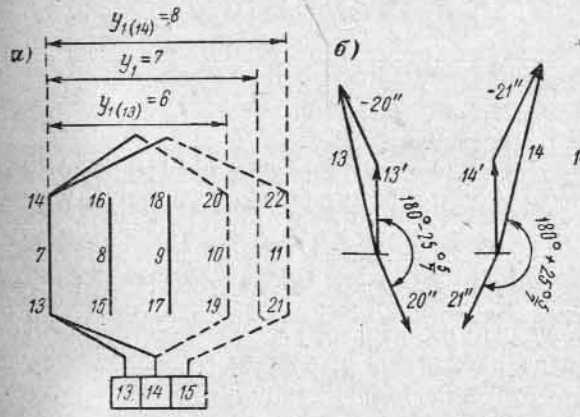


Рис. 3-37. Диаграмма э. д. с. секций ступенчатой обмотки

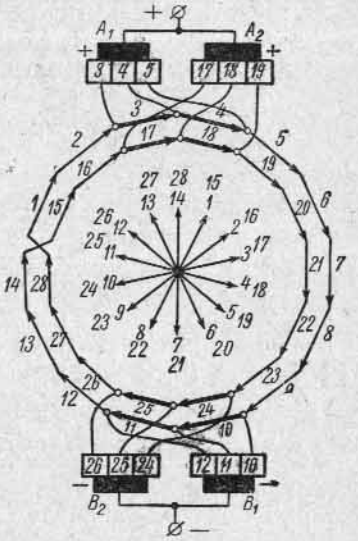


Рис. 3-38. Звезда и многоугольник э. д. с. секций обмотки на рис. 3-36

Сказанное можно распространить на другие секции и соответственно построить звезду и многоугольники э. д. с. секций (рис. 3-38). Звезда состоит из 14 лучей, смещенных каждый относительно соседнего на угол $\alpha_р/2 = 25° {}^5/_7$, а многоугольники — соответственно из 14 сторон (вместо 7 лучей в звезде и 7 сторон в многоугольниках э. д. с. равносекционной обмотки на рис. 3-35, *б*). Векторы э. д. с. секций, замкнутых накоротко щетками, отмечены жирными линиями. Выводы на основании построения многоугольника э. д. с. те же, что и в предыдущем случае ($a = 2$, обмотка уравновешена).

Ступенчатая обмотка конструктивно сложнее равносекционной, но ее многоугольник э. д. с. больше приближается к окружности, что благоприятно отражается на коммутации тока. Ступенчатые обмотки применяются в машинах постоянного тока сравнительно большой мощности с одновитковыми секциями стержневого типа.

3-11. Простые волновые обмотки барабанного якоря

К простой волновой обмотке барабанного якоря относится все, что было сказано выше о волновой обмотке кольцевого якоря (см. § 3-5). Напомним, что при выполнении обмотки барабанного типа способ соединения секций между собой и с коллектором остается таким же, как в кольцевой обмотке; поэтому вторую активную сторону секции можно рассматривать как дополнение к первой, улучшающее использование обмотки, но не меняющее ее существа.

А. 1-й пример. Простая волновая правоходовая перекрещивающаяся обмотка. Выполним простую волновую правоходовую (перекрещивающуюся) обмотку по тем же данным, что и для кольцевого якоря: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 15$; $u = 1$, $Z = 15$ (рис. 3-39).

Согласно расчетным формулам (3-16), (3-17), (3-12) и (13-14) имеем:

$$y_к = y = \frac{K \mp 1}{p} = \frac{15 + 1}{2} = 8;$$

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon = \frac{15}{4} + \frac{1}{4} = 4;$$

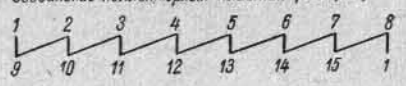
тогда $y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4$.

Начнем выполнение обмотки с коллекторной пластины *1*, к которой мы присоединим начало, т. е. верхнюю сторону *1′*, секции *1*, уложенную в паз *1*. Вторую, нижнюю, сторону секции укладываем в паз $1 + y_1 = 1 + 4 = 5$ и, обозначив ее цифрой *5″*, присоединяем конец секции к пластине $1 + y_к = 1 + 8 = 9$; сюда же присоединяем начало, т. е. верхнюю сторону *9′*, следующей по схеме секции *9* так, чтобы, сделав по коллектору шаг $y_к$, равный восьми коллекторным делениям, обмотка сделала по якорю шаг y, равный восьми элементарным пазам. Дальнейшее соединение сторон секций и коллекторных пластин указано ниже:

Соединение сторон секций



Соединение коллекторных пластин (секций)



Щетки установлены по линиям геометрических нейтралей, ширина щетки принята равной одному делению коллектора.

Чтобы построить звезду э. д. с., построим предварительную диаграмму э. д. с. какой-нибудь секции, например секции 7. Так как угол между двумя соседними пазами $\alpha = \frac{2 \cdot 360°}{15} = 48°$, то вторая сторона секции смещена относительно первой стороны ее на угол $4 \times 48° =$

$= 180° + 12° = 180° + \alpha/4$. В рассматриваемый момент времени паз *9* лежит как раз на линии геометрической нейтрали, а пазы *7* и *11*, в которых находится секция *7*, расположены симметрично относительно паза *9* со сдвигом каждый относительно этого паза на угол $2\alpha = 2 \cdot 48° = 90° + 6°$. Поэтому диаграмма э. д. с. секции *7* имеет вид, показанный на рис. 3-40, *а*.

Соответственно этому строится звезда э. д. с. и многоугольник секционных э. д. с. (рис. 3-40, *б*).

Так как обмотки барабанного якоря не отличаются по существу от обмоток кольцевого якоря (см. § 3-7), то все выводы, которые мы сделали в § 3-5 относительно простой волновой обмотки кольцевого якоря, полностью относятся и к простой волновой обмотке барабанного якоря. В частности, такая обмотка имеет независимо от числа пар полюсов только одну пару ветвей соответственно одному многоугольнику э. д. с., т. е. $a = 1$ или $2a = 2$.

Равным образом остаются в силе соображения, касающиеся числа устанавливаемых на коллекторе щеток.

Б. 2-й пример. Простая волновая левоходовая неперекрещивающаяся обмотка. Выполним теперь левую простую волновую неперекрещивающуюся обмотку с теми же основными данными, что и для 1-го примера правой простой волновой перекрещивающейся обмотки (рис. 3-41):

$2p = 4$; $S = K = Z_э = 15$; $u = 1$, $Z = 15$.

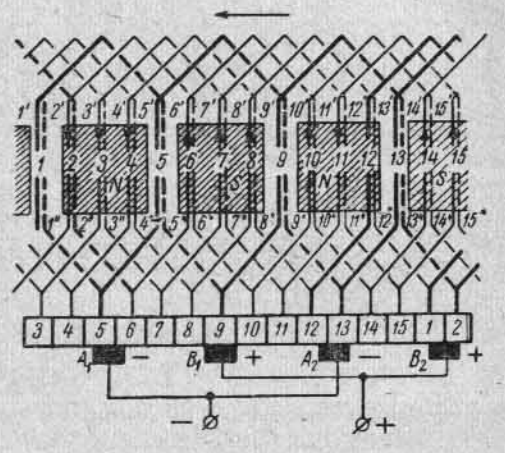


Рис. 3-39. Развернутая схема простой волновой обмотки: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 15$; $u = 1$; $Z = 15$

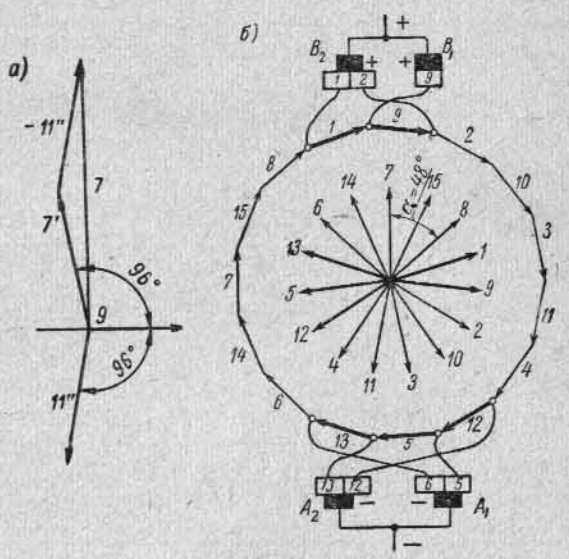


Рис. 3-40. Диаграмма э. д. с. секции, звезда и многоугольник э. д. с. секций обмотки на рис. 3-39

В данном случае

$$y_к = y = \frac{K \mp 1}{p} = \frac{15 - 1}{2} = 7;$$

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon = \frac{15}{4} + \frac{1}{4} = 4;$$

$$y_2 = y - y_1 = 7 - 4 = 3.$$

Соединение сторон секций и коллекторных пластин указано ниже:



Щетки установлены по линиям геометрических нейтралей, ширина щетки принята равной одному делению коллектора. Угол между двумя соседними пазами, так же как в 1-м примере, равен $\alpha = \frac{2 \cdot 360^\circ}{15} = 48^\circ$. Вторая сторона секции смещена относительно первой на угол $4 \times 48^\circ = 180^\circ + \alpha/2 = 180^\circ + 12^\circ = 192^\circ$.

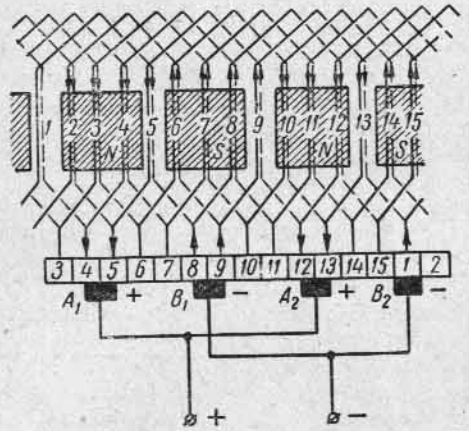


Рис. 3-41. Развернутая схема простой волновой левоходовой неперекрещивающейся обмотки: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 15$; $u = 1$, $Z = 15$

Звезда э. д. с. секций имеет такое же количество векторов и такое же их угловое расположение (рис. 3-42, *б*) для обмотки по рис. 3-41, как и для обмотки рис. 3-33, хотя порядок следования их в многоугольнике э. д. с. секций получается обратным. В данном случае, поскольку волновая обмотка получается левой неперекрещивающейся, по общему правилу для различного типа обмоток, щетки A_1 и A_2, расположенные против северных полюсов N, имеют положительные знаки, а щетки B_1 и B_2, расположенные против южных полюсов S, имеют отрицательные знаки. На диаграмме э. д. с. секций обмотки по рис. 3-41 щетки с положительным знаком (+) A_1 и A_2 располагаются в верхней части диаграммы, а щетки с отрицательным знаком (—) B_1 и B_2 располагаются в нижней части диаграммы

(рис. 3-42, *б*), в то время как для обмотки по рис. 3-39 получается обратное расположение щеток A_1 и A_2, лежащих против северных полюсов N, и щеток B_1 и B_2, лежащих против южных полюсов S. Для

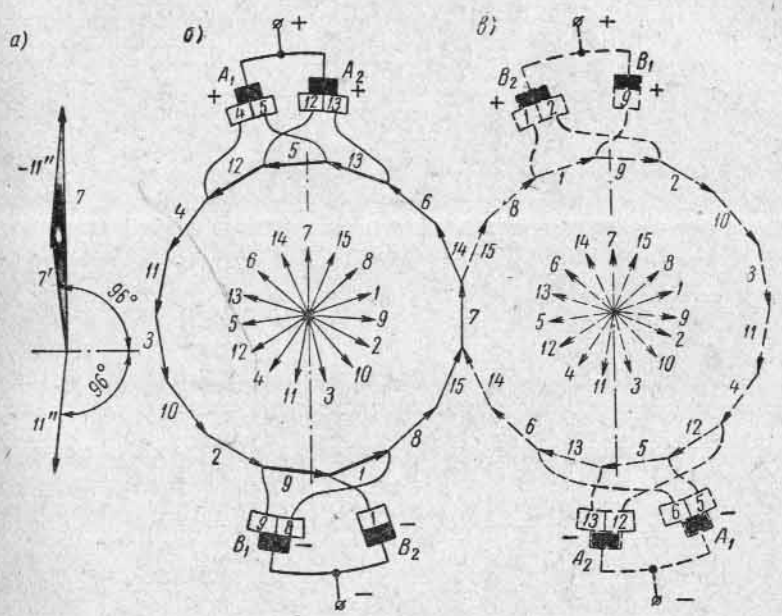


Рис. 3-42. Диаграмма э. д. с. секции, звезды и многоугольники э. д. с. секций обмоток по рис. 3-41 и 3-39

более полного сравнения диаграмм э. д. с. секций для обмоток по рис. 3-41 и 3-39 на рис. 3-42, *в* штриховой линией нанесена и вторая диаграмма (рис. 3-40, *б*) при совпадении для обоих случаев векторов э. д. с. 7.

3-12. Простые волновые обмотки, образуемые с помощью искусственных приемов

Простые волновые обмотки должны удовлетворять уравнениям (3-12) и (3-15). Если $K = S$ — число активных секций обмотки, то

$$y = y_1 + y_2 = \frac{S \mp 1}{p}.$$

Так как результирующий шаг обмотки y должен быть целым числом, то отсюда следует, что при четном p число активных секций должно быть нечетным и, наоборот, при нечетном p число S должно быть четным. В том случае, когда это требование не удовлетворяется, можно выполнить волновую обмотку с помощью одного из искусственных приемов. Первым из них является применение мертвых секций,

позволяющее сократить количество активных секций S до такого числа, которое позволяет получить для результирующего шага y целое число.

А. 1-й пример. Простая волновая обмотка с мертвой секцией. Данные машины следующие: $Z = 20$, $2p = 4$, число секций по ширине паза $u = 1$, число активных секций $S = 19$, число коллекторных пластин $K = 19$, число мертвых секций равно 1. Если выбрать неперекрещивающийся тип обмотки, то шаги обмотки:

$$y = \frac{S-1}{p} = \frac{19-1}{2} = 9; \quad y = y_1 + y_2 = 4 + 5 = 9.$$

Схема обмотки представлена на рис. 3-43.

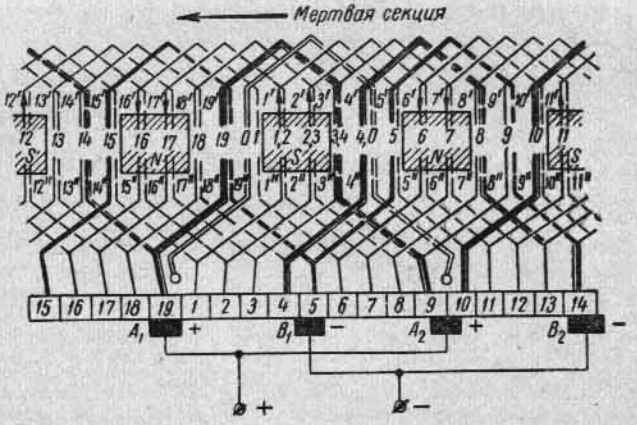
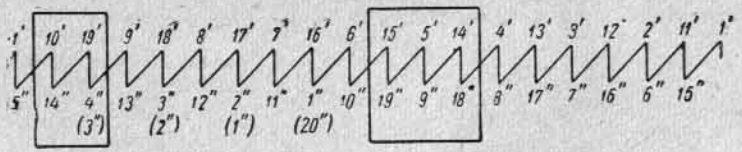


Рис. 3-43. Развернутая схема простой волновой обмотки с мертвой секцией: $2p = 4$; $Z = 20$; $S = K = 19$; $u = 1$

Стороны мертвых секций можно не нумеровать, но нижним секциям, находящимся внутри зоны мертвой секции, можно придавать номер, на единицу больший по сравнению с номером верхней секции лежащей в том же пазу над рассматриваемой нижней секцией. В этом случае получится такая же таблица соединений, как при отсутствии мертвой секции при числе секций, равном числу активных секций, т. е. в данном случае при $S = 19$.

Таким образом, порядок соединений получает следующий вид:



Короткозамкнутые секции очерчены прямыми линиями. В этом случае секции имеют различные величины э. д. с., поскольку стороны секций имеют различные геометрические суммы э. д. с.; поэтому необходимо строить звезды сторон секций, а не полных секций.

Звезда э. д. с. сторон секций обмотки изображена на рис. 3-44, *а*. Многоугольник э. д. с. ветвей обмотки, представленный на рис. 3-44,*б*, показывает, что суммарные э. д. с. внутри обмотки оказываются неуравновешенными на величину Δe, равную той э. д. с., которая должна была бы создаться мертвой секцией, если бы она была включена в цепь обмотки якоря. Наличие неуравновешенной э. д. с. в цепи якоря вызовет протекание внутри его обмотки некоторого уравнительного переменного тока, который будет тем меньше, чем больше число полюсов и активных секций.

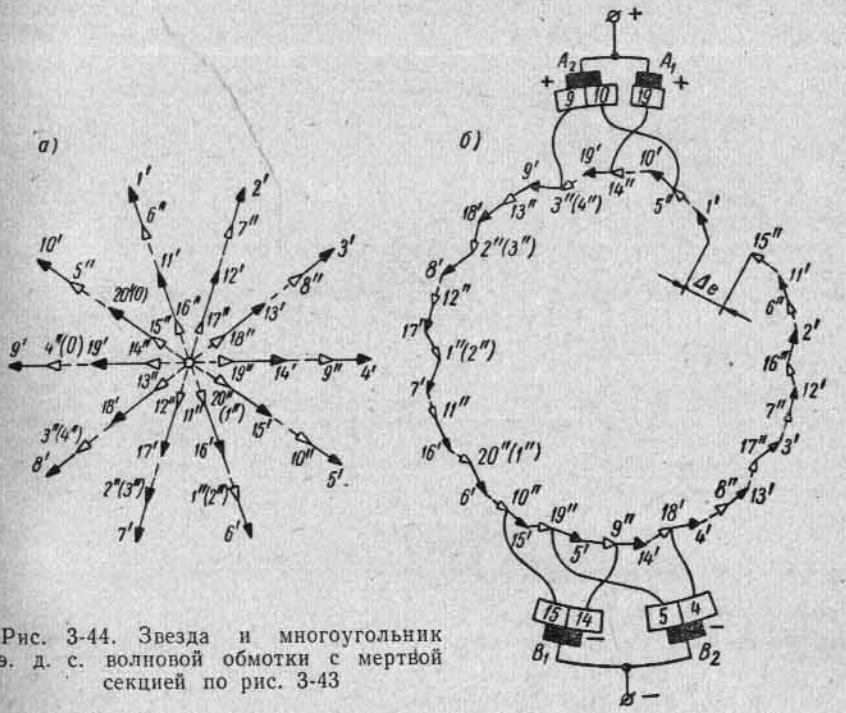


Рис. 3-44. Звезда и многоугольник э. д. с. волновой обмотки с мертвой секцией по рис. 3-43

Так как добавочный уравнительный ток Δi весьма невелик вследствие большого числа секций, включенных последовательно, и значительного индуктивного сопротивления всей цепи, то наличие его не оказывает сколь-нибудь заметного влияния на нагрев обмотки якоря. Однако наличие несимметрии в многоугольнике э. д. с. указывает на возможность некоторых осложнений в условиях коммутации в зонах мертвой секции, поэтому в мощных машинах с напряженными условиями коммутации рекомендуется избегать применения волновых обмоток с мертвой секцией.

Б. 2-й пример. Искусственно замкнутая простая волновая обмотка. Вторым искусственным способом выполнения волновых обмоток являются искусственно замкнутые волновые обмотки, которые могут быть применены в том случае, когда по формуле для простой волновой

обмотки не получается целого числа y, но число секций S, деленное на число пар полюсов p, дает целое число.

При выполнении в этих условиях волновой обмотки волна после обхода всех одноименных полюсов машины возвращалась бы в исходную коллекторную пластину, не получая относительно нее сдвига вперед или назад, как это имеет место в простой волновой обмотке. Вследствие этого приходится осуществлять необходимый сдвиг искусственно, приключаясь после каждого обхода к следующей или предыдущей пластине. В результате такого выполнения после обхода волновой обмотки по всем расчетным стержням она не возвращается к исходной коллекторной пластине, как это происходит в случае про-

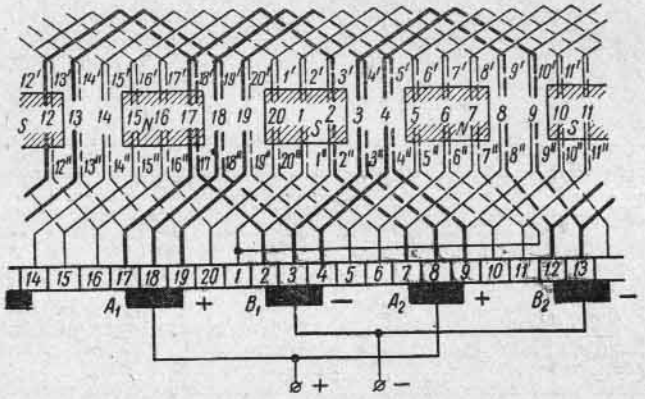


Рис. 3-45. Развернутая схема простой волновой искусственно замкнутой обмотки: $2p = 4$; $Z = S = K = 20$; $u = 1$

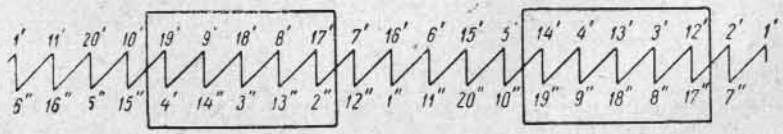
стой волновой обмотки, а образует два конца, находящиеся на расстоянии двойного полюсного деления, которые должны быть соединены с помощью специальной дополнительной перемычки.

Для примера выполнения искусственно замкнутой волновой обмотки возьмем данные той машины, для которой была сделана волновая обмотка с мертвой секцией, а именно: $Z = S = 20$, $2p = 4$. Поскольку в этой обмотке сохраняется полное число секций, то число коллекторных пластин $K = S = 20$. Результирующие частичные и полный шаги обмотки:

$$y_1 = y_2 = 5; \quad y = S/p = 20/2 = 10.$$

Искусственный шаг после полного волнового обхода равен единице.

Схема обмотки представлена на рис. 3-45. Соединение сторон секций имеет следующий вид:



Секции, замкнутые при данном положении якоря накоротко, очерчены прямыми линиями. Звезда э. д. с. сторон секций представлена на рис. 3-46, *а*.

В искусственно замкнутой волновой обмотке получается, так же как и в простой волновой обмотке, только один многоугольник э. д. с., изображенный на рис. 3-46, *б*. Многоугольник имеет число сторон, равное числу сторон секций, помещающихся на двойном полюсном делении: $S/p = y = 10$. Секции, находящиеся под одноименными по-

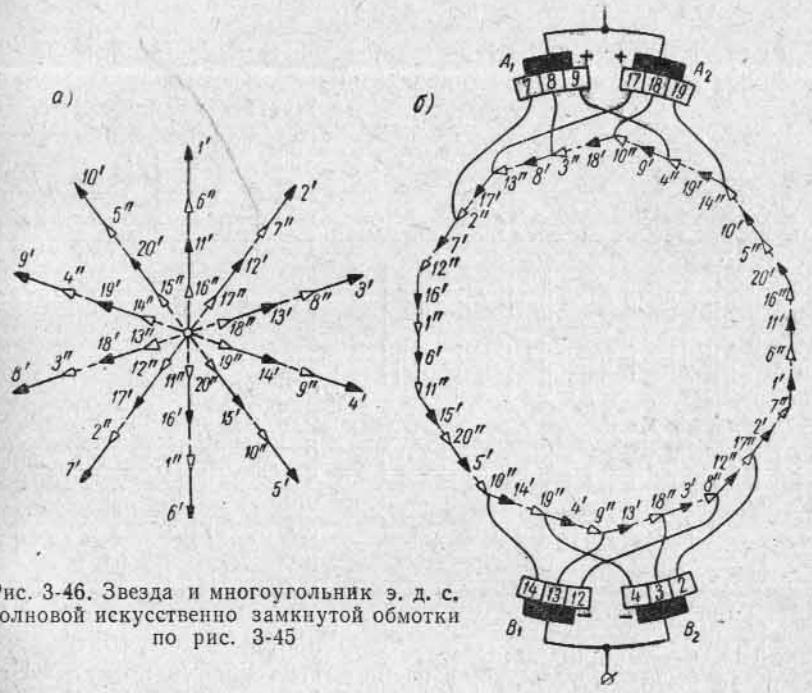


Рис. 3-46. Звезда и многоугольник э. д. с. волновой искусственно замкнутой обмотки по рис. 3-45

люсами, при обходе волны попадают в одно и то же положение относительно середины полюса. Стороны многоугольника составляются из векторов э. д. с., совпадающих по направлению, причем их число равно числу полюсов машины.

3-13. Сложные петлевые обмотки [63, 69]

Сложной петлевой обмоткой называется такая обмотка, шаг которой по коллектору $y_к = m$, где $m = 2, 3, \ldots$ — целое число (ц. ч.). Практически выполняются только такие сложные петлевые обмотки, у которых $m = y_к = \pm 2$ или ± 3.

Согласно принципу соответствия хода обмотки по коллектору и по якорю (см. § 3-9, п. Г) имеем:

$$y = y_к = \pm m. \qquad (3\text{-}17)$$

Здесь y — результирующий шаг обмотки по якорю, измеряемый, так же как и в простой петлевой обмотке, числом элементарных пазов.

Из условия выполнения барабанной обмотки первый частичный шаг любой обмотки, в частности сложной петлевой обмотки, должен быть равен или почти равен полюсному делению.

Следовательно,

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon. \qquad (3\text{-}18)$$

Второй частичный шаг обмотки

$$y_2 = y - y_1. \qquad (3\text{-}19)$$

Если коллектор состоит из четного числа коллекторных делений, то при $y_к = 2$ получаются две одинаковые независимые обмотки. Пусть, например, $K = 20$; начав выполнение обмотки с деления 1, мы соединим между собой только нечетные коллекторные деления 1—3—5— . . . —19—1 и замкнем обмотку, уложив ее в нечетные элементарные пазы якоря.

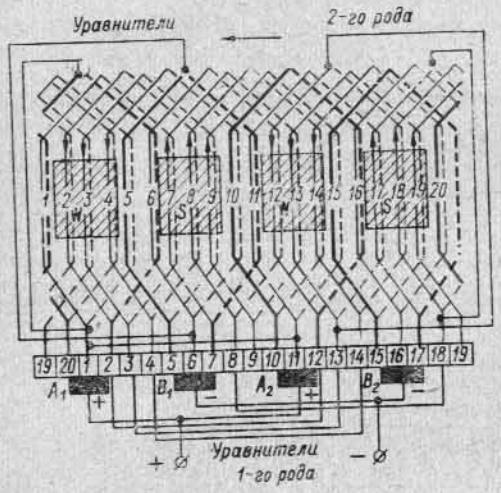


Рис. 3-47. Сложная петлевая двукратнозамкнутая обмотка с удлиненным шагом: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 20$; $u = 1$; $Z = 20$; $m = 2$

Затем выполняем вторую обмотку, соединив между собой только четные деления, и замыкаем ее, использовав четные пазы якоря. Такую обмотку будем называть сложной двукратнозамкнутой обмоткой.

Если K — нечетное число, например $K = 19$, то обмотка выполняется по схеме 1—3—5— . . . — 19—2—4— . . . — 18—1, т. е. сначала мы соединяем все нечетные деления и делаем первый обход по коллектору, а затем, не прерывая обмотки, делаем второй обход по коллектору и тогда замыкаем обмотку, соединив между собой четные деления коллектора. Такую обмотку будем называть сложной однократнозамкнутой обмоткой. До недавнего времени главное значение имел первый тип обмотки, поскольку при этом выполняются условия симметрии обмотки (см. § 3-15). Но опыт последнего времени показал, что выполненные в машинах большой мощности сложные однократнозамкнутые обмотки работают вполне удовлетворительно, несмотря на их некоторую асимметричность.

Рассмотрим два примера сложной петлевой обмотки.

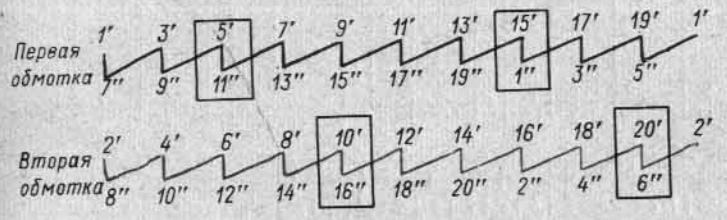
А. 1-й пример. Сложная петлевая правоходовая обмотка с удлиненным шагом. Выполним сложную петлевую обмотку по данным:

$2p = 4$; $S = K = Z_э = 20$; $u = 1$; $Z = 20$; $m = 2$. Обмотка правоходовая с удлиненным шагом.

Согласно приведенным выше расчетным формулам, имеем:

$$y_к = y = +2; \quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon = \frac{20}{4} + 1 = 6; \quad y_2 = -4.$$

Схема обмотки изображена на рис. 3-47. На схеме показаны номера пазов и соответственно секций *1*, *2*, *3*, . . . , *20*, но номера активных сторон в пазах, например *1′—1″* в пазу *1* или *2′—2″* в пазу *2* и т. д., на схеме не показаны, чтобы избежать ее загромождения. Стороны секций соединяются между собой в порядке, указанном ниже:



Ширина щетки равна ширине двух делений коллектора.

Так как в рассматриваемый момент времени пазы *3* и *13* находятся под серединами соответствующих северных полюсов, то векторы э. д. с. *3′—3″* и *13′—13″* совпадают с осью ординат (рис. 3-48, *а*). При принятом направлении вращения якоря векторы э. д. с. следуют друг за другом в порядке *1—2—3* и т. д. На первую звезду э. д. с., соответствующую пазам *1—10*, налагается вторая звезда, соответствующая пазам *11—20*.

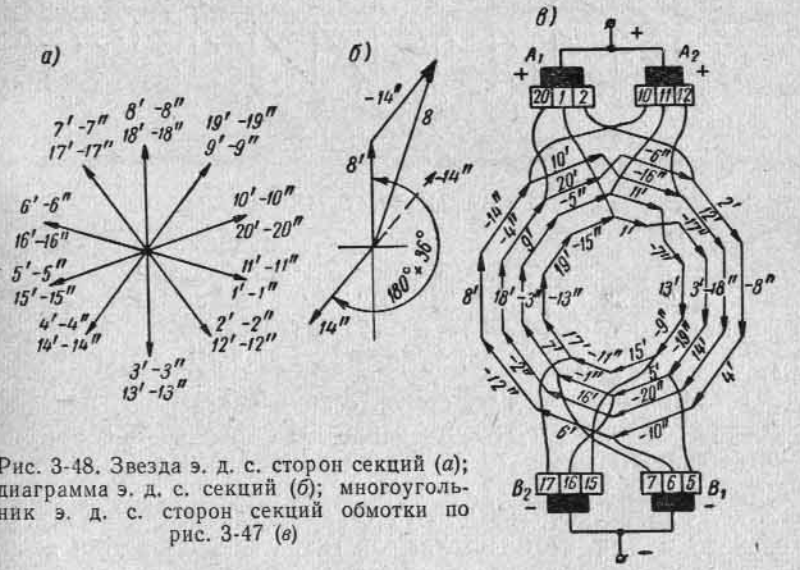


Рис. 3-48. Звезда э. д. с. сторон секций (*а*); диаграмма э. д. с. секций (*б*); многоугольник э. д. с. сторон секций обмотки по рис. 3-47 (*в*)

Диаграмма э. д. с. одной секции, например секции *8*, имеет вид, показанный на рис. 3-48, *б*. Построение производится обычным образом при условии, что угол сдвига между двумя соседними пазами $\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z_э} = \frac{2 \cdot 360^\circ}{20} = 36^\circ$ и что вторая, нижняя, сторона секции *8* лежит в пазу $8 + 6 = 14$, т. е. смещена относительно верхней стороны той же секции на угол $6\alpha = 6 \cdot 36^\circ = 180^\circ + 36^\circ$.

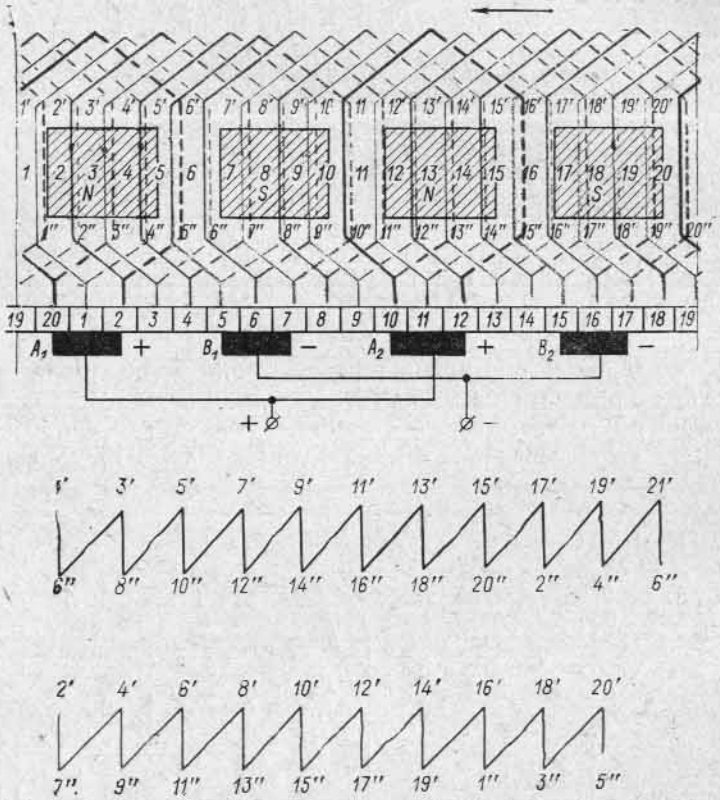


Рис. 3-49. Сложная петлевая двукратнозамкнутая обмотка с полным шагом: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 20$; $u = 1$;, $Z = 20$, $m = 2$

Многоугольники э. д. с. сторон секций показаны на рис. 3-48, *в*. Способ построения тот же, что и раньше (см. рис. 3-31, *а*). Каждой обмотке соответствуют два многоугольника: два наружных — первой обмотке, составленной из нечетных секций, два внутренних — второй обмотке, составленной из четных секций. Так как каждому многоугольнику э. д. с. соответствует одна пара ветвей обмотки якоря, то по отношению к щеткам получается восемь параллельных ветвей. Таким образом, по сравнению с простой петлевой обмоткой число ветвей сложной двукратнозамкнутой петлевой обмотки с шагом по коллектору $y_к = 2$ удваивается, т. е.

$$a = 2p \text{ или } 2a = 2 \times 2p. \qquad (3\text{-}20)$$

Эта зависимость, составляющая характерную особенность сложной петлевой обмотки, позволяет использовать последнюю в машинах с большими значениями токов, предназначенных, например, для целей электролиза.

Рассматривая многоугольники э. д. с. на рис. 3-48, *в*, видим, что результирующие э. д. с. всех ветвей равны как по величине, так и по направлению; поэтому при симметрии магнитного поля внутри обмоток нет уравнительных токов, т. е. обмотка является уравновешенной.

Б. 2-й пример. Сложная петлевая правоходовая обмотка с полным шагом. Выполним сложную петлевую правоходовую обмотку по тем же данным, что в первом примере: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 20$; $u = 1$ и $Z = 20$, но с полным шагом.

В этом случае имеем:

$$y_к = y = 2; \quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon = \frac{20}{4} = 5;$$

$$y_2 = -3.$$

Схема обмотки изображена на рис. 3-49 для того же момента времени, что и в 1-м примере. Диаграмма э. д. с. секции *8* имеет в данном случае вид, показанный на рис. 3-50, *а*; звезда э. д. с. секционных сторон та же, что и на рис. 3-48, *а*. Многоугольник э. д. с. построен на рис. 3-50, *б*; на сторонах многоугольника достаточно проставить только цифры, обозначающие секции. Мы видим, что каждой обмотке соответствуют два многоугольника, но многоугольники обеих обмоток повернуты относительно друг друга на угол

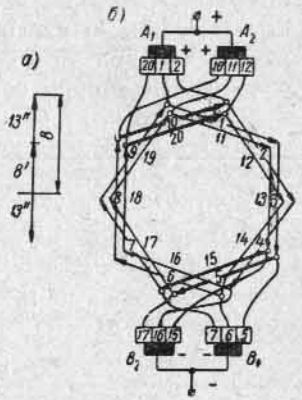


Рис. 3-50. Диаграмма э. д. с. секции (*а*); многоугольник э. д. с. секции (*б*)

$$\alpha = \frac{2 \cdot 360^\circ}{20} = 36^\circ.$$

Сопоставляя многоугольники на рис. 3-48, *в* и 3-50, *б*, видим, что в первом случае многоугольники обеих обмоток располагаются относительно друг друга одинаково, а во втором случае — неодинаково. Это дает настолько заметное преимущество обмотке на рис. 3-47 в отношении распределения токов между отдельными параллельными ветвями якоря, что обмотка на рис. 3-49 оказывается практически неприемлемой (см. § 3-16, п. В.)

3-14. Сложные волновые обмотки

Сложной волновой обмоткой называется такая, в которой после одного обхода коллектора мы приходим к коллекторному делению, лежащему не рядом с исходным делением, а отстоящему от него на 2, 3, . . . , m делений. В этом случае можно получить 2, 3, . . . , m

обмоток, каждая из которых представляет собой простую волновую обмотку с числом пар ветвей $a = 1$. Следовательно, все m обмоток имеют $a = m$ пар ветвей. Рассуждая, как в § 3-3, имеем:

$$y_к = \frac{K \mp m}{p} = \frac{K \mp a}{p}. \qquad (3\text{-}21)$$

Соответственно формулам (3-16), (3-12) и (3-13) определяем шаги обмотки по якорю:

$y = y_к$; (3-22а) $\quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon$; (3-22б) $\quad y_2 = y - y_1$. (3-22в)

Сложная волновая обмотка, так же как и сложная петлевая, может быть многократно- или однократнозамкнутой обмоткой. В первом случае шаг $y_к$ и число пар ветвей $a = m$ имеют общий наибольший делитель t; при этом обмотка распадается на t однократнозамкнутых обмоток. Во втором случае $y_к$ и $a = m$ являются числами взаимно простыми, т. е. их общий наибольший делитель $t = 1$.

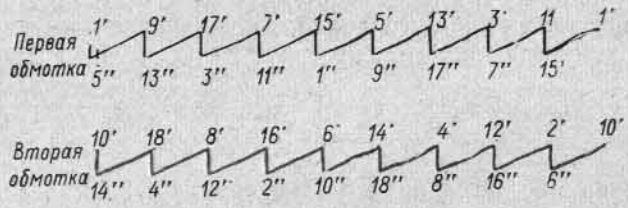
А. 1-й пример. Сложная волновая двукратнозамкнутая левоходовая обмотка. В качестве примера выполним сначала сложную волновую двукратнозамкнутую левоходовую обмотку по данным: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 18$; $u = 1$; $Z = 18$; $a = m = 2$.

Согласно приведенным выше расчетным формулам имеем:

$$y_к = y = \frac{K \mp a}{p} = \frac{18-2}{2} = 8; \quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon = \frac{18}{4} - \frac{2}{4} = 4;$$

$$y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4.$$

Схема обмотки представлена на рис. 3-51. Соединение сторон секций производится в порядке, указанном ниже:



На рис. 3-52, *а*, *б* изображены звезда и многоугольники э. д. с. секций. Для секции *1* построена обычным образом диаграмма э. д. с. ее сторон в предположении, что в рассматриваемый момент времени паз *5* находится под серединой северного полюса и что вращение якоря происходит в заданном на рис. 3-51 направлении. Из многоугольников э. д. с. видно, что мы имеем две пары ветвей, т. е. что $a = m = 2$. Э. д. с. обеих обмоток одинаковы, и, следовательно, обе обмотки взаимно уравновешены.

Б. 2-й пример. Сложная волновая однократнозамкнутая обмотка. Рассмотрим при четном числе пар полюсов p вариант сложной волновой левоходовой неперекрещивающейся однократнозамкнутой обмотки.

Если при четном p шаг y получается нечетным, то после обхода половины секций обмотка не замыкается, а переходит на соседнюю секцию вперед или назад относительно начальной секции и только после m обходов замыкается у исходной секции.

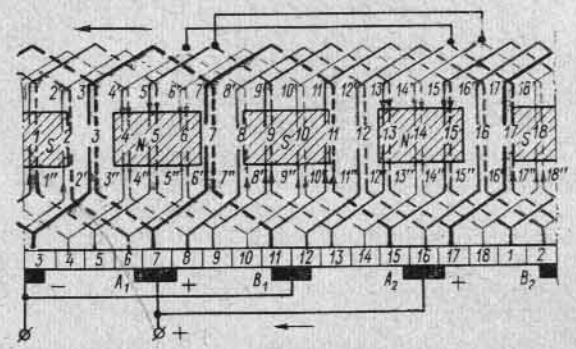


Рис. 3-51. Развернутая схема сложной двукратнозамкнутой левоходовой волновой обмотки с укороченным шагом: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 18$; $u = 1$; $Z = 18$; $m = 2$

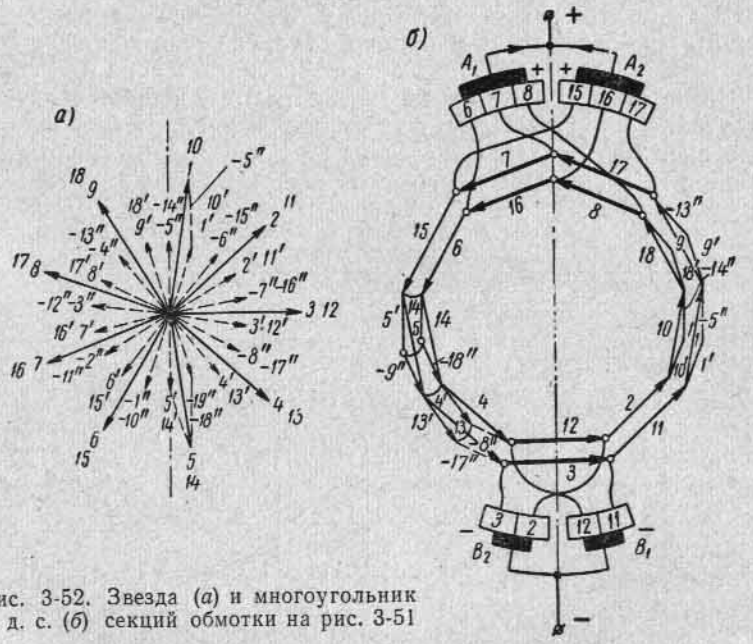


Рис. 3-52. Звезда (*а*) и многоугольник э. д. с. (*б*) секций обмотки на рис. 3-51

В качестве примера выполним сложную однократнозамкнутую обмотку со следующими данными: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 20$; $u = 1$; $Z = 20$; $a = m = 2$. Согласно расчетным формулам имеем:

$$y_к = y = \frac{K \mp a}{p} = \frac{20-2}{2} = 9; \quad y_1 = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon = \frac{20}{4} \mp 0 = 5;$$

$$y_2 = y - y_1 = 9 - 5 = 4.$$

Соединения сторон секций имеют следующий вид:

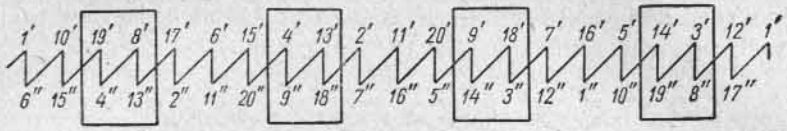


Схема обмотки представлена на рис. 3-53. Звезда э. д. с. сторон секций дана на рис. 3-54, *а*, а соответствующий многоугольник э. д. с. сторон секций показан на рис. 3-54, *б*.

Сравнение характеров многоугольников э. д. с. для однократнозамкнутой и двукратнозамкнутой сложных волновых обмоток показывает, что особых принципиальных отличий между обоими способами их выполнения нет; поэтому оба способа могут применяться практически в равной степени, но однократнозамкнутая сложная обмотка имеет некоторые преимущества.

В. 3-й пример. Сложная волновая левоходовая двукратнозамкнутая обмотка с нечетным числом пар полюсов. Рассмотрим, далее, при нечетном числе пар полюсов p вариант сложной волновой левоходовой неперекрещивающейся двукратнозамкнутой обмотки с четным числом секций S и соответственно с четным числом элементарных пазов $Z_э$. При нечетном p, например $p=3$, сложная волновая обмотка при четном числе элементарных пазов распадается на две самостоятельные простые волновые обмотки, и поэтому является двукратнозамкнутой.

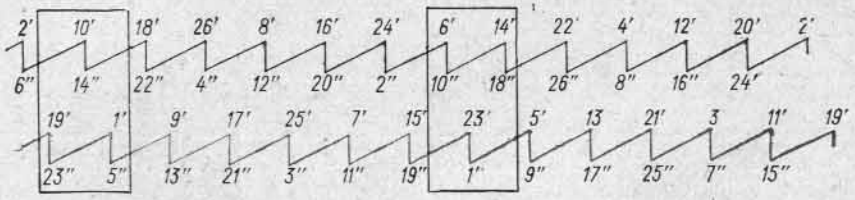
На рис. 3-55 представлена схема сложной волновой обмотки данного типа со следующими данными:

$$2p=6;\quad S=K=Z_э=26;\quad Z=26;\quad u=1;\quad m=2;$$

$$y_к=\frac{K\pm m}{p}=\frac{26-2}{3}=8=y_1+y_2;$$

$$y_1=4\quad \text{и}\quad y_2=4.$$

Соединение обмотки с указанными данными имеет следующий вид:



Четные секции составляют одну ветвь простой волновой обмотки, а нечетные — другую. Оба многоугольника э. д. с. полусекций получаются одинаковыми (рис. 3-56), но равнопотенциальные точки этих многоугольников находятся с разных сторон якоря машины, как это имеет место и при сложной петлевой обмотке с $m=2$.

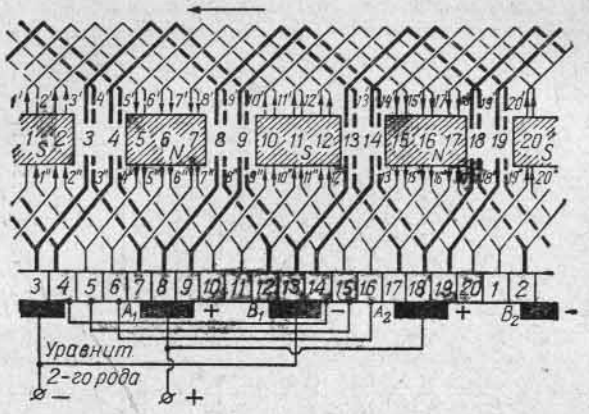


Рис. 3-53. Развернутая схема сложной однократнозамкнутой левоходовой волновой обмотки с диаметральным шагом: $2p=4$; $S=K=Z_э=20$; $u=1$; $Z=20$; $a=m=2$

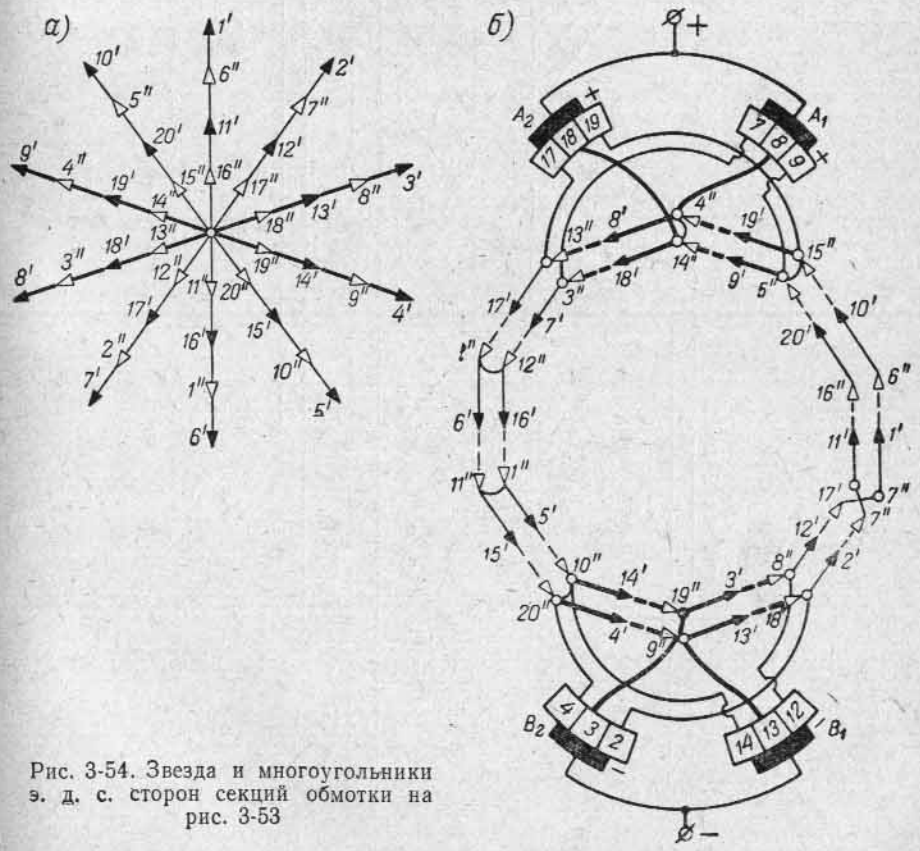


Рис. 3-54. Звезда и многоугольники э. д. с. сторон секций обмотки на рис. 3-53

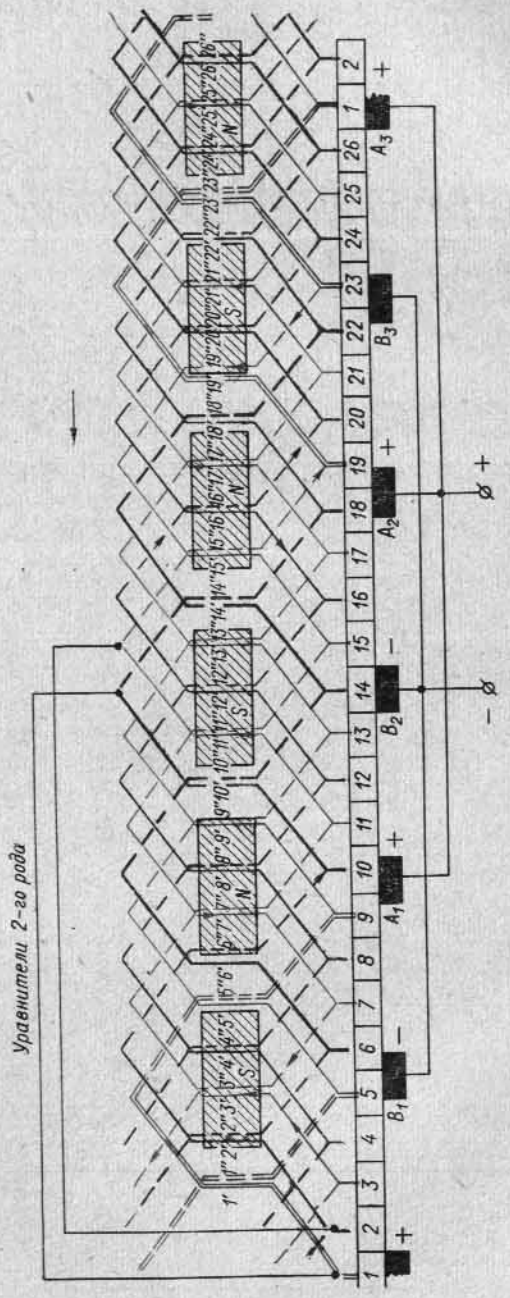


Рис. 3-55. Развернутая схема сложной волновой левоходовой двукратнозамкнутой обмотки с нечетным числом пар полюсов: $2p = 6$; $S = K = Z_э = 26$; $u = 1$; $a = m = 2$

Г. 4-й пример. Сложная волновая однократнозамкнутая обмотка с нечетным числом пар полюсов. При нечетном числе элементарных пазов $Z_э$ и нечетном числе пар полюсов p, некратном $Z_э$, сложная волновая обмотка оказывается однократнозамкнутой. На рис. 3-57

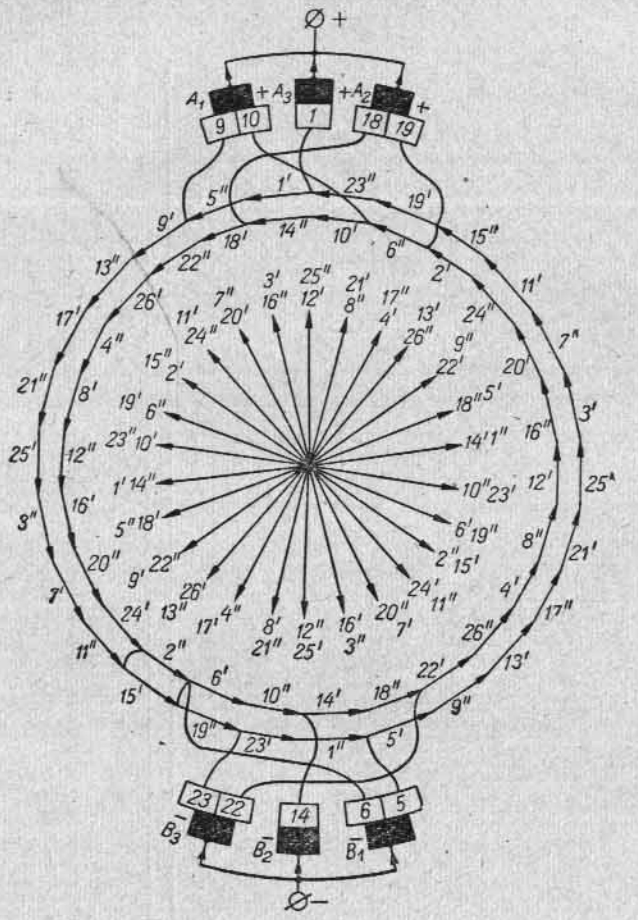


Рис. 3-56. Звезда и многоугольники э. д. с. сторон секций обмотки на рис. 3-55

представлена схема сложной волновой однократнозамкнутой обмотки со следующими данными:

$$2p = 6; \quad S = K = Z_э = 23; \quad m = 2; \quad u = 1;$$

$$y_к = \frac{K \pm m}{p} = \frac{23 - 2}{3} = 7 = y_1 + y_2;$$

$$y_1 = 4 \quad \text{и} \quad y_2 = 3.$$

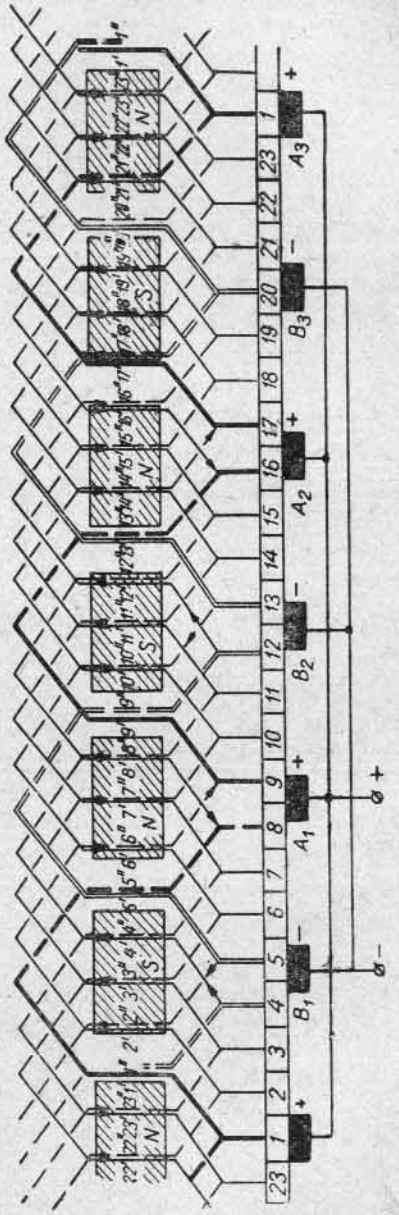
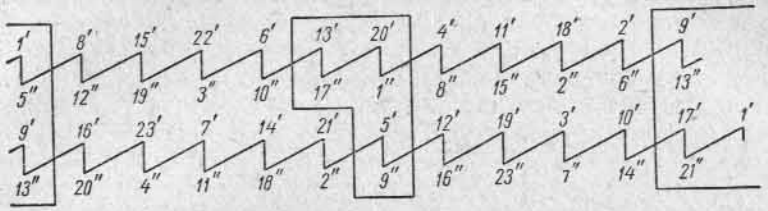


Рис. 3-57. Развернутая схема сложной волновой левоходовой однократнозамкнутой обмотки с нечетным числом пар полюсов: $2p = 6$; $S = K = Z_э = 23$; $Z = 23$; $u = 1$; $a = m = 2$

Соединение обмотки с указанными данными имеет вид, приведенный ниже:



Многоугольники э. д. с. полусекций составляют переплетающийся однократнозамкнутый многоугольник (рис. 3-58). Этот многоугольник не имеет равнопотенциальных, доступных для присоединения уравнителей точек с одной стороны машины.

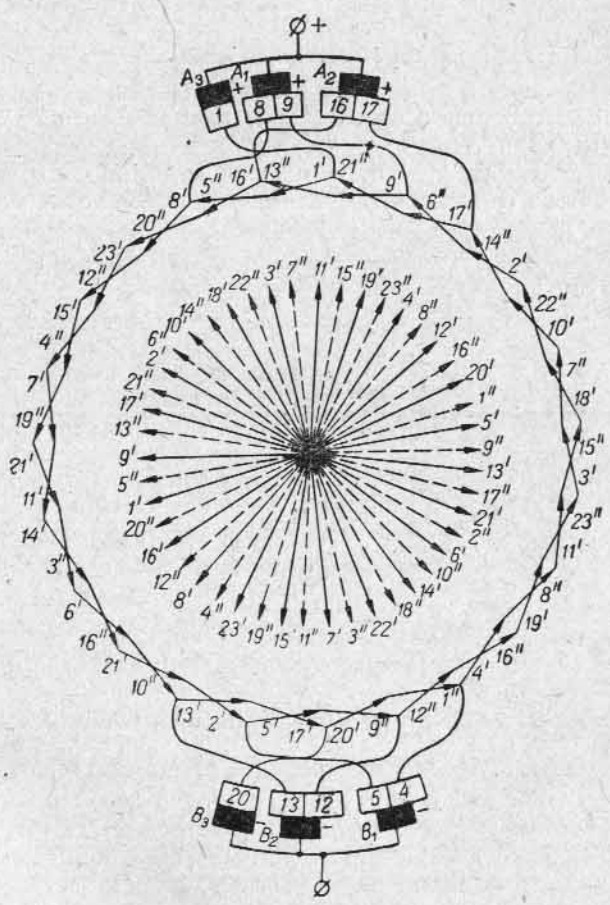


Рис. 3-58. Звезда и многоугольники сторон секций обмотки на рис. 3-57

При нечетном числе $Z_э$ в ветвях получается неодинаковое число полусекций, разнящееся на две полусекции, что говорит о том, что внутри обмотки должны создаваться уравнительные токи. Однако, поскольку обмотка является однократнозамкнутой, то для токов, вызванных неравенством э. д. с., получается весьма длинный путь, поэтому эти уравнительные токи относительно невелики. В целом обмотка вследствие своих недостатков не может быть рекомендована к практическому применению.

3-15. Условия симметрии обмоток барабанного якоря

Выше (см. § 3-4, п. Г) уже было сформулировано условие симметрии кольцевой обмотки, состоящее в том, что все пары ветвей этой обмотки должны быть образованы из одинакового целого числа секций, т. е.

$$S/a = K/a = \text{ц. ч.} \qquad (3\text{-}23)$$

Это условие распространяется и на обмотки барабанных якорей; но секция барабанного якоря состоит по меньшей мере из одного витка или двух проводников; следовательно, наименьшее число проводников обмотки якоря $N = 2S = 2K$ и $S/a = 2S/2a = N/2a$, т. е. при выполнении условия $S/a =$ ц. ч. каждая ветвь обмотки барабанного якоря состоит из одинакового числа проводников.

Укладка обмотки в пазы требует дополнительного условия, а именно симметричного расположения ветвей обмотки в магнитном поле. Это условие выполняется, если

$$Z/a = \text{ц. ч.}; \quad 2p/a = \text{ц. ч.} \qquad (3\text{-}24)$$

Для симметрии простой петлевой обмотки достаточно выполнить только первые два условия: $S/a =$ ц. ч. и $Z/a =$ ц. ч., так как третье, $2p/a =$ ц. ч., выполняется при этом само собой.

Из сложных петлевых обмоток может быть симметричной только двукратнозамкнутая обмотка, имеющая $m = 2$. При $m > 2$ условие $2p/a =$ ц. ч. не выполняется.

Соблюдение условий симметрии обмотки якоря необходимо тем настоятельнее, чем больше размеры и мощность машины.

3-16. Уравнительные соединения (уравнители)

А. Уравнители первого рода. Уравнители первого рода применяются в простых петлевых обмотках для выравнивания потенциалов в ветвях обмотки, лежащих под полюсами одной полярности. Действительно, опыт показывает, что даже при точном соблюдении условий симметрии обмотки э. д. с. ее отдельных ветвей могут быть неодинаковы. Это вызывается различными причинами, например неодинаковыми воздушными зазорами под полюсами, асимметричным расположением щеток на коллекторе, эксцентриситетом якоря относительно оси вращения, раковинами в литых станинах и т. д.

Вследствие неравенства э. д. с. отдельных ветвей, внутри обмотки начинают протекать уравнительные токи от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом.

Уравнительные токи добавочно нагружают обмотку и щетки, вследствие чего ухудшаются условия работы машины, возрастают потери в меди обмотки и соответственно повышается температура машины и уменьшается ее к. п. д.

Для примера рассмотрим кольцевой якорь с простой петлевой обмоткой, у которой $2a = 2p = 4$.

Если бы все ветви обмотки работали симметрично, то во всех ветвях обмотки наводились бы одинаковые э. д. с., например $E_a = 100$ *в*, и по каждой ветви шел бы ток одной и той же величины, например, $i_a = 200$ *а* (рис. 3-59, *а*); соответственно ток в каждой щетке равен 400 *а*, а ток во внешней цепи составляет 800 *а*.

Теперь предположим, что под верхней парой полюсов зазор стал несколько больше, чем под нижней парой полюсов, вследствие чего э. д. с., наводимые в верхней и нижней парах ветвей, стали неодинаковыми, например, в верхней паре ветвей $E_{a1} = 99$ *в*, а в нижней $E_{a2} = 101$ *в*. В этих условиях отрицательные щетки останутся равнопотенциальными, а между верхней и нижней положительными щетками возникнет разностная э. д. с., равная 101—99 = 2 *в*. Такая э. д. с. вызовет уравнительный ток, который потечет по обмотке якоря в направлении, показанном на рис. 3-59, *б* стрелками во внутренней полости якоря, и замкнется через положительные щетки и соединительную шину между ними. Пусть сопротивление одной параллельной ветви обмотки якоря $r_a = 0{,}01$ *ом*; тогда сопротивление каждой половины обмотки якоря, по которой течет уравнительный ток, $2r_a = 0{,}02$ *ом*; следовательно, по каждой такой половине обмотки течет уравнительный ток $i_y = 2/0{,}02 = 100$ *а*, а уравнительный ток в каждой из положительных щеток составляет 200 *а*. Если машина отдает

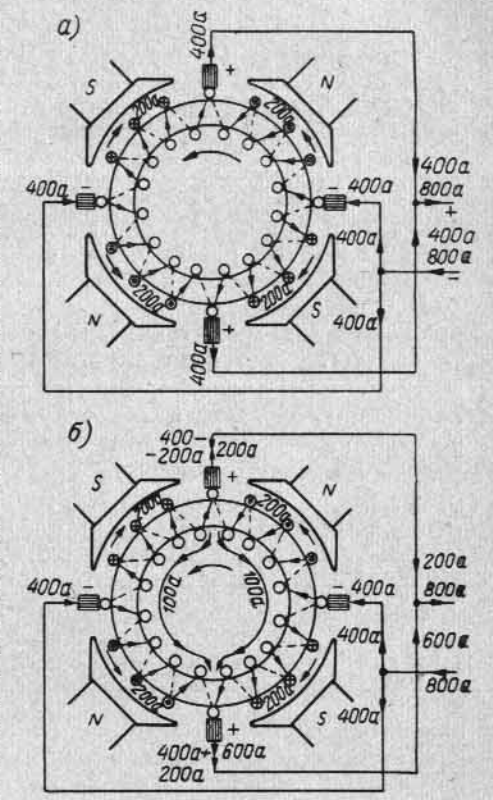


Рис. 3-59. Распределение тока в обмотке якоря: *а* — при симметрии э. д. с. ветвей обмотки; *б* — при несимметрии э. д. с. ветвей обмотки

во внешнюю цепь 800 a, то, как это видно из схемы на рис. 3-59, $б$, уравнительный ток разгружает каждую из верхних ветвей обмотки до 200—100 = 100 a, а каждую из нижних ветвей перегружает до 200 + 100 = 300 a; соответственно верхняя щетка разгружается до 400 — 200 = 200 a, а нижняя щетка перегружается до 400 + 200 = = 600 a, т. е. на 50%, что может вызвать искрение на коллекторе. Кроме того, растут потери в меди обмотки: в машине без уравнительного тока они составляют $4 \cdot 200^2 \cdot 0{,}01 = 1600$ $вт$, а при протекании уравнительного тока они достигают $2 \cdot 100^2 \cdot 0{,}01 + 2 \times 300^2 \cdot 0{,}01 = 2000$ $вт$, что неблагоприятно отражается на тепловом режиме машины и ее к. п. д.

Чтобы частично устранить эти нежелательные явления, нужно заставить уравнительные токи замкнуться внутри якорной обмотки без выхода в щетки и соединительные шины между ними. Для этого нужно найти внутри обмотки якоря точки теоретически равного потенциала и соединить их друг с другом проводниками возможно малого сопротивления. При этом необходимо отметить, что, говоря о равнопотенциальных точках, мы имеем в виду только точки, сравнительно легко доступные. К ним относятся либо концы секций, присоединяемые к коллекторным пластинам, либо лобовые части обмотки со стороны, обратной коллектору, так как точки равного потенциала на участках секций, заложенных в пазы, практически недоступны. Конструктивное выполнение уравнителей — см. ниже рис. 3-63, $а$, $б$, $в$.

Уравнительные соединения могут быть выполнены только в том случае, если простая петлевая обмотка спроектирована с соблюдением сформулированных выше в § 3-15 условий симметрии. В этом случае мы получаем $a = p$ одинаковых многоугольников э. д. с., причем каждый из них имеет только одну точку данного потенциала. Следовательно, число точек равного потенциала, которые мы можем найти в симметричной обмотке, всегда равно $a = p$. Расстояние, на котором находятся две соседние равнопотенциальные точки, определяется так называемым потенциальным шагом $y_п$, измеряемым числом секций или числом коллекторных делений, соответствующих одной паре ветвей, т. е.

$$y_п = S/a = K/a = K/p. \qquad (3\text{-}25)$$

Так, например, обмотка на рис. 3-29 является симметричной, так как в ней соблюдены все условия симметрии (см. § 3-15), а именно:

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{14}{2} = 7 = \text{ц. ч.}; \quad \frac{Z}{a} = \frac{14}{2} = 7 = \text{ц. ч. и } \frac{2p}{a} = \frac{4}{2} = 2.$$

Соответственно данным обмотки потенциальный шаг $y_п = S/a = K/a = 7$. Следовательно, секциями равного потенциала являются секции *1* и 1 + 7 = *8*, затем *2* и 2 + 7 = *9* и т. д. То же можно видеть и из многоугольника э. д. с. секций на рис. 3-31, $б$. На рис. 3-29 показана группа уравнителей *1—8*, *2—9*, *3—10* и т. д., выполненных со стороны, противоположной коллектору.

Выясним роль уравнителей первого рода, имея в виду для простоты кольцевой якорь на рис. 3-59. Соответственно данным обмотки $2p = 4$;

$S = K = 16$; $2a = 2p = 4$ потенциальный шаг обмотки $y_п = S/a = K/a = 8$, т. е. точками (секциями) равного потенциала являются точки, расположенные по диаметру якоря.

Предположим, что в силу неравенства зазоров поток, создаваемый нижней парой полюсов, больше и условно изображается на рис. 3-60, $а$ пятью линиями, а поток верхней пары полюсов меньше и изображается

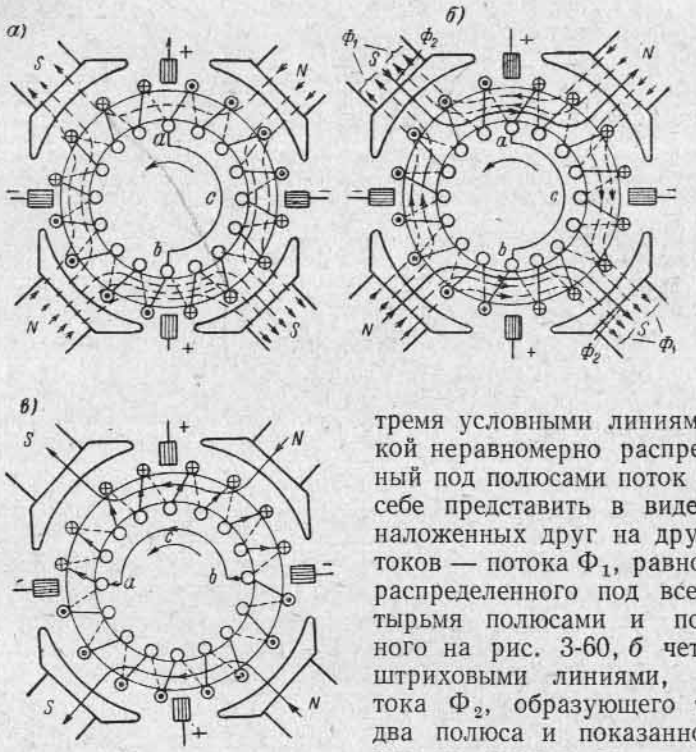


Рис. 3-60. Действие уравнительного тока в машинах с уравнителями первого рода

тремя условными линиями. Такой неравномерно распределенный под полюсами поток можно себе представить в виде двух наложенных друг на друга потоков — потока $Ф_1$, равномерно распределенного под всеми четырьмя полюсами и показанного на рис. 3-60, $б$ четырьмя штриховыми линиями, и потока $Ф_2$, образующего только два полюса и показанного на том же рисунке двумя сплошными жирными линиями. Каждый поток наводит в обмотке якоря свою э. д. с. Э. д. с., создаваемые потоком $Ф_1$, имеют характер, обычный для четырехполюсной машины, и показаны на рис. 3-60, $а$, а э. д. с., создаваемые потоком $Ф_2$, соответствуют двухполюсной машине и показаны на рис. 3-60, $б$.

Мы видим, что в каждой ветви обмотки между точками a и $б$, расположенными по линии вертикального диаметра и теоретически являющимися равнопотенциальными точками, поток $Ф_2$ создает э. д. с. одного знака: в левой части обмотки — знака точки, а в правой — знака креста; следовательно, между точками a и b имеется наибольшая разность потенциалов u_{ab}. После поворота якоря на 180° точки a и b поменяются местами, и напряжение между ними снова достигнет наибольшей величины, но уже другого знака. При дальнейшем

повороте якоря еще на 180° картина будет повторяться. Таким образом, за один полный поворот якоря получается одна полная волна напряжения u_{ab}.

Если мы соединим точки a и b уравнительным проводником, то под действием этого переменного напряжения по обеим половинам обмотки якоря, на которые она делится в точках a и b, потечет переменный ток i_y, замыкаясь через уравнитель acb. Так как индуктивное сопротивление обмотки якоря значительно больше, чем ее сопротивление постоянному току, то ток i_y будет отставать от напряжения u_{ab} почти на 90°. Следовательно, ток i_y достигнет своего наибольшего значения после того, как якорь повернется по направлению вращения на 90°, т. е. в тот момент, когда точки a и b расположатся по линии горизонтального диаметра (рис. 3-60, *в*). В этот момент достигнет наибольшей величины и тот магнитный поток Φ_y, который создается током i_y (две тонкие сплошные линии на рис. 3-60, *в*).

Рассматривая поток Φ_2 на рис. 3-60, *б* и поток Φ_y, созданный током I_y (рис. 3-60, *в*), видим, что они направлены встречно относительно друг друга, так что если бы поток Φ_y был равен по величине потоку Φ_2, то несимметрия магнитного потока была бы полностью устранена. В действительности поток Φ_y только частично сглаживает эту несимметрию, усиливая поток под теми полюсами, где он ослаблен, и ослабляя его там, где он усилен. Этот вывод носит общий характер, и, следовательно, *роль уравнителя первого рода и уравнительного тока состоит в создании такого потока* Φ_y, *который, налагаясь на несимметричный поток машины, стремится сгладить магнитную несимметрию, под действием которой он возникает.*

Один уравнитель не может дать должного эффекта, и поэтому число уравнителей увеличивают. Наибольшее возможное число уравнителей равно K/a, так как каждую коллекторную пластину и, стало быть, каждую секцию в пределах одной пары ветвей можно соединить с соответствующими пластинами или секциями в пределах остальных $a - 1$ пар ветвей. Такие машины называются машинами с полным числом уравнителей. Но при этом довольно велик расход меди и осложняется конструкция и производство машины, поэтому обычно уменьшают число уравнителей, в особенности в машинах с относительно легкими условиями коммутации. Например, в равносекционных обмотках достаточно выполнить по одному уравнителю на паз. На рис. 3-34 показана группа уравнителей со стороны, противоположной коллектору; так как для этой обмотки шаг $y_п = S/a = 28/2 = 14$, то можно соединить секции *1* и *15*, *3* и *17* и т. д. Так же выполняются уравнители и для ступенчатой обмотки.

Кроме того, уравнительный ток в уравнителях вызывает добавочные потери и соответственно увеличивает нагрев обмотки якоря. Однако обычно этого не приходится опасаться, так как относительно большое индуктивное сопротивление обмотки якоря уменьшает уравнительный ток до нескольких процентов от номинального.

Б. Уравнители второго рода. *В простых волновых обмотках* с одной парой ветвей и, следовательно, с одним многоугольником э. д. с. нет двух точек равного потенциала, а потому *не может быть и уравнителей.* Но в сложных волновых обмотках $a > 1$, и поэтому в них могут выполняться уравнители. Однако по сравнению с простыми петлевыми обмотками задача этих уравнителей другая, почему они и называются уравнителями второго рода. В самом деле, в волновых обмотках секции каждой пары ветвей располагаются под всеми полюсами машины; поэтому возможная магнитная несимметрия машины одинаково отражается на всех ветвях обмотки и, следовательно, э. д. с. всех ветвей можно считать практически уравновешенными. Но даже при полном равенстве э. д. с. всех ветвей может иметь место неравномерное распределение токов между отдельными ветвями сложной волновой обмотки. Рассмотрим происходящие явления на примере сложной волновой двукратнозамкнутой обмотки, схема которой представлена на рис. 3-51. Обмотка может быть замещена схемой на рис. 3-61. Здесь r_a — сопротивление одной ветви обмотки якоря; $r_{щ1} - r_{щ4}$ — сопротивления щеточных контактов; E_1 и E_2 — э. д. с. в ветвях обмоток якоря, причем можно считать, что $E_1 = E_2$; i_1 и i_2 — токи в каждой из обмоток, составляющих в целом обмотку якоря.

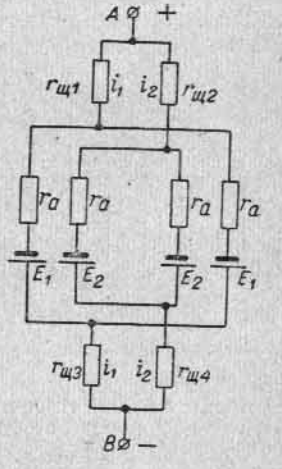


Рис. 3-61. Схема замещения обмотки на рис. 3-51

Напряжение между зажимами A и B

$$u_{AB} = E_1 - i_1\left(r_{щ1} + r_{щ3} + \frac{1}{2}r_a\right) = E_2 - i_2\left(r_{щ2} + r_{щ4} + \frac{1}{2}r_a\right),$$

или, так как $E_1 = E_2$, то

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_{щ2} + r_{щ4} + \frac{1}{2}r_a}{r_{щ1} + r_{щ3} + \frac{1}{2}r_a}.$$

Отсюда следует, что токи распределяются поровну между обмотками только в том случае, если равны суммы сопротивлений: $r_{щ1} + r_{щ3} = r_{щ2} + r_{щ4}$. Так как это равенство практически не имеет места, то всегда возможно неравномерное распределение токов как между обмотками, так и в области короткозамкнутых контуров, которое влечет за собой неравномерное распределение напряжений между соседними коллекторными пластинами, что ухудшает работу машины. Для устранения этого недостатка применяются уравнители второго рода, с помощью которых соединяют такие точки обеих простых обмоток, которые теоретически должны иметь одинаковые потенциалы. Из многоугольника э. д. с. на рис. 3-52, *б* видно, что пластину *4* нужно соединить с пластиной *13*, пластину *5* — с пластиной *14* и т. д., т. е. нужно соединить пластины, находящиеся друг от друга на расстоянии потенциального шага $y_п = S/a = K/a = 18/2 = 9$. При желании, в рассматриваемом случае уравнительные соединения второго рода могут быть выполнены и со стороны, обратной коллектору, как это показано на рис. 3-51 и 3-52.

Таким образом,

разница между уравнителями первого и второго рода состоит в том, что уравнители первого рода выравнивают несимметрию магнитной системы машины, а уравнители второго рода — несимметрию распределения напряжения по коллектору.

В. Уравнители в сложных петлевых обмотках. В машинах со сложными петлевыми обмотками применяются уравнители обоих родов: уравнители первого рода необходимы в каждой из простых петлевых обмоток, а уравнители второго рода — для выравнивания напряжения по коллектору и равномерного распределения токов между отдельными простыми обмотками, поскольку они соединяются друг с другом только через систему щеточных контактов, как это имеет место и в сложных волновых обмотках.

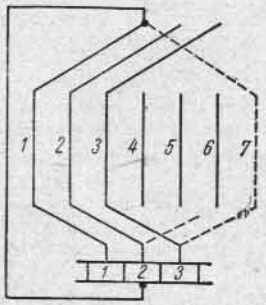


Рис. 3-62. Устройство уравнителей второго рода

Для примера возьмем сложную петлевую двукратнозамкнутую обмотку на рис. 3-47. Одна из простых обмоток присоединена к нечетным коллекторным пластинам и состоит из нечетных секций, другая простая обмотка присоединена к четным пластинам и состоит из четных секций. Соответственно этому два наружных многоугольника э. д. с. на рис. 3-48, *в* относятся к первой обмотке, а два внутренних — ко второй. Из многоугольника э. д. с. видно, что при устройстве уравнителей первого рода мы должны соединить со стороны коллектора или со стороны, противоположной коллектору, секции, находящиеся на расстоянии потенциального шага $y_п = S/a = K/a = 20/2 = 10$, где под a следует понимать число пар ветвей одной простой обмотки, т. е. $a = p = 2$; поэтому мы должны соединить секции *1* и *11*, *3* и *13* и т. д., составляющие первую обмотку, и секции *2* и *12*, *4* и *14* и т. д., составляющие вторую обмотку. Несколько таких уравнителей показано со стороны коллектора на рис. 3-57.

Устройство уравнителей второго рода несколько сложнее. На рис. 3-62 изображены секции *1* и *2* обмотки, показанной на рис. 3-47. Концы секции *1* присоединены не к соседним пластинам, а через одну. Таким образом, между соседними коллекторными пластинами *1* и *2* существует напряжение не полной секции, а лишь ее половины. Для того чтобы обеспечить правильное распределение напряжения между соседними пластинами, нужно соединить середину секции *1*, находящуюся на лобовой части со стороны, противоположной коллектору, с промежуточной пластиной *2*. На рис. 3-47 соединена середина секции *5* с пластиной *6*, середина секции *12* с пластиной *13* и т. д. Так как к промежуточной пластине присоединяется другая простая обмотка, то уравнители второго рода соединяют между собой электрически обе простые обмотки.

Напомним, что схема обмотки на рис. 3-47 выполнена с удлиненным шагом $y_1 = 6$; это позволило получить для нее совершенно одинаковые многоугольники и обеспечило возможность устройства уравнителей второго рода. Наоборот, для обмотки на рис. 3-49 с полным шагом многоугольники э. д. с. обеих простых петлевых обмоток сдвинуты относительно друг друга (рис. 3-50, *б*); следовательно, эти обмотки не имеют доступных равнопотенциальных точек, и выполнение уравнителей второго рода в обмотках подобного типа невозможно. Поэтому схема на рис. 3-49, в противоположность схеме на рис. 3-47 не обеспечивает правильной работы машины и должна быть признана практически непригодной.

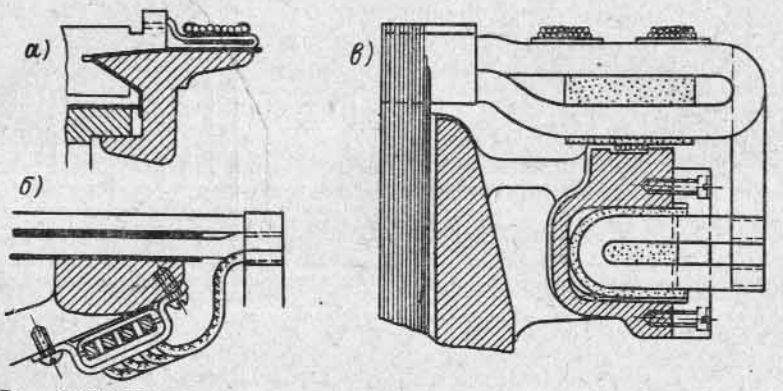


Рис. 3-63. Уравнители: *а* — на стороне коллектора; *б* и *в* — на стороне, противоположной коллектору, соответственно в виде колец и вилок

Уравнители второго рода, так же как уравнители первого рода, часто выполняются в уменьшенном числе, например по одному на паз при равносекционной обмотке.

В машинах большой мощности иногда применяются обмотки, не вполне удовлетворяющие условиям полной симметрии, но обладающие тем преимуществом, что в них могут быть выполнены уравнительные соединения второго рода с одной стороны якоря, как это можно видеть, например, из схемы обмотки на рис. 3-53.

Г. Конструктивное выполнение уравнителей. Уравнители выполняются как со стороны коллектора (рис. 3-63, *а*), так и со стороны, противоположной коллектору, под лобовыми частями обмотки, в виде колец (рис. 3-63, *б*) или в виде вилок (рис. 3-63, *в*). В машинах большой мощности уравнители часто устраиваются так, что они выполняют роль «петушков», как это показано на рис. 3-64.

Наибольшую сложность представляет выполнение уравнителей второго рода в сложных петлевых обмотках (см. рис. 3-47), поскольку приходится соединять точки, находящиеся по обе стороны якоря, и для этого протягивать уравнители через окна между сердечником якоря и валом.

Сечение уравнителя составляет обычно $^1/_4 — {}^1/_2$ сечения проводника обмотки якоря.

Д. Уравнители третьего рода [63]. В сложных петлевых обмотках важно не только соединить отдельные цепи простых обмоток друг с другом, но и обеспечить одинаковую индуктивность короткозамкнутых контуров, что имеет особое значение для получения хорошей коммутации, особенно в машинах большой мощности. Если произвести с помощью уравнительных соединений разделение напряжения каждой секции обмотки, то тогда при вращении якоря будет коммутироваться контур не целой секции, а только ее половины. Если бы машина имела неполное число уравнителей второго рода, то иногда коммутировалась бы полная секция, а иногда ее половина; поэтому такие уравнители, поставленные в ограниченном количестве,

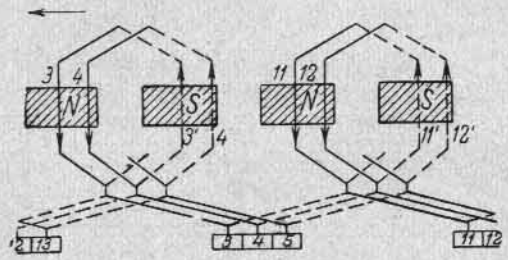


Рис. 3-64. Уравнительные соединения в машинах большой мощности

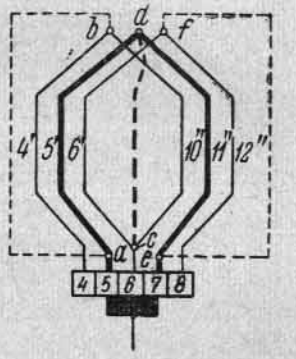


Рис. 3-65. Схема секций двухходовой петлевой обмотки с уравнительными соединениями третьего рода

не могут выполнить в достаточной мере задачи выравнивания самоиндукции всех короткозамкнутых контуров. Эту функцию могут взять на себя уже уравнительные соединения третьего рода, которые для схемы на рис. 3-47 будут выполнять одновременно и задачу уравнительных соединений второго рода.

На рис. 3-65 представлен участок схемы двукратнозамкнутой петлевой обмотки, показанной на рис. 3-47, из которого видно, что по всем путям щетки замыкают между соседними коллекторными пластинами полусекции обмоток, а именно:

пл. $5 — a — 5' — d — c —$ пл. 6;
пл. $5 — a — b — 10'' — c —$ пл. 6;
пл. $6 — c — 6' — f — e —$ пл. 7;
пл. $6 — c — d — 11'' — e —$ пл. 7.

Если бы среднее соединение $c — d$ отсутствовало, то первый и четвертый пути имели бы заметно большую индуктивность:

пл. $5 — a — 5' — 11'' — e — f — 6' — c —$ пл. 6;
пл. $6 — c — 10'' — b — a — 5' — 11'' — e —$ пл. 7.

3-17. Специальная обмотка барабанного якоря смешанного типа (лягушечья обмотка) [64 в, 65, 70]

В машинах постоянного тока большой мощности иногда применяют смешанную или так называемую лягушечью обмотку якоря, представляющую собой такое сочетание простой петлевой и сложной волновой обмоток, при котором удается обойтись без специальных уравнителей. Обе обмотки присоединяются к одному и тому же коллектору и, так как в простой петлевой обмотке $a = p$ параллельных ветвей, то и сложная волновая обмотка должна быть выполнена с тем же числом параллельных ветвей $a = p$. Кроме того, обе обмотки состоят из одинакового числа секций и каждая из них служит для проведения половины общего тока.

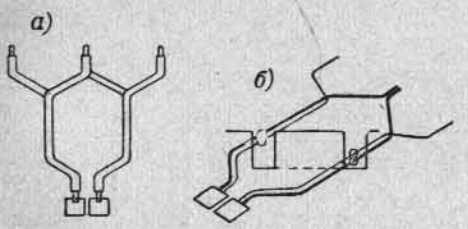


Рис. 3-66. Секция обмотки смешанного типа (*а*); расположение секции в пазах (*б*)

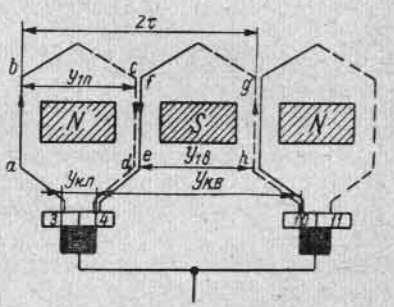


Рис. 3-67. Схема обмотки смешанного типа (лягушечья обмотка)

Конструктивно секции обеих сторон объединяются в общие шаблоны, укладываемые совместно в пазы якоря в четыре слоя (рис. 3-66, *а*, *б*).

На рис. 3-67 показано распределение секций петлевой и волновой обмоток. Из схемы видно, что секция петлевой обмотки и следующая за нею по схеме секция волновой обмотки образуют контур *abcdefgh*, замкнутый через щетки и соединительную шину между ними. Для предупреждения возникновения в этом контуре уравнительного тока нужно, чтобы сумма э. д. с. в секциях, образующих этот контур, была равна нулю. Но в сторонах *cd* и *ef*, находящихся в одном пазу, действуют равные по величине и встречно по контуру направленные э. д. с.; следовательно, нужно получить тот же эффект и в сторонах *ab* и *gh*, а для этого следует поместить их на расстоянии, равном точно 2τ. Если по-прежнему будем измерять шаги обмотки по якорю числом элементарных пазов, или, что то же, числом коллекторных делений, то, как это непосредственно следует из рис. 3-67,

$$y_{1п} + y_{1в} = Z_э/p = K/p. \qquad (3\text{-}26)$$

Здесь буква «п» относится к петлевой обмотке, «в» — к волновой.

Шаг по коллектору должен соответствовать результирующему шагу обмотки по якорю. Следовательно,

$$y_{к.\,п} + y_{к.\,в} = K/p. \qquad (3\text{-}27)$$

Кроме того, в соответствии с формулами (3-16) и (3-13) имеем:

$$y_{к.\,п} = y_п = y_{1п} + y_{2п} \quad \text{и} \quad y_{к,\,в} = y_в = y_{1в} + y_{2в}.$$

Складывая почленно два последние равенства и учитывая (3-26) и (3-27), находим:

$$y_{2п} + y_{2в} = 0, \tag{3-28}$$

т. е. вторичные шаги обеих обмоток должны быть равны между собой по абсолютной величине.

Чтобы выяснить роль каждой обмотки в отношении другой, выполним смешанную обмотку по данным: $2p = 4$; $S = K = Z_э = 14$; $u = 1$; $Z = 14$; $2a = 4$.

Шаги петлевой обмотки:

$$y_{к.\,п} = y_п = +1; \quad y_{1п} = \frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon = \frac{14}{4} + \frac{2}{4} = 4;$$

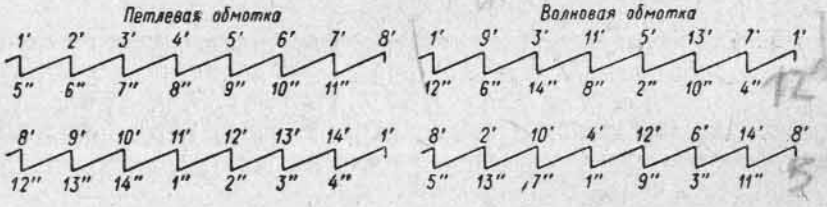
$$y_{2п} = y_п - y_{1п} = 1 - 4 = -3.$$

Шаги волновой обмотки:

$$y_{к.\,в} = y_в = \frac{K \mp a}{p} = \frac{14-2}{2} = 6; \quad y_{1в} = \frac{14}{4} - \frac{2}{4} = 3;$$

$$y_{2в} = y_в - y_{1в} = 6 - 3 = 3.$$

Развернутая схема обмотки изображена на рис. 3-68. Соединения обмоток имеют вид, представленный ниже:



Так как потенциальный шаг каждой из обмоток $y_п = 14/2 = 7$, то пластины *4* и *11* на рис. 3-68 являются равнопотенциальными и могли бы быть соединены уравнителем первого рода с шагом $y_п = 7$, но вместо этого пластины *4* и *10* соединяются с помощью секции волновой обмотки с шагом этой обмотки по коллектору $y_{к.\,в} = 6$, а пластины *10* и *11* соединяются с помощью секции петлевой обмотки с шагом по коллектору $y_{к.\,п} = 1$ (см. рис. 3-67). Так как в секции волновой обмотки наводится такая же э. д. с., как и в секции петлевой обмотки, но обратного по отношению к последней знака, то при одинаковых распределениях индукции под одноименными полюсами *в секции волновой обмотки не будет уравнительного тока*, и, следовательно, она является *уравнителем первого рода по отношению к петлевой обмотке*. Соответственно к пластинам *3* и *4* присоединены секции двух самостоятельных ветвей волновой обмотки, но эти же пластины соединены секцией петлевой обмотки с равной, но противоположной по направлению э. д. с.; поэтому эта *секция петлевой обмотки является уравнителем второго рода по отношению к волновой обмотке*.

Таким образом, разница в условиях работы обычных уравнительных соединений и каждой из обмоток по отношению к другой в качестве уравнительных соединений в смешанной обмотке состоит лишь в том, что уравнители обычного типа соединяют между собой точки равного потенциала, а в обмотке смешанного типа соединяются точки,

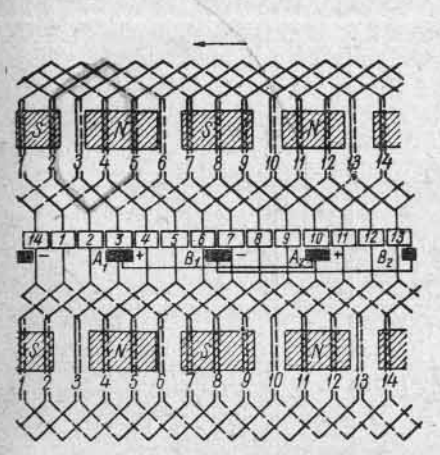


Рис. 3-68. Развернутая схема смешанной обмотки: $2p = 2a = 4$; $S = K = Z_э = 14$; $u = 1$; $Z = 14$

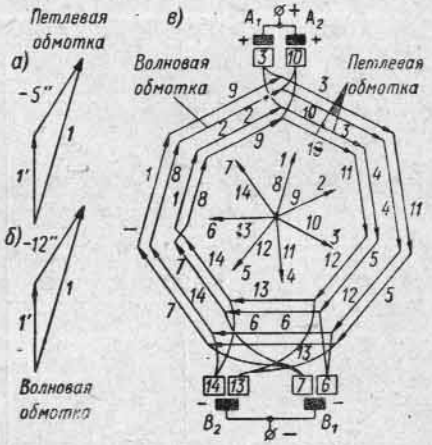


Рис. 3-69. Диаграммы э. д. с. секций петлевой (*а*) и волновой (*б*) обмоток по рис. 3-68, звезда и многоугольники (*в*) э. д. с. секций

между которыми имеется известная разность потенциалов, уравновешиваемая встречно действующей по уравнительному контуру э. д. с.

На рис. 3-69, *а*, *б*, *в* построены обычным образом диаграммы э. д. с. секций петлевой и волновой обмоток, звезда и соответственно многоугольник секционных э. д. с. Мы видим, что многоугольники петлевой и волновой обмоток совпадают (на рисунке они подобны), причем результирующие э. д. с. всех ветвей равны по величине и одинаково направлены, т. е. обмотка является уравновешенной.

В мощных машинах со смешанной обмоткой иногда ставятся безындукционные уравнительные соединения первого рода со стороны коллектора. Это вызвано тем, что секции волновой обмотки, выполняющие для петлевой обмотки роль уравнительных соединений первого рода, и секции петлевой обмотки, выполняющие для волновой обмотки роль уравнительных соединений второго рода, обладают определенной самоиндукцией, что затрудняет работу этих секций как уравнительных соединений.

3-18. Сравнительные характеристики обмоток различных типов

В табл. 3-1 даны все характерные особенности рассмотренных выше обмоток и указаны основные области применения последних. В данном случае мы ориентировочно считаем, что к машинам малой мощности относятся машины до 50 *квт*, средней мощности — от 50 до 500 *квт* и большой мощности — от 500 *квт* и выше. Равным образом мы относим к машинам постоянного тока низкого напряжения машины до 24 *в* включительно, пониженного напряжения — от 60 до 80 *в*, нормального — от 110 до 220 *в*, повышенного — от 440 до 600 *в* и высокого — от 750 *в* и выше.

Таблица 3-1

Название обмотки	$u_к = y$	y_1	y_2	Число пар ветвей a	Основная область применения
Простая петлевая	± 1	$\frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon$	$\pm 1 - y_1$	p	Машины средней мощности нормального напряжения и большой мощности повышенного напряжения
Сложная петлевая	$\pm m$	$\frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon$	$\pm m - y_1$	mp	Машины малой мощности весьма низкого напряжения и машины большой мощности нормального, пониженного и низкого напряжения
Простая волновая	$\frac{K \pm 1}{p}$	$\frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon$	$y - y_1$	1	Машины малой мощности нормального напряжения и машины средней мощности повышенного и высокого напряжения
Сложная волновая	$\frac{K \mp a}{p}$	$\frac{Z_э}{2p} \mp \varepsilon$	$y - y_1$	m	Машины средней мощности повышенного напряжения
Смешанная	± 1 и $\frac{K \mp a}{p}$	$y_{1п} + y_{1в} = \frac{K}{p}$	$y_{2п} = y_{2в}$	p	Машины большой мощности

3-19. Э. д. с. обмотки барабанного якоря

Разница между кольцевой и барабанной обмотками заключается главным образом в том, что при одинаковом числе секций число активных проводников N в барабанной обмотке получается удвоенным, поскольку в этом случае нижняя сторона секции, укладываемая в паз, оказывается рабочей, в то время как при кольцевой обмотке нижняя сторона секции уже не является активной.

Так как обмотка барабанного якоря принципиально не отличается от обмотки кольцевого якоря, то э. д. с. барабанного якоря определяется по той же формуле (3-10), что и э. д. с. кольцевого якоря, а именно:

$$E_a = pn \frac{N}{a} \Phi. \qquad (3\text{-}29)$$

Эта формула дает значение э. д. с. в вольтах, если поток Ф выражается в веберах. Если же поток выражается в максвеллах, то в формулу (3-29) вводится переводный коэффициент 10^{-8} ($1\ вб = 10^8\ мкс$).

Так же как и для кольцевого якоря, под Ф в формуле (3-29) следует понимать п о л е з н ы й поток. При заданном основном магнитном потоке Φ_0 (определение этого потока — см. § 2-1) полезный поток барабанного якоря зависит: а) от положения щеток на коллекторе и б) от величины первого частичного шага обмотки якоря y_1. Если $y_1 = \tau$ и щетки стоят на нейтрали (рис. 3-70), то полезным является весь основной поток, определяемый площадью трапецеидальной кривой $ABCDA$. Если $y_1 < \tau$, но щетки стоят на нейтрали, то полезной является только часть основного потока, соответствующая заштрихованной части площади $ABCDA$ на рис. 3-70; то же имеет место и при $y_1 > \tau$. Если же мы сдвинем щетки с нейтрали, то, как это было показано уже ранее на рис. 3-14, *б*, магнитный поток, полезно используемый обмоткой якоря для создания э. д. с., опять-таки уменьшается. Таким образом, в машинах нормального исполнения шаг y_1 не должен сколько-нибудь заметно отличаться от полюсного деления, а щетки должны стоять при холостом ходе машины по линиям геометрических нейтралей.

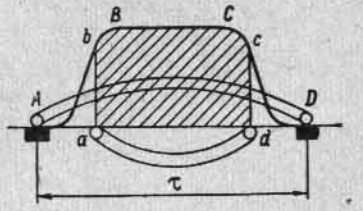


Рис. 3-70. Полезный поток в зависимости от шага обмотки

Так как в исполненной машине $p \frac{N}{a} = \text{const} = C_e$, то формулу (3-29) можно представить в виде:

$$E_a = C_e n \Phi. \qquad (3\text{-}30)$$

Глава четвертая

РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

4-1. Намагничивающая сила машины при нагрузке

Когда машина работает вхолостую, в ней существует только н. с. основных полюсов, создающая основной поток Φ_0.

При нагрузке, когда по обмотке якоря протекает ток, возникает н. с. якоря, взаимодействующая с основной н. с. Поэтому магнитный поток Ф, который существует в машине при работе ее под нагрузкой,

следует рассматривать как результирующий поток, созданный результирующей н. с.

Воздействие н. с. якоря на основную н. с. называется реакцией якоря.

При анализе этого явления мы воспользуемся методом наложения, который состоит в том, что мы строим отдельно картину основного поля и отдельно картину поля якоря, а затем совмещаем их в картину результирующего магнитного поля машины. Этот метод дает правильные результаты в том случае, *если при наложении параметры машины не изменяются*. В рассматриваемом случае таким

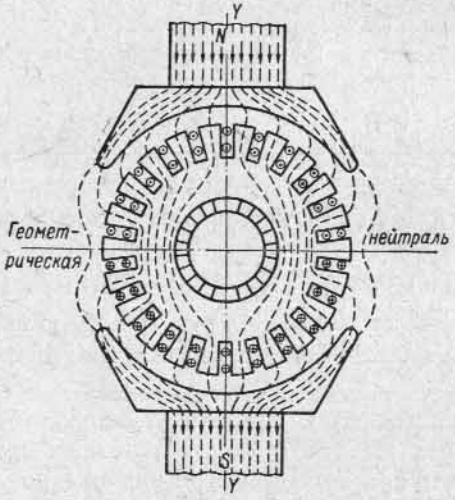


Рис. 4-1. Основное поле

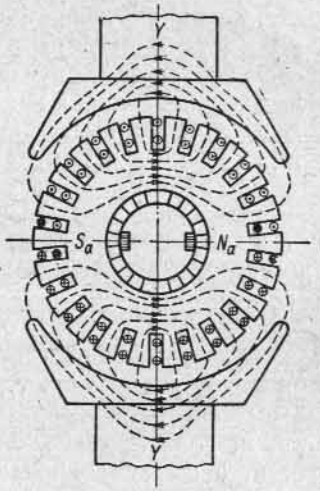


Рис. 4-2. Поле якоря

параметром является степень насыщения магнитной цепи машины, которую сначала будем считать постоянной величиной ($\mu = \text{const}$).

А. Основное поле машины. Основное поле возникает при холостом ходе возбужденной машины. Картина этого поля в двухполюсной машине показана на рис. 4-1. Поле имеет симметричный характер относительно осевой линии основных полюсов, занимающих в пространстве неизменное положение.

При вращении якоря против часовой стрелки в обмотке якоря наводится э. д. с. в направлениях, показанных на рис. 4-1. Положение щеток в данном случае безразлично.

Б. Поле якоря. Предположим, что машина не возбуждена и не вращается ($i_в = 0$, $n = 0$). Поставим щетки по линии геометрической нейтрали и подведем к ним ток от какого-нибудь источника постоянного тока таким образом, чтобы направление токов в ветвях обмотки совпало с направлением э. д. с. на рис. 4-1. Поле, создаваемое этими токами, располагается симметрично относительно средних точек обеих ветвей обмотки (рис. 4-2). Легко заметить, что правая половина якоря

приобретает северную полярность N_a, а левая — южную S_a, причем ось поля якоря совпадает с линией щеток.

Для количественного анализа поля якоря нужно определить н. с. якоря. С этой целью *приводят действительный зубчатый якорь к гладкому с равномерно распределенным по окружности якоря слоем проводников, но с тем же расчетным зазором* δ', *что и в действительной машине.*

Если N — число проводников обмотки и i_a — ток в одном проводнике (в ветви), то на единицу длины окружности якоря имеем:

$$A = \frac{Ni_a}{\pi D_a}, \qquad (4\text{-}1)$$

где D_a — диаметр якоря.

Величина A называется линейной нагрузкой якоря и представляет собой одну из важнейших в электромашиностроении величин. Так как число проводников не имеет размерности, то величину A можно измерять, так же как величину H, в амперах на единицу длины. В современных высокоиспользованных машинах постоянного тока линейная нагрузка колеблется в пределах от 100 *а/см* в машинах малой мощности до 600 *а/см* и выше в машинах большой мощности.

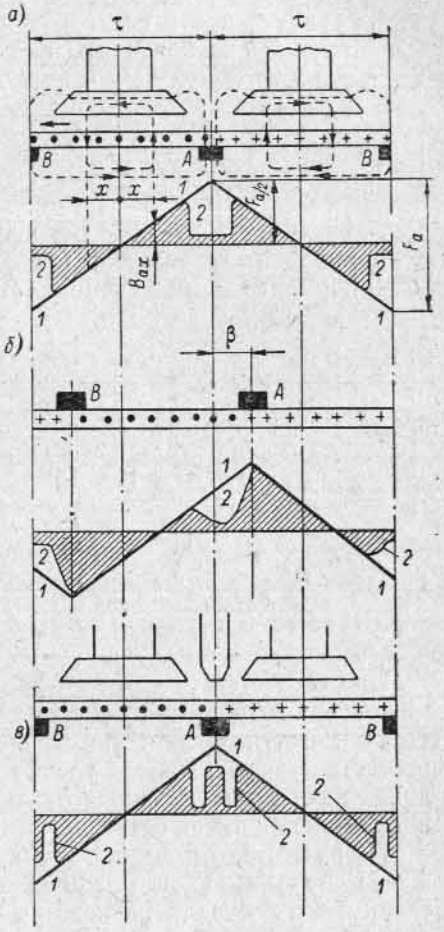


Рис. 4-3. Кривые н. с. и индукции поля якоря: *а* — в машине без добавочных полюсов при щетках на нейтрали; *б* — то же при щетках, сдвинутых с нейтрали; *в* — в машине с невозбужденными добавочными полюсами при щетках на нейтрали

Расчет н. с. якоря мы будем вести на пару полюсов при условии, что щетки находятся на линии геометрической нейтрали и шаг обмотки $y_1 = \tau$. В этом случае средняя точка каждой ветви обмотки якоря находится как раз на осевой линии соответствующего полюса (рис. 4-3,*а*). Линии (трубки) поля якоря располагаются симметрично по обе стороны этой точки. Пусть одна из таких линий находится на расстоянии x от средней точки. Н. с. F_{ax} вдоль контура этой линии равна полному току, охватываемому этим контуром, и, следовательно, составляет $A \cdot 2x$ ампер на

пару полюсов, т. е.

$$F_{ax} = A \cdot 2x. \qquad (4\text{-}2)$$

Отступая от средней точки по обе ее стороны, находим, что кривая н. с. якоря представляет собой ломаную линию *1—1—1*, проходящую через ось абсцисс в средней точке между щетками и достигающую максимума F_a на каждой из щеток, т. е. при $x = \tau/2$. Подставив это значение x в формулу (4-2), имеем на пару полюсов:

$$F_a = A \cdot 2x = A \cdot 2\frac{\tau}{2} = A\tau. \qquad (4\text{-}3)$$

В пределах полюсного наконечника каждая магнитная линия два раза проходит через зазор и замыкается по стали якоря и полюса. При нормальных насыщениях стали ее магнитным сопротивлением можно пренебречь и считать, что сопротивление для магнитной линии реакции якоря определяется только сопротивлением двойного зазора. Следовательно, в любой точке под полюсным наконечником магнитная индукция B_{ax} будет

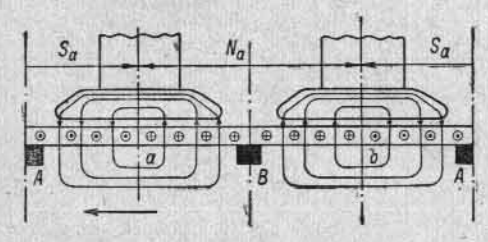


Рис. 4-4. Э. д. с., наводимые в обмотке якоря полем якоря

$$B_{ax} = \mu_0 H_{ax} = \mu_0 \frac{F_{ax}}{2\delta'} = \mu_0 \frac{A}{\delta'} x.$$

При соответствующем выборе масштаба кривая н. с. на рис. 4-3, *а* может служить в пределах полюсной дуги кривой индукции B_{ax}. Но в междуполюсном пространстве индукция резко уменьшается вследствие значительного увеличения длины магнитной линии в воздухе, и, стало быть, магнитного сопротивления; поэтому кривая *2* индукции B_{ax} имеет седлообразный характер.

На рис. 4-3, *б* и *в* показаны кривые н. с. и индукции поля якоря в двух случаях: 1) когда машина не имеет добавочных полюсов и щетки сдвинуты с нейтрали на некоторый угол β и 2) когда машина имеет добавочные полюсы и щетки стоят на нейтрали. Добавочные полюсы, так же как и основные, не возбуждены.

Кривые н. с. индукции на рис. 4-3 построены в предположении, что якорь неподвижен. Если якорь приведен во вращение и щетки стоят на нейтрали, то линии поля якоря располагаются симметрично относительно оси полюсов (рис. 4-4); поэтому в одной половине каждой ветви обмотки якоря наводятся э. д. с. одного знака, а в другой половине — другого. Следовательно, результирующая э. д. с. ветви и, стало быть, напряжение на щетках равны нулю.

К этому выводу можно прийти и другим путем. Рассматривая кривую индукции на рис. 4-3, *а*, видим, что между щетками *A* и *B* находятся равные участки поля якоря. Между одной парой щеток индукция поля сначала имеет положительный знак, потом — отрицательный, а между следующей парой щеток — наоборот. Следовательно, результирующий поток на участке обмотки между щетками и напряжение на щетках равны нулю.

При сдвиге щеток с нейтрали (рис. 4-3, *б*) картина изменяется. Теперь уже участки поля якоря разных знаков, находящиеся между щетками *B* и *A*, не равны по величине — участок поля ниже оси абсцисс больше участка поля над нею, соответственно чему на щетках появляется некоторое напряжение. При сдвиге щеток в обратном направлении относительно нейтрали (угол — β) напряжение на щетках изменяет свой знак.

Влияние э. д. с., создаваемой полем якоря, на основную э. д. с., создаваемую основным полем машины, зависит от режима работы машины. Этот вопрос рассматривается ниже.

4-2. Поперечная и продольная н. с. якоря

Если щетки стоят по линии геометрической нейтрали *X—X*, (рис. 4-5, *а*), то поле якоря направлено под углом 90°, т. е. *поперек осевой линии основных полюсов Y—Y*. Поэтому такое поле якоря называется п о п е р е ч н ы м и определяется п о п е р е ч н о й н. с. якоря F_{aq}.

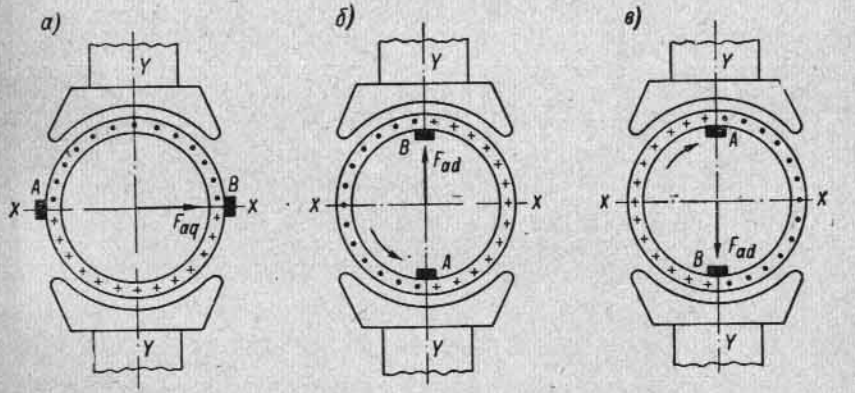


Рис. 4-5. Н. с. поперечной и продольной реакции якоря

Согласно формуле (4-3) имеем на пару полюсов:

$$F_{aq} = F_a = A\tau. \qquad (4\text{-}4)$$

Положение щеток по линии геометрической нейтрали является их первым основным положением.

При сдвиге щеток с нейтрали на угол $\pm 90°$ ось поля якоря устанавливается по оси полюсов *Y—Y* вверх или вниз от оси абсцисс (рис. 4-5, *б* и *в*). Такое поле якоря называется п р о д о л ь н ы м и определяется п р о д о л ь н о й н. с. я к о р я F_{ad}. На пару полюсов имеем:

$$F_{aq} = F_a = A\tau. \qquad (4\text{-}5)$$

Положение щеток по осевой линии полюсов является их вторым основным положением.

В общем случае щетки могут быть сдвинуты с нейтрали на угол β или соответственно по окружности якоря на дугу b_c (рис. 4-6, *а*, *б*). В этих условиях можно рассматривать якорь как два совмещенных электромагнита, из которых один, образованный частью обмотки, находящейся в двойном угле 2β, создает продольную н. с. якоря F_{ad}, а другой, образованный остальной частью обмотки по дуге $\tau - 2b_c$, создает поперечную н. с. якоря F_{aq}. Так как сдвигу щеток на единицу

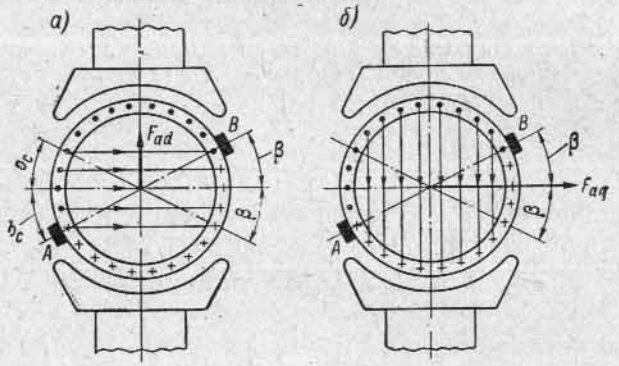


Рис. 4-6. Продольная и поперечная н. с. якоря при сдвиге щеток с нейтрали

длины соответствует н. с. $2A$, то при сдвиге щеток на b_c таких же единиц длины имеем на пару полюсов:

$$F_{ad} = 2Ab_c \qquad (4\text{-}6а)$$

и

$$F_{aq} = A(\tau - 2b_c). \qquad (4\text{-}6б)$$

4-3. Реакция якоря в генераторе

В машине, работающей под нагрузкой, н. с. якоря вступает во взаимодействие с н. с. основных полюсов и образует совместно с последней результирующую н. с. машины. Но в общем случае результирующий поток машины зависит как от результирующей н. с., так и от возможного при этом изменения магнитного сопротивления магнитной цепи машины.

Рассмотрим несколько важнейших случаев реакции якоря, предположив, что машина работает в режиме генератора и вращается против часовой стрелки с некоторой постоянной скоростью, причем добавочные полюсы отсутствуют.

А. Щетки стоят на нейтрали и сопротивление магнитной цепи не зависит от нагрузки (μ = const). На рис. 4-7, *а* кривая *1* изображает распределение основного магнитного поля генератора в зазоре под парой полюсов.

При вращении якоря в заданном направлении в левой ветви обмотки якоря наводятся э. д. с., направленные к нам, а в правой — от нас. В том же направлении текут по обмотке и токи. Средняя точка каждой ветви обмотки, вокруг которой образовываются линии поля якоря, лежит на оси соответствующего полюса. Определив обычным образом направление линии поля якоря, мы видим, что *на набегающих краях полюсов поле якоря действует встречно, т. е. размагничивающе в отношении основного поля, а на сбегающих краях полюсов — согласно, т. е. намагничивающе.* Соответственно строится кривая *2* поля реакции якоря, имеющая тот же седлообразный характер, что и на рис. 4-3, *а*.

Так как согласно условию μ = const, то для получения результирующего поля достаточно произвести сложение обеих составляющих полей путем сложения ординат в каждой точке под обоими полюсами. Полученная таким путем кривая *3* охватывает площадь, равную площади, охватываемой кривой *1*, так как размагничивающий и намагничивающий эффекты по обе стороны от оси полюса взаимно компенсируются. Следовательно, результирующий поток Ф, определяемый площадью кривой *3*, остается равным основному потоку Φ_0, определяемому площадью кривой *1*.

Таким образом, *в машине с ненасыщенной магнитной цепью при щетках, установленных по линии геометрической нейтрали, поперечная реакция якоря искажает основное поле, но не изменяет его по величине.*

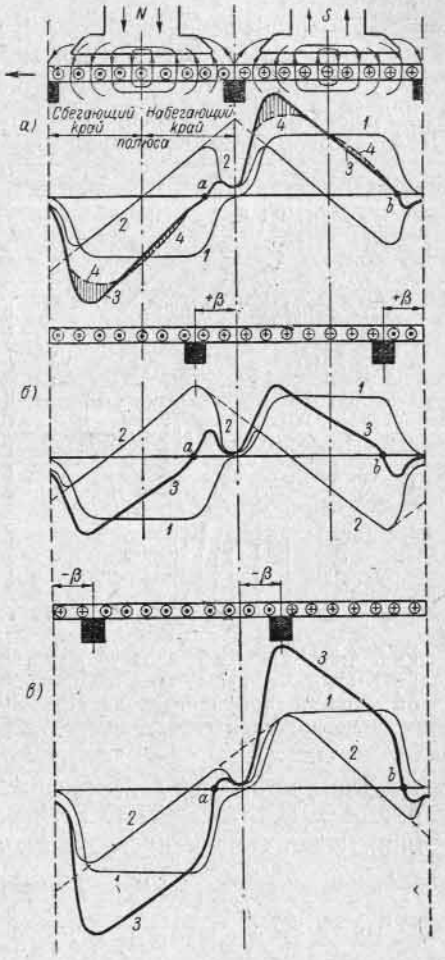


Рис. 4-7. Кривые полей генератора при различных положениях щеток

На рис. 4-8 изображена картина распределения результирующего поля генератора, соответствующая рассматриваемым условиям его работы.

Точки *а* и *b*, в которых кривая результирующего поля проходит через нуль (рис. 4-7, *а*), определяют положение так называемой физической нейтрали. При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической, а при нагрузке она смещается по

направлению вращения якоря на некоторый угол α (рис. 4-8).

Сделанный вывод носит общий характер, т. е. он остается справедливым независимо от полярности полюсов и направления вращения якоря.

Б. Машина работает в режиме генератора, щетки стоят на нейтрали, но сопротивление магнитной цепи зависит от нагрузки ($\mu \neq$ const). В данном случае, так же как и в первом, существует только поперечная н. с. якоря. Но при *насыщенной магнитной цепи машины уже нельзя получать результирующее поле путем сложения составляющих полей*, так как магнитное сопротивление насыщенных участков магнитной цепи, т. е. сбегающих краев полюсов (рис. 4-7, *а*), растет быстрее, чем оно уменьшается под набегающими краями полюсов. Поэтому уменьшение поля в насыщенной части цепи (заштрихованные площадки слева от осей полюсов, рис. 4-7, *а*) больше, чем увеличение его под другим краем полюса (заштрихованные площадки справа от осей полюсов). Вследствие этого результирующее поле и соответственно э. д. с. генератора E_a несколько уменьшаются даже при положении щеток на геометрической нейтрали. На этом основании можно говорить о размагничивающем действии поперечной реакции якоря в машине с насыщенной магнитной цепью.

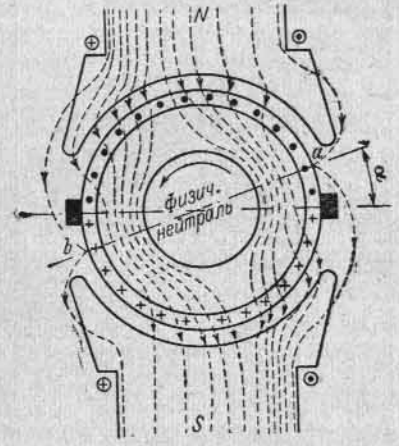


Рис. 4-8. Картина распределения результирующего магнитного поля машины при щетках на геометрической нейтрали

Для учета этого действия рассмотрим магнитную цепь машины на рис. 4-9. Н. с. по замкнутому контуру *abcda* (сплошная жирная линия) может быть написана в виде:

$$F_0 = F_{ab} + F_{bc} + F_{cd} + F_{da}. \qquad (4\text{-}7)$$

Здесь $F_{ab} = F_\delta + F_з = F_{\delta\,з.\,о}$ представляет собой н. с. зазора и зубцов в осевой плоскости полюса.

Если машина работает в режиме холостого хода, то н. с. $F_{\delta\,з.\,о}$ действует в любой точке под полюсным наконечником. Задаваясь различными значениями B_δ, мы можем построить кривую $B_\delta = f(F_{\delta\,з.\,о})$. Такая кривая называется переходной характеристикой машины (рис. 4-10, *а*).

При нагрузке н. с. $F_{\delta\,з.\,о}$ действует только в осевой плоскости полюса на отрезке *ab* (см. рис. 4-9), тогда как в других точках действуют другие н. с. Возьмем, например, точку *f*, находящуюся на расстоянии *x* от оси полюсов и образуем на рис. 4-9 дополнительный контур *afgc*,

показанный штриховой линией. Тогда н. с. вдоль замкнутого контура *afgcda* будет $F_0 \pm Ax$, смотря по тому, на каком краю полюса — сбегающем или набегающем — находится точка *f*.

Следовательно,

$$F_0 \pm Ax = F_{af} + F_{fg} + F_{gc} + F_{cd} + F_{da}. \qquad (4\text{-}8)$$

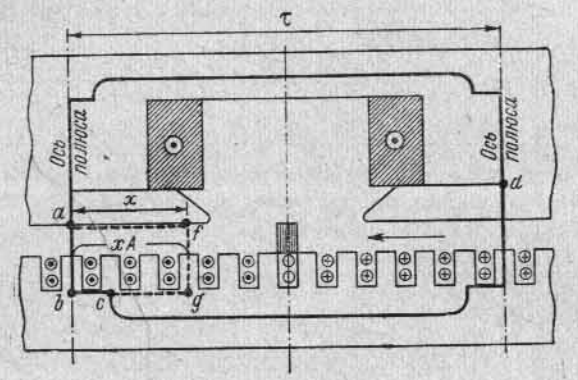


Рис. 4-9. Действие поперечной реакции якоря

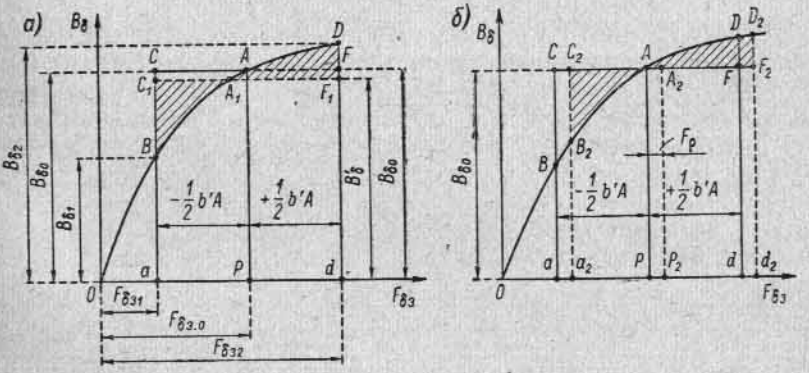


Рис. 4-10. Определение размагничивающего действия поперечной реакции якоря

Вычитая из равенства (4-8) равенство (4-7) и пренебрегая н. с. F_{af}, F_{bc} и F_{gc} как величинами второго порядка, получаем

$$F_{fg} = F_{ab} \pm Ax = F_{\delta\,з.\,о} \pm Ax.$$

Это равенство позволяет определить с помощью переходной характеристики индукцию $B_{\delta x}$ в любой точке зазора соответственно заданным условиям работы машины под нагрузкой.

Предположим, что при холостом ходе точка *A* на переходной характеристике (рис. 4-10, *а*) определяет индукцию в зазоре $B_{\delta 0} = AP$ соответственно н. с. $F_{\delta\,з.\,о} = OP$.

Пусть нагрузка машины и, следовательно, ее линейная нагрузка A заданы. В точках, находящихся на расстоянии $x = \pm \frac{1}{2} b'$ от оси полюса, имеем:

$$F_{\delta 31} = F_{\delta\,3.\,0} - \frac{1}{2} b'A \text{ и } F_{\delta\,32} = F_{\delta\,3.\,0} + \frac{1}{2} b'A.$$

Чтобы получить эти н. с. на рис. 4-10, *а*, откладываем по обе стороны от точки P отрезки $Pa = -\frac{1}{2} b'A$ и $Pd = +\frac{1}{2} b'A$. Тогда $F_{\delta 31} = Oa$ и $F_{\delta 32} = Od$; соответственно отрезки aB и dD определяют индукции $B_{\delta 1}$ и $B_{\delta 2}$ под набегающим и сбегающим краями полюсного наконечника. Рассуждая аналогично, найдем, что участок BAD переходной характеристики дает нам распределение магнитной индукции в зазоре под полюсным наконечником при заданной нагрузке.

Так как прямоугольник $aCFd$ имеет основание, пропорциональное дуге b', а высоту, равную $B_{\delta 0}$, то его площадь может служить мерой потока Φ_0 при холостом ходе. Равным образом площадь криволинейного четырехугольника $ABDd$ служит мерой потока при нагрузке. Если машина насыщена, то площадка $ACB > AFD$; следовательно, при заданном возбуждении нагрузка вызывает в рассматриваемом случае уменьшение потока в зазоре и соответственно э. д. с. машины E_a.

Чтобы определить уменьшение потока или э. д. с. E_a, опустим линию CAF в положение линии $C_1A_1F_1$, при котором площадка BC_1A_1 будет равна площадке A_1F_1D. В этом случае площадь криволинейного четырехугольника $aBDd$ равна площади прямоугольника aC_1F_1d и меньше площади прямоугольника $aCFd$ в отношении $B'_\delta/B_{\delta 0}$; в том же отношении уменьшается и э. д. с. E_a.

Чтобы получить под нагрузкой ту же величину э. д. с. E_a, что и при холостом ходе, нужно несколько увеличить ток возбуждения машины и, стало быть, н. с. полюсов. Для определения этого увеличения достаточно передвинуть вправо прямоугольник $aCFd$ так, чтобы площадка AC_2B_2 была равна площадке AF_2D_2 (рис. 4-10, *б*). В этом случае площади прямоугольников $aCFd$ и $a_2C_2F_2d_2$ и криволинейного четырехугольника $a_2B_2D_2d_2$ равны и, следовательно, поток в зазоре, а равно и э. д. с. E_a возвращаются к своему первоначальному значению за счет увеличения н. с. основных полюсов на величину $F_\rho = AA_2$.

Существуют и другие способы определения н. с. F_ρ, в частности способ, предложенный В. Т. Касьяновым [84].

В. Машина работает в режиме генератора, щетки сдвинуты с нейтрали по направлению вращения якоря. В этом случае н. с. реакции якоря разлагается на поперечную н. с. $F_{aq} = A(\tau - 2b_c)$ и продольную н. с. $F_{ad} = 2Ab_c$ [см. формулы (4-6а) и (4-6б)]. Поперечная реакция якоря действует так же, как в рассмотренных выше двух случаях, т. е. искажает основное поле. Что же касается продольной н. с., то она создается проводниками, расположенными в пределах двойного угла β и действует встречно относительно основной н. с. F_0 (рис. 4-11). Этот вывод носит общий характер, т. е. *при сдвиге щеток*

с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря в генераторе возникает продольная размагничивающая реакция якоря.

Соответственно *при сдвиге щеток против направления вращения якоря возникает продольная намагничивающая реакция якоря.* Кривые полей, отвечающие этим двум случаям, показаны на рис. 4-7, *б* и *в*. Необходимо, однако, отметить, что сдвиг щеток в генераторе против направления вращения якоря не допускается из коммутационных соображений, о чем подробнее см. в гл. 5.

Действие продольной реакции якоря учитывается с помощью кривой намагничивания $\Phi = f(F)$ на рис. 4-12. Пусть при холостом

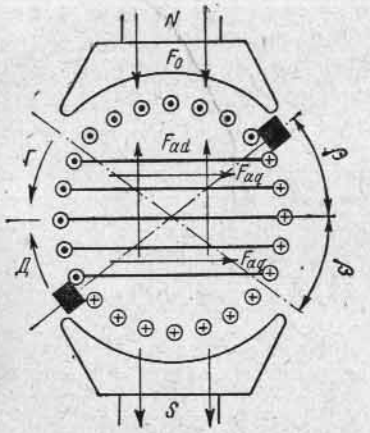


Рис. 4-11. Продольная реакция якоря в генераторе

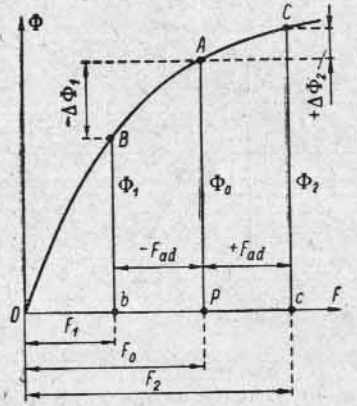


Рис. 4-12. Действие продольной реакции якоря

ходе н. с. $F_0 = OP$ и поток $\Phi_0 = AP$; тогда при нагрузке имеем: $F_1 = F_0 - F_{ad}$ или $F_2 = F_0 + F_{ad}$; в первом случае поток Φ_0 уменьшается до значения $\Phi_1 = \Phi_0 - \Delta\Phi_1$, во втором увеличивается до значения $\Phi_2 = \Phi_0 + \Delta\Phi_2$.

Продольная реакция якоря влияет лишь на величину результирующего потока, но не изменяет его по форме.

Для компенсации продольной н. с. якоря $\mp F_{ad}$ нужно изменять ток возбуждения так, чтобы основная н. с. изменялась на величину $\pm F_{ad}$.

В машинах с добавочными полюсами щетки устанавливают по возможности строго по линии геометрической нейтрали. Но практически щетки всегда немного смещены с нейтрали как вследствие погрешностей при их установке, так и по причине присущих щеточному контакту физических особенностей. Сдвиг может достигать 0,3 — 0,5 *см* в ту или другую сторону от линии геометрической нейтрали. Следовательно,

$$F_{ad} = \pm A \cdot 2\,(0{,}3 \div 0{,}5)$$

на пару полюсов, т. е. в машинах с большой линейной нагрузкой продольная н. с. может достигнуть нескольких сотен ампер и в известных условиях, например в двигателях с регулированием скорости, заметно воздействовать на режим работы машины.

4-4. Влияние продольной реакции якоря на э. д. с. машины

Предположим, что по-прежнему машина работает в режиме генератора при $n = \text{const}$ и $\Phi_0 = \text{const}$. При сдвиге щеток с нейтрали в любом направлении полезный поток Ф уменьшается (см. рис. 3-14,*б*) и пропорционально этому уменьшается э. д. с. E_a. При холостом ходе зависимость $E_{a0} = f(\beta)$ выражается на рис. 4-13 кривой *1*, имеющей характер, близкий к синусоидальному. При нагрузке сдвиг щеток создает продольную размагничивающую или намагничивающую реакцию якоря. Кроме того, в машинах постоянного тока обычного явнополюсного типа возникает еще дополнительный размагничивающий или намагничивающий эффект, объясняемый тем, что участки поля якоря разных знаков, находящиеся между соседними равнополярными щетками, не равны по величине (см. рис. 4-3, *б*).

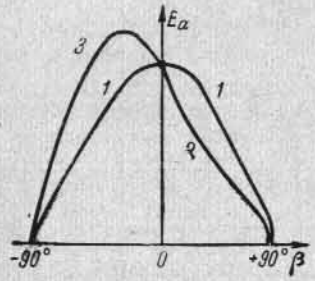


Рис. 4-13. Влияние сдвига щеток на э. д. с. машины

При сдвиге щеток по направлению вращения якоря все три указанных выше фактора действуют в одном направлении, а именно размагничивают машину, вследствие чего кривая *2* э. д. с. E_a на рис. 4-13 резко падает. Наоборот, при сдвиге щеток против направления вращения якоря первый фактор действует в сторону уменьшения э. д. с., а два других фактора — в сторону увеличения ее. Сначала преобладающее влияние оказывают два последних фактора, а затем первый. Поэтому кривая *3* э. д. с. E_a на рис. 4-13 сначала несколько растет, а затем начинает падать. При $\beta = \pm 90°$ э. д. с. $E_a = 0$.

4-5. Реакция якоря в двигателе

Мы рассмотрели реакцию якоря в генераторе. Из последующего изложения (см. гл. 10) мы узнаем, что если полярность основных полюсов и направление токов в обмотке якоря те же, что и в генераторе, то по сравнению с последним двигатель будет вращаться в обратную сторону (*Г* — генератор и *Д* — двигатель на рис. 4-11). Это позволяет сделать следующие выводы относительно реакции якоря в двигателе:

а) при положении щеток на геометрической нейтрали поперечная н. с. якоря искажает основное поле, ослабляя его на сбегающем конце полюса и усиливая на набегающем;

б) при сдвиге щеток с нейтрали по направлению вращения якоря в двигателе или против него наряду с поперечной возникает еще

продольная реакция якоря, в первом случае — намагничивающая, во втором — размагничивающая. Однако сдвиг щеток по направлению вращения якоря в двигателе не допускается из коммутационных соображений.

Глава пятая

КОММУТАЦИЯ [13, 17, 18, 30, 31, 78, 79, 80, 86—90, 93, 106, 107]

5-1. Общие соображения. Шкала искрения

Коммутация представляет собой совокупность явлений, связанных с изменением тока в проводниках обмотки якоря при прохождении их через зону, где они замыкаются накоротко щетками, наложенными на коллектор.

Коммутация считается хорошей, когда процесс изменения тока в секциях не сопровождается искрообразованием между щетками и коллектором и поверхность коллектора остается чистой, неповрежденной при длительной работе машины. Наоборот, коммутация считается неудовлетворительной, если процесс происходит с искрообразованием на щетках и с заметной порчей поверхности коллектора, нарушающей надежную работу машины.

Согласно ГОСТ 183—66 искрение на коллекторе должно оцениваться по степени искрения под сбегающим краем щетки по шкале искрения (классам коммутации), приведенной в табл. 5-1.

Степень искрения (класс коммутации) коллекторных машин должна быть указана в стандартах на отдельные виды машин, а при отсутствии стандартов — в технических условиях на эти машины. Если степень искрения коллекторных машин постоянного тока не оговорена, то она при номинальном режиме работы машины должна быть не выше $1^1/_2$.

Следует отметить, что оценка искрения, предусмотренная ГОСТ 183—66, не отличается полной определенностью.

Одной из основных задач анализа коммутационных процессов является выяснение причин искрообразования между щеткой и коллектором. Искрение может быть вызвано причинами, различными по своей физической природе, а именно механическими и электрическими. Механические причины связаны с геометрическим несовершенством выполнения коллектора и щеточного аппарата не только в состоянии покоя, но и особенно при вращении коллектора с различными скоростями. Сюда относятся: эллиптическая форма коллектора; выступание отдельных коллекторных пластин, вызванное нагреванием и центробежными силами; недостаточная не только статическая, но и динамическая балансировка коллектора; дрожание и вибрация щеток в обойме и т. д. К электрическим причинам относятся: повышение напряжения между коллекторными пластинами выше допустимого предела и, в наиболее тяжелой форме, появление кругового огня на коллекторе; повышенные напряжения и плотности тока в момент разрыва контура

Таблица 5-1

Степень искрения (класс коммутации)	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках
1 1/4	Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки	
1 1/2	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Появление следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение щеток

между щеткой и коллекторной пластиной, а также ряд других причин, которые будут выяснены и сформулированы в дальнейшем.

Наиболее серьезную и трудную задачу представляет анализ электрических причин искрения, но эта задача может ставиться по существу только тогда, когда причины, вызванные механическими факторами, могут считаться исключенными.

5-2. Сущность коммутационного процесса

Под коммутацией коллекторных электрических машин обычно понимается совокупность явлений, связанных с переключением отдельных секций якорной обмотки из одних параллельных ветвей в другие параллельные ветви при работе машины под нагрузкой.

Коммутация представляет собой весьма сложный процесс, зависящий от большого количества факторов, поэтому точный и строгий

анализ этого явления чрезвычайно труден. Ввиду этого в существующих теориях коммутации в основу анализа явлений положен ряд достаточно условных допущений, позволяющих дать основы некоторой математической трактовки процесса коммутации. Наиболее детально разработанной является так называемая классическая теория коммутации Е. Арнольда [30], поэтому, несмотря на ряд ее условных допущений, большинство авторов до сих пор принимает эту теорию за исходную при анализе явлений коммутации.

Классическая теория коммутации начинает рассмотрение процесса с наиболее простых случаев и, постепенно их расширяя и усложняя, приходит к анализу явлений в их более полной совокупности, сопровождая анализ трактовкой экспериментальной стороны вопроса, являющейся часто решающей для оценки условий коммутации.

В основу классической теории Арнольда положены следующие допущения:

1. Полное механическое совершенство коллектора и щеток при любых скоростях вращения.

2. Постоянство удельного сопротивления контакта между щеткой и коллектором и независимость его от плотности тока в контакте и величины контактной поверхности.

5-3. Коммутация сопротивлением без учета э. д. с., индуктируемых в короткозамкнутой секции

Для упрощения и облегчения анализа процесса коммутации обычно пренебрегают толщиной изоляционной прокладки между коллекторными пластинами и предполагают сначала, что ширина щетки равна ширине коллекторной пластины. Таким образом, при простой петлевой обмотке щетка замыкает накоротко только одну секцию обмотки якоря.

Анализ коммутации начнем с простейшего случая, когда принимается, что сумма э. д. с., индуктируемых в короткозамкнутой секции, равна нулю. Это предположение соответствует, например, бесконечно медленному вращению якоря или полному уравновешиванию всей суммы э. д. с. ($\Sigma e = 0$) в контуре секции, замкнутой накоротко щеткой. В этом случае изменение токов в короткозамкнутой секции якоря определяется только контактными сопротивлениями между щеткой и коллекторными пластинами, а также сопротивлениями самих секций и соединительных петушков между секциями обмотки и коллектором. Поэтому этот случай носит название коммутации сопротивлением.

Рассмотрим процесс коммутации сопротивлением в его наиболее простой форме, когда сопротивление переходного контакта между щеткой и коллектором значительно больше сопротивлений самой секции обмотки и соединительных петушков, и поэтому последними сопротивлениями можно пренебречь; практически это имеет место в случае применения угольных щеток.

Введем следующие обозначения:

$b_щ$ — ширина щетки;
$l_щ$ — длина всех щеток на одном щеточном болте;
$t_к$ — коллекторное деление;
$v_к$ — окружная скорость коллектора;
β — относительное перекрытие щеткой коллекторных пластин, равное $b_щ/t_к$;
$I_щ$ — ток через щеточный болт;
i_a — ток в параллельных ветвях обмотки вне зоны коммутации;
i — ток в короткозамкнутой секции;
i_1, i_2 — токи в соединительных петушках между коллектором и обмоткой;
R_c — сопротивление короткозамкнутой секции;
$R_щ$ — сопротивление переходного слоя щеток;
r_1, r_2 — контактные сопротивления набегающего и сбегающего краев щетки;
ρ — сопротивление соединительных петушков;
$S_щ$ — площадь контакта всей щетки;
S_1, S_2 — площади контакта набегающего и сбегающего краев щетки;
$\rho_щ = R_щ/S_щ$ — удельное сопротивление контактного (переходного) слоя щетки;
j_1, j_2 — плотности тока под набегающим и сбегающим краями щетки;
T — полное время коммутации, соответствующее времени прохождения секции через короткое замыкание;
t — время, протекшее от начала коммутации короткозамкнутой секции;
u — число секций обмотки по ширине паза.

На рис. 5-1 представлено распределение токов при коммутации одной секции для пяти следующих друг за другом положений якоря с простой петлевой кольцевой обмоткой через интервалы времени, равные $\frac{1}{4}T$, в рассматриваемом простейшем случае коммутации сопротивлением.

Короткое замыкание рассматриваемой секции *2* начинается в момент $t = 0$ и заканчивается в момент $t = T$. Путь, проходимый изолирующей прокладкой между пластинами *2* и *3* за время t, будет равен $v_к t$; тогда при $t = T$ путь, проходимый за полный период коммутации, равен ширине щетки $b_щ = v_к T$. В рассматриваемые моменты времени щетка перекрывает по ширине участки коллекторных пластин:

$$b_1 = v_к t \text{ и } b_2 = v_к (T - t).$$

Площади касания щетки с коллекторными пластинами *2* и *3* будут равны: $S_1 = b_1 l_щ$, $S_2 = b_2 l_щ$, а полная площадь контакта $S_щ = b_щ l_щ$, откуда

$$S_1 = S_щ \frac{b_1}{b_щ} = S_щ \frac{t}{T} \text{ и } S_2 = S_щ \frac{b_2}{b_щ} = S_щ \frac{T-i}{T}.$$

Переходные сопротивления между щеткой и соседними коллекторными пластинами, если учесть, что контактное сопротивление обратно пропорционально площади контакта, равны:

$$r_1 = R_щ \frac{S_щ}{S_1} = R_щ \frac{T}{t}; \quad (5\text{-}1)$$

$$r_2 = R_щ \frac{S_щ}{S_2} = R_щ \frac{T}{T-t}. \quad (5\text{-}2)$$

Для короткозамкнутого контура (рис. 5-2) составим уравнение по второму закону Кирхгофа: сумма э. д. с. в контуре равна нулю. Поэтому, если положить сопротивление секции и соединительных петушков равными нулю ($R_c \approx 0$ и $\rho \approx 0$), то получим:

$$\sum e = r_2 i_2 - r_1 i_1 = 0. \quad (5\text{-}3)$$

Для токов i_1 и i_2 по первому закону Кирхгофа согласно схеме рис. 5-2 имеем:

$$i_1 = i_a - i; \quad (5\text{-}4)$$

$$i_2 = i_a + i. \quad (5\text{-}5)$$

Подставляя в уравнение (5-3) значения токов i_1 и i_2 из уравнений (5-4) и (5-5) и значения сопротивлений r_1 и r_2 из уравнений (5-1) и (5-2), получаем для тока i следующее уравнение:

$$\boxed{i = i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} = i_a \left(1 - 2\frac{t}{T}\right).} \quad (5\text{-}6)$$

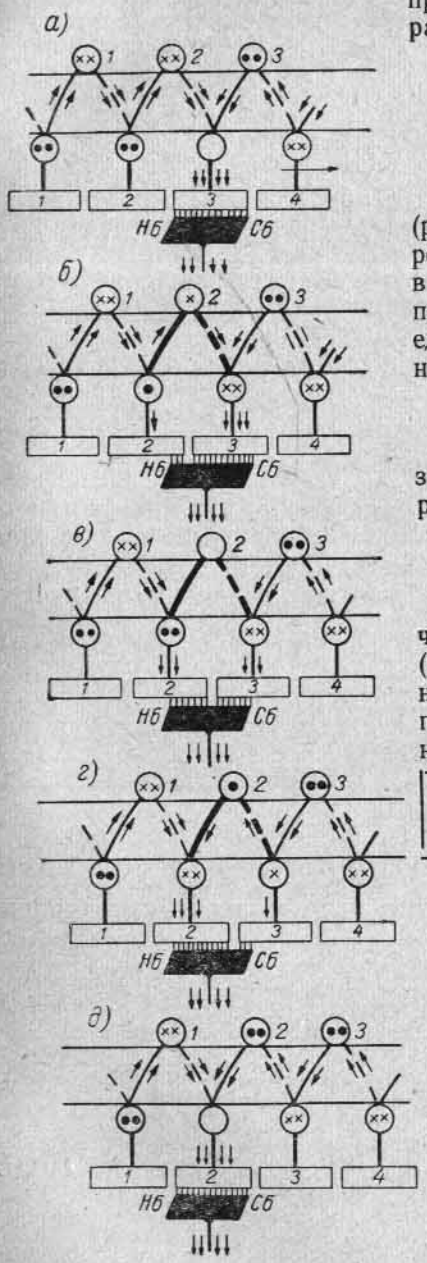


Рис. 5-1. Последовательные моменты коммутации секции

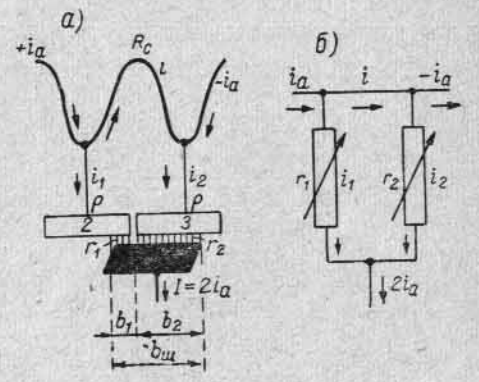


Рис. 5-2. Короткозамкнутый контур

Коммутация, соответствующая изменению тока по уравнению (5-6), носит название прямолинейной, так как ток в короткозамкнутой секции изменяется в линейной зависимости от времени.

В моменты времени $t=0$, $\frac{1}{4}T$, $\frac{1}{2}T$, $\frac{3}{4}T$ и T ток i принимает значения $+i_a$, $+\frac{1}{2}i_a$, 0, $-\frac{1}{2}i_a$ и $-i_a$. Диаграмма изменения тока i в короткозамкнутой секции согласно уравнению (5-6) представлена на рис. 5-3.

Распределение токов на схемах рис. 5-1 для пяти рассмотренных следующих один за другим моментов времени, отличающихся на $\frac{1}{4}T$, соответствует уравнению (5-6) и получающимся из него значениям тока i в короткозамкнутой секции.

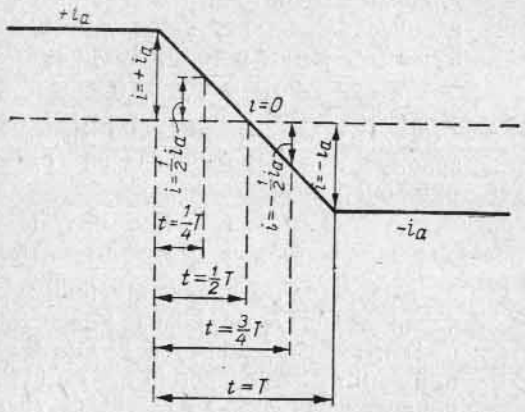


Рис. 5-3. Прямолинейная коммутация при $R_c = 0$ и $\rho = 0$

Средняя плотность тока под щеткой

$$j_0 = 2i_a/S_{щ} = I_{щ}/S_{щ}. \quad (5\text{-}7)$$

Для плотностей тока на участках поверхности щетки, перекрывающих пластины коллектора *2* и *3* (см. рис. 5-2), имеем:

$$j_1 = \frac{i_1}{S_1} = \frac{i_1}{S_{щ}}\frac{T}{t}; \quad (5\text{-}8а)$$

$$j_2 = \frac{i_2}{S_2} = \frac{i_2}{S_{щ}}\frac{T}{T-t}. \quad (5\text{-}8б)$$

В ряде случаев по причинам, рассмотренным ниже, изменение тока в короткозамкнутой секции может быть не прямолинейным (рис. 5-4, *а*). Тогда для момента времени t/T

$$I_{щ}\operatorname{tg}\alpha_1 = i_1\frac{T}{t} \quad (5\text{-}9)$$

и

$$I_{щ}\operatorname{tg}\alpha_2 = i_2\frac{T}{T-t}. \quad (5\text{-}10)$$

Плотность тока для рассматриваемого момента времени (рис. 5-4,*б*) под набегающим краем щетки

$$j_1 = \frac{I_{щ}}{S_{щ}}\operatorname{tg}\alpha_1 = j_0\operatorname{tg}\alpha_1, \quad (5\text{-}11)$$

а под сбегающим краем щетки

$$j_2 = \frac{I_{щ}}{S_{щ}}\operatorname{tg}\alpha_2 = j_0\operatorname{tg}\alpha_2. \quad (5\text{-}12)$$

При прямолинейной коммутации $\operatorname{tg}\alpha_1 = \operatorname{tg}\alpha_2 = 1$ и, следовательно,

$$j_1 = j_2 = j_0 = \frac{I_{щ}}{S_{щ}} = \text{const}. \quad (5\text{-}13)$$

Таким образом, в этом случае при всех положениях щетки относительно пластин *2* и *3* величина плотности тока по всей ширине щетки получается постоянной.

5-4. Коммутация при учете сопротивлений петушков и обмотки

Найдем теперь уравнение для тока в короткозамкнутой секции при учете сопротивлений петушков и самой короткозамкнутой секции при тех же остальных условиях, что и в предыдущем случае.

По второму закону Кирхгофа из упрощенной схемы соединений (рис. 5-5) имеем:

$$\sum e = i_2 r_2 + i_2\rho - i_1 r_1 - i_1\rho + iR_c = 0. \quad (5\text{-}14)$$

Подставляя в (5-14) значения токов i_1 и i_2 из уравнений (5-5) и (5-6) и значения сопротивлений r_1 и r_2 из уравнений (5-1) и (5-2), получаем для тока в короткозамкнутой секции:

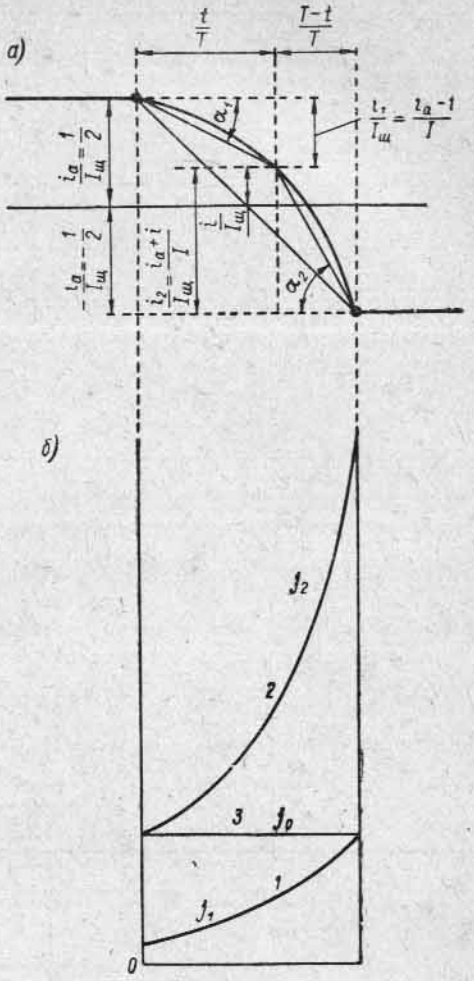


Рис. 5-4. Криволинейная коммутация

$$i = i_0\frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2 + R_c} = i_a\frac{1 - 2\frac{t}{T}}{1 + \frac{R}{R_{щ}}\frac{t}{T}\left(1 - \frac{t}{T}\right)}, \quad (5\text{-}15)$$

где $R = 2\rho + R_c$.

Если в уравнении (5-15) положить сопротивления соединительных петушков и короткозамкнутой секции равными нулю: $R = 2\rho + R_c \approx 0$, то получается прежнее уравнение (5-6) для тока i прямо-

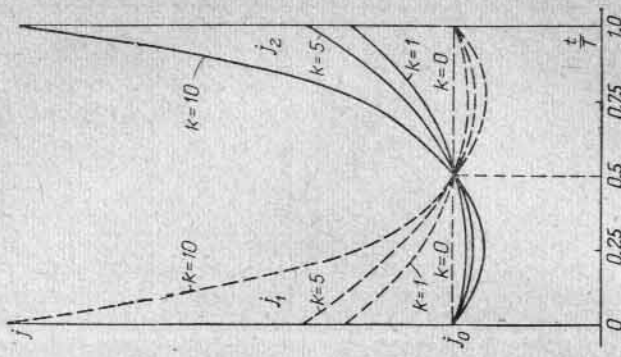


Рис. 5-6б. Изменение плотностей токов под набегающим и сбегающим краями щеток при коммутации сопротивлением с учетом R_c и ρ по рис. 5-6а

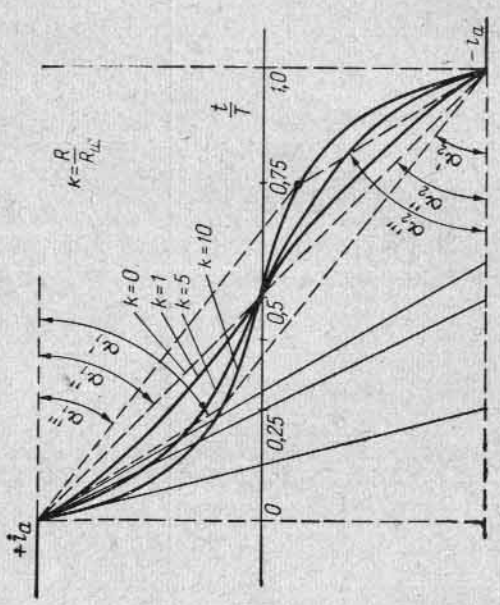


Рис. 5-6а. Кривые токов в коммутируемых секциях при коммутации сопротивлением с учетом R_c и ρ

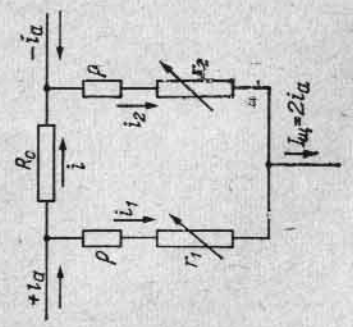


Рис. 5-5. Контур коммутируемой секции при учете сопротивлений петушков и самой секции

линейной коммутации, выведенное ранее при условии пренебрежения сопротивлением $R \approx 0$. На рис. 5-6а представлены кривые изменения тока, построенные по уравнению (5-15) для отношений $R/R_{щ}$, равных 1, 5 и 10. На рис. 5-6б показаны соответствующие кривые плотности тока для набегающего и сбегающего краев щетки j_1 и j_2. При $R/R_{щ}$, равном 5, плотность тока под набегающим и сбегающим краями щетки при $t = 0$ и $t = T$ получается практически удвоенной по отношению к j_0

5-5. Э. д. с., индуктируемые в короткозамкнутом контуре в процессе коммутации

При вращении якоря с некоторой конечной скоростью совершается переход секции обмотки из одной ветви обмотки якоря в другую; она подвергается короткому замыканию в зоне коммутации, причем ток в секции изменяет свое направление на обратное от $+ i_a$ до $- i_a$. Затем секция замыкается накоротко, при этом изменяется ток от $- i_a$ до $+ i_a$ и т. д. Так как период коммутации T весьма мал, то изменение величины тока происходит с весьма большой скоростью. Обычно время коммутации T весьма мало по сравнению с временем $T_п$, за которое секция по окончании процесса коммутации перемещается от данной щетки к соседней щетке противоположной полярности (например, $T \approx 0{,}001$ *сек*, $T_п \approx 0{,}02$ *сек*). Поэтому кривая изменения тока во времени при вращении якоря имеет трапецеидальную форму, которая благодаря малому отношению времени $T/T_п$ практически приближается к прямоугольной (рис. 5-7).

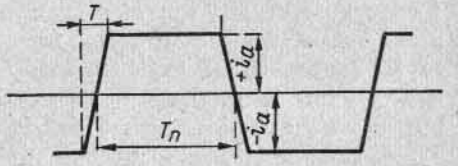


Рис. 5-7. Кривая изменения тока в секциях якорной обмотки с учетом коммутации

А. Э. д. с. самоиндукции. Секция обмотки якоря обладает определенной самоиндукцией, которая в процессе коммутации стремится воспрепятствовать изменению тока. В результате под влиянием самоиндукции прямолинейная коммутация замедляется (см. рис. 5-4, *а*), причем под набегающим краем щетки плотность тока j_1 уменьшается (кривая *1*), а под сбегающим краем щетки плотность тока j_2 возрастает (кривая *2*) по сравнению с плотностью тока при прямолинейной коммутации j_0 (кривая *3*), остающейся неизменной за весь период коммутации (рис. 5-4, *б*). Обозначив коэффициент самоиндукции секции обмотки через L_c, получаем, что в процессе коммутации в короткозамкнутом контуре индуктируется дополнительная э. д. с. самоиндукции

$$e_L = - L_c \frac{di}{dt}.$$

Величина этой э. д. с. самоиндукции зависит от производной тока секции $\frac{di}{dt}$, которая в общем случае является переменной величиной,

и только при прямолинейной коммутации $\frac{di}{dt} = \text{const}$ и, следовательно, $e_L = \text{const}$.

Б. Э. д. с. взаимоиндукции. В том случае, когда щетка перекрывает не одну, а несколько коллекторных пластин, ток одновременно коммутируется в нескольких рядом лежащих секциях, которые могут находиться как в одном и том же пазу, так и в рядом лежащих пазах. В этом случае в рассматриваемой короткозамкнутой секции будут наводиться э. д. с. взаимоиндукции e_M, которые обычно увеличивают э. д. с. самоиндукции e_L.

В. Э. д. с. вращения. Кроме э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции в короткозамкнутой секции якоря при его вращении индуктируется еще э. д. с. вращения e_k, вызванная тем, что стороны короткозамкнутой секции пересекают некоторое внешнее магнитное поле, которое может образовываться в зоне коммутации. Результирующее поле в зоне коммутации может создаваться как за счет реакции якоря, так и полюсами машины, главным образом добавочными. Э. д. с. вращения может изменять свой знак в зависимости от направления поля в зоне коммутации и направления вращения машины; поэтому э. д. с. e_k может как складываться с э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции, так и быть направлена им навстречу.

Кроме э. д. с. e_k, пропорциональной скорости вращения якоря v_a, в короткозамкнутой секции могут создаваться еще э. д. с. e_p, вызванные пульсациями результирующего поля в зоне коммутации как от поперечного качания поля вследствие зубчатости якоря, так и от изменения этого поля во времени по величине при переходных и толчкообразных режимах работы машины.

5-6. Коммутация с учетом э. д. с. в короткозамкнутом контуре при ширине щетки, равной коллекторному делению

Рассмотрим сначала процесс коммутации для простейшего случая — кольцевого якоря со спиральной обмоткой и барабанного якоря с простой петлевой обмоткой, имеющей одну секцию по ширине паза $u = 1$, предполагая отсутствие э. д. с. пульсаций ($e_p = 0$) и пренебрегая сопротивлениями секции и соединительных петушков ($R = 2\rho + R_c = 0$).

В этом случае для короткозамкнутой секции по второму закону Кирхгофа может быть написано уравнение э. д. с.:

$$e_L \pm e_k = r_2 i_2 - r_1 i_1. \qquad (5\text{-}16)$$

Подставляя в (5-16) значения токов i_1 и i_2 из уравнений (5-4) и (5-5) и решая полученное уравнение по отношению к току в секции, находим

$$i = i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} + \frac{e_L \pm e_k}{r_1 + r_2} = i_л + \frac{\Sigma e}{r_1 + r_2} = i_л + i_k, \qquad (5\text{-}17)$$

где $\sum e = e_L \pm e_k$ представляет собой добавочную результирующую э. д. с. в короткозамкнутом контуре.

Согласно уравнению (5-6) $i_л = i_a \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2}$ есть ток прямолинейной коммутации, а

$$i_k = \frac{e_L \pm e_k}{r_1 + r_2} = i - i_л \qquad (5\text{-}18)$$

является добавочным током, который можно рассматривать как разность между результирующим током i и током $i_л$ прямолинейной коммутации. Ток i_k по величине и направлению по отношению к току прямолинейной коммутации $i_л$ зависит от величины и знака алгебраической суммы $e_L \pm e_k$.

Как было установлено выше, э. д. с. e_L вызывает замедление процесса коммутации, поэтому эта э. д. с. создает составляющую добавочного тока, алгебраически добавляющуюся к току $i_л$. Так как ток прямолинейной коммутации $i_л$ изменяет свой знак при $t = \frac{1}{2}T$, то при $0 < t < \frac{1}{2}T$ добавочный ток i_k увеличивает ток i, и переход тока i через нулевое значение происходит при $t > \frac{1}{2}T$ (рис. 5-8, *а*).

Э. д. с. вращения e_k может складываться с э. д. с. e_L или вычитаться из нее. В первом случае э. д. с. e_k, действуя согласно с э. д. с. e_L, замедляет процесс коммутации, а во втором — ускоряет его. Если во втором случае $e_k > e_L$, то получится ускоренная коммутация. Если же $e_L + e_k = 0$, то должна получиться прямолинейная коммутация. Таким образом, в зависимости от величины и знака алгебраической суммы $e_L \pm e_k$ добавочный ток i_k может различным образом изменяться по отношению к току прямолинейной коммутации $i_л$, вследствие чего результирующий ток i может иметь различные зависимости от времени t. В случае замедленной коммутации результирующий ток $i_1 = i_a = i$ под набегающим краем щетки уменьшается по сравнению с током i_1, соответствующим прямолинейной коммутации, и поэтому одновременно уменьшается плотность тока j_1 (рис. 5-8, *б*); наоборот, под сбегающим краем щетки ток $i_2 = i_a + i$ увеличивается по сравнению с током i_2, соответствующим прямолинейной коммутации, в результате чего возрастает плотность тока j_2 (рис. 5-8, *в*). При ускоренной коммутации, наоборот, ток i_1 и соответственно плотность тока j_1 возрастают, а под сбегающим краем ток i_2 и плотность тока j_2 уменьшаются по сравнению с током и его плотностью, соответствующими прямолинейной коммутации (рис. 5-8, *б* и *в*).

На рис. 5-8, *а* представлены различные возможные случаи изменения тока i под влиянием воздействия суммы э. д. с. $e_L \pm e_k$, создающей добавочный ток i_k.

Кривая *1* соответствует прямолинейной коммутации, кривая *2* — коммутации сопротивлением при учете сопротивлений секции и

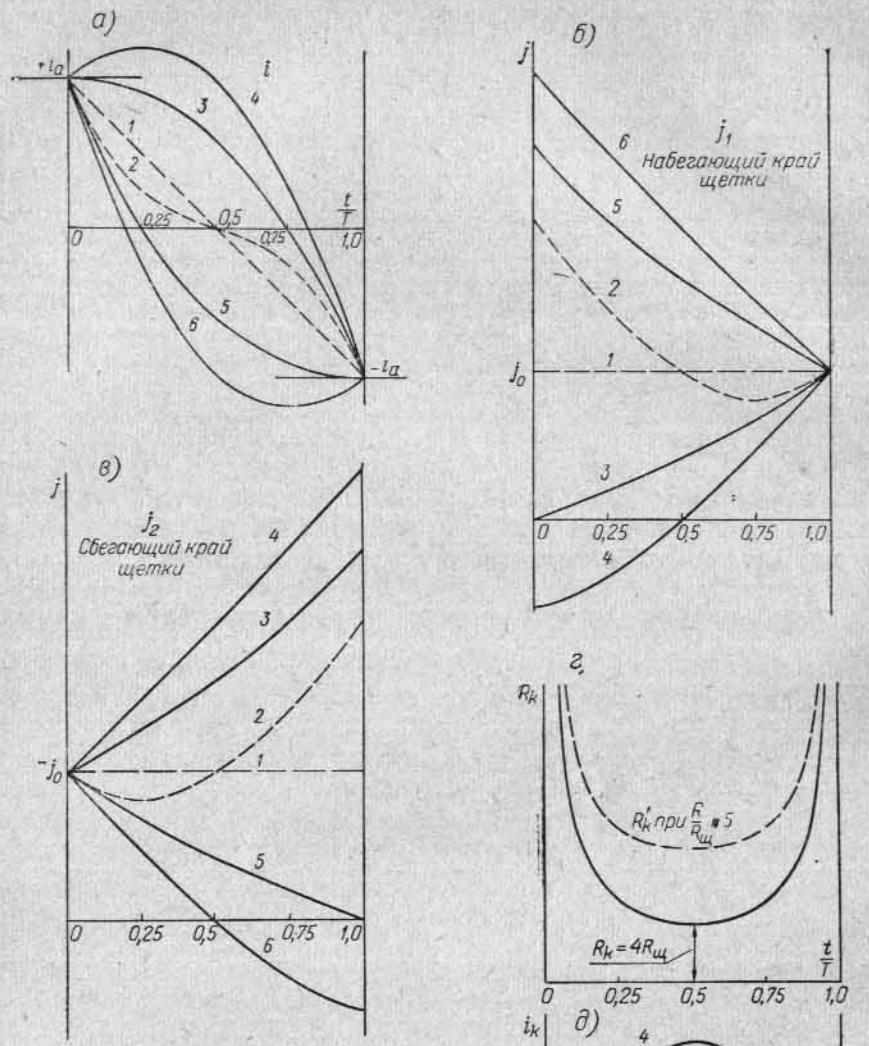


Рис. 5-8. *а* — кривые токов в коммутируемой секции при различных условиях коммутации; *б* — кривые плотностей тока при различных условиях коммутации под набегающим краем щетки; *в* — то же под сбегающим краем щетки; *г* и *д* — кривые изменения сопротивления контура коммутируемой секции $R_к$ и добавочных токов i_k для различных условий коммутации по рис. 5-8, *а*

1 — прямолинейная коммутация; *2* — коммутация сопротивлением при $R/R_щ = 5$; *3* — замедленная коммутация; *4* — резко замедленная; *5* — нормально ускоренная коммутация; *6* — резко ускоренная

соединительных петушков при $R/R_щ = 5$ (см. рис. 5-6а), кривая *3* — замедленной коммутации под влиянием э. д. с. самоиндукции e_L, а кривая *4* — весьма сильно замедленной коммутации под влиянием не только э. д. с. e_L, но и э. д. с. внешнего поля e_k, складывающейся арифметически с э. д. с. e_L. Кривая *5* соответствует нормально ускоренной коммутации, при которой плотность тока j_2 под сбегающим краем щетки при $t = T$ становится равной нулю, когда э. д. с. e_L и e_k имеют различные знаки, но e_k больше, чем e_L. Кривая *6* соответствует резко ускоренной коммутации, когда e_k настолько больше e_L, что плотность тока под сбегающим краем щетки j_2 даже изменяет свой знак.

Коммутация под сбегающим краем щетки при плотности тока $j_2 = 0$ имеет особенно большое значение, так как позволяет добиваться безыскрового размыкания индуктивного контура коммутируемой секции. Отсюда следует, что кривая тока *3* ускоренной коммутации обладает преимуществом по сравнению с другими видами изменения тока i в период коммутации. Хотя в этом случае получается по сравнению с прямолинейной коммутацией несколько повышенное значение плотности тока j_1 под набегающим краем щетки, оно, как правило, не представляет опасности, так как безыскровое замыкание индуктивного контура осуществляется всегда значительно легче, чем размыкание.

Рассмотрим необходимые условия для достижения плотности тока под сбегающим краем щетки, равной нулю.

На основании уравнений (5-1), (5-2) и (5-17) имеем:

$$i = i_л + \frac{\Sigma e}{r_1 + r_2} = i_a\left(1 - 2\frac{t}{T}\right) + \frac{\Sigma e\,(T-t)\,t}{R_щ T^2}, \qquad (5\text{-}19)$$

тогда ток

$$i_2 = i_a + i = 2i_a\left[\left(1 - \frac{t}{T}\right) + \frac{\Sigma e\,(T-t)\,t}{2i_a R_щ T^2}\right]. \qquad (5\text{-}20)$$

Обозначив

$$\frac{\Sigma e}{2i_a R_щ} = k_2,$$

получаем

$$i_2 = 2i_a\frac{T-t}{T}\left(1 + k_2\frac{t}{T}\right) \qquad (5\text{-}21)$$

и плотность тока под сбегающим краем щетки

$$j_2 = \frac{i_2}{S_2} = \frac{i_2}{S_щ}\frac{T}{T-t} = \frac{2i_a}{S_щ}\left(1 + k_2\frac{t}{T}\right). \qquad (5\text{-}22)$$

Если для момента времени $t = T$ мы хотим иметь плотность тока $j_2 = 0$, то

$$j_2 = \frac{2i_a}{S_щ}(1 + k_2) = 0,$$

откуда

$$k_2 = \frac{\Sigma e}{2i_a R_{щ}} = -1. \qquad (5\text{-}23)$$

Таким образом, для наиболее благоприятных условий коммутации, когда плотность тока под сбегающим краем щетки равна нулю, результирующая э. д. с., действующая в короткозамкнутом контуре, должна быть равна по величине и противоположна по направлению падению напряжения в переходном сопротивлении между щеткой и коллектором:

$$\Sigma e = -2i_a R_{щ}. \qquad (5\text{-}24)$$

Хотя предшествующий анализ был проведен в предположении, что ширина щетки равна коллекторному делению, его основные результаты остаются практически в силе и для более широкой щетки: $b_{щ} > t_к$.

Кривая *5*, удовлетворяющая условию $k_2 = -1$, представлена на рис. 5-8, *а*. Она показывает, что ток i в момент $t = T$ схода пластины с коллектора имеет горизонтальную касательную и $\operatorname{tg}\alpha_2 = 0$.

Рассуждая аналогично, легко показать, что для получения при замедленной коммутации $j_1 = 0$ величина результирующей э. д. с. в коммутируемой секции $\Sigma e = e_L \pm e_k$ должна быть

$$\Sigma e = +2i_a R_{щ} \qquad (5\text{-}25)$$

или $k_2 = +1$.

На рис. 5-8, *б* и *в* приведены кривые зависимости плотностей тока j_1 и j_2 от времени, соответствующие кривым *1—6* изменения тока i в коммутируемой секции по рис. 5-8, *а*.

На рис. 5-8, *г* показана кривая изменения полного сопротивления контура короткозамкнутой секции R_k в зависимости от времени при пренебрежении сопротивлениями самой секции и соединительных петушков ($R = R_c + 2\rho = 0$):

$$R_k = r_1 + r_2 = R_{щ}\frac{T}{t} + R_{щ}\frac{T}{T-t} = R_{щ}\frac{T^2}{(T-t)}. \qquad (5\text{-}26)$$

Для моментов времени $t = 0$ и $t = T$ сопротивление $R_k = \infty$. Наименьшее значение R_k получается в середине периода коммутации $t = T/2$ и составляет

$$R_{k\,мин} = 4R_{щ}. \qquad (5\text{-}26а)$$

Соответственно для добавочного тока коммутации i_k [см. уравнение (5-18)] получим:

$$i_k = \frac{\Sigma e}{R_k} = \frac{\Sigma e}{R_{щ}}\frac{t(T-t)}{T^2}. \qquad (5\text{-}27)$$

Зависимости $i_k = f(t)$ представлены на рис. 5-8, *д* для кривых тока *1—6* в коммутируемой секции по рис. 5-8, *а*.

При учете сопротивлений $R_c + 2\rho$

$$R_k' = r_1 + r_k + R = R_{щ}\left[\frac{T^2}{t(T-t)} + \frac{R}{R_{щ}}\right]. \qquad (5\text{-}28)$$

Характер изменения $R_k' = f(t)$ для случая $R/R_{щ} = 5$ показан на рис. 5-8, *г*.

Следует отметить, что даже при коммутации сопротивлением ($\Sigma e = 0$) при наличии значительной величины сопротивлений самой секции и соединительных петушков (кривые *2* на рис. 5-8, *а*, *б*, *в*, *г* и *д*) получается возрастание плотностей тока как под набегающим (j_1), так и под сбегающим (j_2) краями щеток. Это принципиально должно утяжелить условия коммутации. В связи с этим в машинах постоянного тока искусственное увеличение сопротивления R (например, путем применения петушков, выполненных из материала с повышенным удельным сопротивлением) с целью снижения i_k не применяется.

5-7. Коммутация при ширине щетки, превышающей коллекторное деление

Рассмотрим условия коммутации для зубчатого якоря с петлевой обмоткой при числе сторон секций в пазу $u > 1$ и при ширине щетки, превышающей ширину коллекторной пластины: $b_{щ} > t_к$. В этом случае процессы коммутации протекают одновременно в нескольких короткозамкнутых щетками секциях. При этом изменение тока в какой-либо секции за период коммутации будет зависеть не только от э. д. с. e_L самоиндукции самой коммутируемой секции, но также и от э. д. с. взаимоиндукции e_M ее с соседними секциями, заложенными в одном пазу, так как все эти секции должны иметь практически одно общее поле рассеяния (рис. 5-9):

$$e_M = -\frac{d(M_{21}i_2)}{dt} - \frac{d(M_{31}i_3)}{dt} - \ldots - \frac{d(M_{n1}i_n)}{dt}. \qquad (5\text{-}29)$$

Коэффициенты взаимоиндукции M проводников, заложенных в одном пазу, могут быть приняты постоянными и в первом приближении равными друг другу:

$$M_{21} \approx M_{31} \approx \ldots \approx M_{n1} \approx M \approx \text{const}, \qquad (5\text{-}30)$$

поэтому

$$e_M = -M\left(\frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} + \ldots + \frac{di_n}{dt}\right). \qquad (5\text{-}31)$$

Если бы все секции, заложенные в одном пазу, вступали в процесс коммутации одновременно, то при прямолинейной коммутации можно было бы принять

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} = \frac{di_3}{dt} = \ldots = \frac{di_n}{dt} = \text{const}, \qquad (5\text{-}32)$$

и тогда результирующая э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции, носящая название реактивной э. д. с., получилась бы равной

$$e_r = e_L + e_M = (L_c + \sum M)\frac{di_1}{dt} = -L_r\frac{di_1}{dt}, \qquad (5\text{-}33)$$

где результирующий коэффициент самоиндукции $L_r = L_c + \sum M$.

В действительности секции обмотки, находящиеся в одном и том же пазу, присоединены к ряду коллекторных пластин (рис. 5-9). Поэтому они вступают в процесс коммутации в последовательном порядке, определяемом временем прохождения одной коллекторной пластины

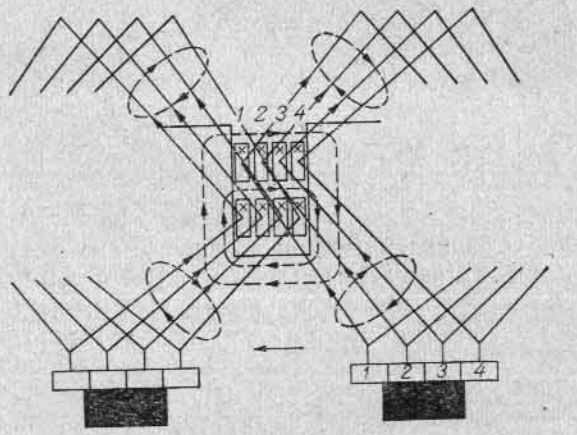


Рис. 5-9. Коммутируемые секции зубчатого барабанного якоря с простой петлевой диаметральной обмоткой при $u = 4$ и $\beta = 2{,}5$

относительно набегающего края щетки. Для получения результирующей индуктивности К. И. Шенфер [31, 79] и Р. Рихтер [13] складывают по методу Е. Арнольда э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции для проводников, находящихся в одном пазу, принимая прямолинейный характер коммутации и учитывая при этом сдвиг во времени начала коммутации различных секций.

Рассмотрим один из простейших видов обмотки с диаметральным шагом с числом секций в пазу $u = 4$ при щеточном перекрытии $\beta = b_щ/t_к = 2{,}5$ (рис. 5-9).

Результирующая э. д. с., индуктируемая в каждой секции, получится сложением ординат четырех прямоугольников, основания которых равны периоду коммутации секции, а сдвиг между ними соответствует времени прохождения одного коллекторного деления $T = t_к v_к$ (рис. 5-10, *а* и *б*). За время периода коммутации T в каждой короткозамкнутой секции индуктируется только определенный участок результирующий э. д. с., представленной на рис. 5-10, *б*, а остальная часть индуктируется уже после выхода секции из положения короткого замыкания и перехода ее в зону активной части обмотки. Таким образом, во время процесса короткого замыкания в каждой секции индуктируются различные по форме и величине результирующие э. д. с. e_r, а именно: для секции *1* — согласно рис. 5-10, *в*, секции *2* — рис. 5-10, *г*, секции *3* — рис. 5-10, *д* и секции *4* — рис. 5-10, *е*. Можно представить, что ток прямолинейной коммутации индуктирует в каждой из короткозамкнутых секций якоря реактивную э. д. с.:

$$e_r = k' B_r v_a = L_r\frac{di}{dt} = k\lambda_r\frac{di}{dt},$$

где L_r — переменный результирующий коэффициент самоиндукции, различный для каждой секции и имеющий форму рис. 5-10, *в*, *г*, *д*, *е*, а λ_r — переменная магнитная проводимость для полей рассеяния коммутируемых секций, соответствующая коэффициенту самоиндукции L_r. С другой стороны, можно представить, что в коммутационной зоне токами короткозамкнутых секций создается реактивное стоячее поле B_r, имеющее в пространстве форму рис. 5-10, *б*; это поле пересекается во время процесса коммутации замыкаемыми накоротко секциями якоря, в которых индуктируется э. д. с. вращения e_k.

При постоянной скорости вращения якоря $v_a = \text{const}$ и $\frac{di}{dt} = \text{const}$, получим

$$L_r \sim \lambda_r \sim B_r.$$

Нужно отметить, что в обмотке с диаметральным шагом стороны верхнего и нижнего слоев секций обмотки коммутируются одновременно, замыкаясь накоротко щетками противоположной полярности; поэтому можно объединять стороны верхнего и нижнего слоев и получать реактивное поле для всех четырех секций.

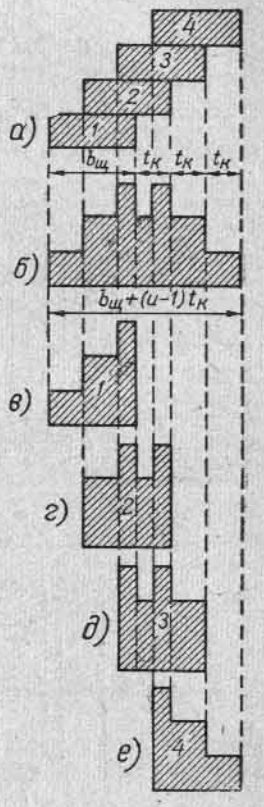


Рис. 5-10. Получение результирующей э. д. с. в обмотке с диаметральным шагом $u = 4$ при щеточном перекрытии $\beta = b_щ/t_к$

Из схемы на рис. 5-9 можно видеть, что взаимоиндукция между короткозамкнутыми секциями существует в основном в пазовых частях обмотки, в то время как взаимоиндукция в лобовых частях настолько невелика, что ею можно практически пренебрегать.

Для ступенчатой обмотки и обмотки с сокращенным шагом приходится строить поля отдельно для верхнего и нижнего слоев и затем их складывать. Поэтому реактивное поле B_r и результирующая самоиндукция L_r получают более сложную форму. Для каждой данной машины коэффициент результирующей самоиндукции L_r может быть определен подобным же графо-аналитическим методом. На

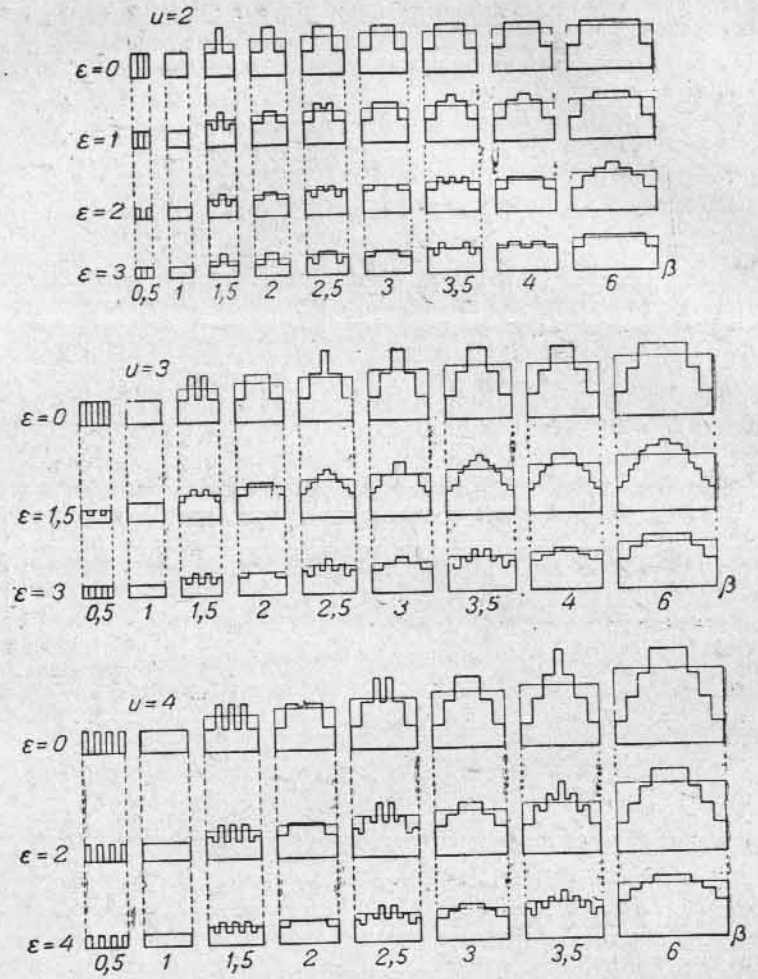


Рис. 5-11. Результирующая самоиндукция в функции положения прорези впадины относительно зоны коммутации при щетках различной ширины и различных отклонениях ширины секции от полюсного деления

рис. 5-11 представлены различные формы кривых результирующей самоиндукции L_r при изменении основных величин в пределах:

Число секций в пазу	$u = 2, 3, 4$
Сокращение шага обмотки	$\varepsilon = 0, 1, 1/1_2, 2, 3, 4$
Щеточное перекрытие	$\beta = 1/_2, 1, 1^1/_2, 2, 2^1/_2, 3, 3^1/_2, 6$

Для достижения прямолинейной коммутации при $\beta > 1$ необходимо компенсировать э. д. с. e_r от результирующей самоиндукции L_r равной ей и противоположной по направлению э. д. с. от внешнего поля e_k, чтобы получить в этом случае условия, соответствующие коммутации сопротивлением, приближающиеся к рассмотренному выше условию прямолинейной коммутации при отсутствии в короткозамкнутой секции э. д. с. ($e_r \pm e_k = 0$). Очевидно, в коммутационной зоне должно быть создано коммутирующее поле B_k, равное и противоположное по форме реактивному полю B_r, эквивалентному по своему действию результирующей самоиндукции L_r. Чем ближе совпадают по форме коммутирующее поле B_k и реактивное поле B_r, тем больше оснований ожидать прямолинейной коммутации в каждой короткозамкнутой секции якоря.

Так как в ряде случаев, особенно в машинах постоянного тока относительно небольшой или средней мощности, достаточно точного совпадения форм реактивного и коммутирующего полей достигнуть

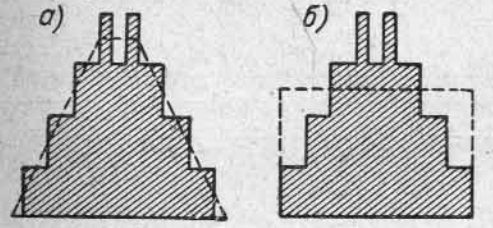


Рис. 5-12. Различные формы реактивного и коммутирующего полей

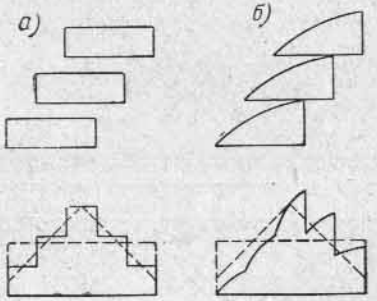


Рис. 5-13. Формы кривых реактивного поля при прямолинейной (*а*) и замедленной (*б*) коммутации (по К. И. Шенферу)

весьма трудно, то в этом случае приходится добиваться приблизительного их соответствия по некоторым средним линиям (рис. 5-12, *а*) или даже простого равенства их средних значений (рис. 5-12, *б*). Чем более мелкие ступени имеет кривая реактивного поля B_r, тем легче подобрать приближающуюся к ней форму кривой коммутирующего поля. С этой точки зрения большим преимуществом обладают ступенчатые обмотки, уменьшающие отклонение получающейся кривой результирующей самоиндукции от ее средней линии.

Нужно отметить, что, как показал К. И. Шенфер [31], отклонение коммутации от прямолинейной в сторону замедленной коммутации относительно мало влияет на среднюю величину реактивного поля (рис. 5-13), но создает некоторое его увеличение под сбегающим краем коммутационной зоны и ослабление под ее набегающим краем, что вызывает потребность в некотором усилении коммутирующего поля B_k для большего ускорения коммутации.

5-8. Коэффициент результирующей самоиндукции и определение реактивной э. д. с.

Коэффициент результирующей самоиндукции короткозамкнутой секции L_r, учитывающий как ее самоиндукцию в пазу и в лобовых частях, так и взаимоиндукцию с другими секциями в пазовой части,

дает возможность вычислить реактивную э. д. с. при прямолинейной коммутации:

$$e_r = -L_r \frac{di}{dt} = -L_r \frac{-i_a - (+i_a)}{T} = L_r \frac{2i_a}{T}.$$

Для вычисления e_r нужно выразить L_r и T через параметры машины. При ширине щетки $b_щ$, равной ширине коллекторной пластины $t_к$, $b_щ$ представляет собой тот путь, который коллектор проходит за время, соответствующее полному периоду коммутации:

$$b_щ = t_к = Tv_к, \text{ но } t_к = \frac{\pi D_к}{K} \text{ и } v_к = \pi D_к n;$$

поэтому

$$T = \frac{t_к}{v_к} = \frac{\pi D_к}{K} : \pi D_к n = \frac{1}{nK}.$$

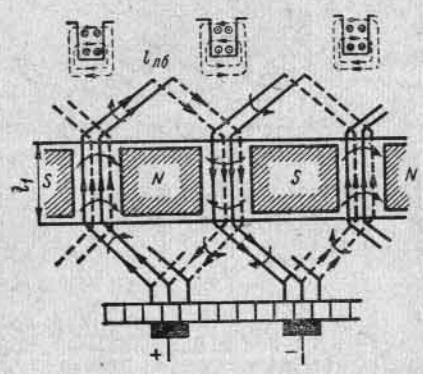


Рис. 5-14. Иллюстрация к вычислению реактивной э. д. с.

Исходя из положения, что коэффициент самоиндукции катушки измеряется числом потокосцеплений витков ее обмотки, возникающих при прохождении через нее тока 1 a, имеем:

$$L_r = \Sigma w_x \frac{\Phi_x}{i} = \sum w_x^2 \lambda_x,$$

где λ_x представляет собой магнитную проводимость для w_x витков или то число магнитных линий, которое сцепляется с w_x витками при прохождении через них тока в 1 a.

Однако мы можем заменить действительную картину потоков эквивалентной ей по числу потокосцеплений картиной, при которой все линии потоков сцепляются с полным числом витков секции:

$$\sum w_x^2 \lambda_x = w_c^2 \sum \lambda'_x.$$

Здесь $\sum \lambda'_x$ — эквивалентная проводимость для магнитных линий, замыкающихся вокруг полного числа витков секции помимо основного потока машины, определяющая некоторый эквивалентный поток рассеяния Φ_s короткозамкнутой секции якоря.

На рис. 5-14 представлена картина обтекания токами короткозамкнутых секций якоря. Каждый виток секции состоит из частей, уложенных в пазах, и из лобовых соединительных частей обмотки, причем длина первых равна $2l_1$ и вторых — $2l_{лб}$. Обозначим магнитную проводимость пазовой части на единицу длины через $\lambda'_п$ и лобовой части — $\lambda_{лб}$; тогда результирующая магнитная проводимость

$$\sum \lambda'_x = 2l_1 \lambda'_п + 2l_{лб} \lambda_{лб}.$$

Обозначим, далее, через $\lambda_{п.с}$ среднюю магнитную проводимость на единицу длины одного слоя секции. При диаметральной обмотке взаимоиндукция по длине пазовой части верхнего слоя с нижним с левой стороны секции и нижнего слоя с верхним с правой стороны практически удваивает величину результирующей проводимости паза, поэтому $\lambda'_п = 2\lambda_{п.с}$.

При сокращенном или удлиненном шаге нижний слой может уже попадать в соседний паз, и тогда можно принять

$$\lambda'_п \approx \frac{3}{2} \lambda_{п.с}.$$

В лобовой части взаимоиндукция верхнего и нижнего слоев практически отсутствует. Таким образом, коэффициент результирующей самоиндукции для обмотки с диаметральным шагом

$$L_r = w_c^2 2 (2\lambda_{п.с} l_1 + \lambda_{лб} l_{лб}) = 2w_c^2 l_1 \left(2\lambda_п + \lambda_{лб} \frac{l_{лб}}{l_1}\right). \quad (5\text{-}34)$$

Обозначим

$$2\lambda_п + \lambda_{лб} \frac{l_{лб}}{l_1} = \zeta;$$

тогда

$$L_r = 2w_c^2 l_1 \zeta.$$

Реактивная э. д. с. прямолинейной коммутации

$$e_r = L_r \frac{2i_a}{T} = 2w_c^2 l_1 \zeta 2i_a nK.$$

Принимая во внимание, что

$$w_c = \frac{N}{2K}; \quad A = \frac{Ni_a}{\pi D_a} \text{ и } v_a = \pi D_a n,$$

получаем

$$e_r = 2w_c \frac{N}{2K} l_1 \zeta 2i_a nK =$$

$$= 2w_c \pi D_a n \frac{Ni_a}{\pi D_a} l_1 \zeta = 2w_c v_a A l_1 \zeta. \quad (5\text{-}35)$$

Полная реактивная э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции, если учитывать взаимоиндукцию секции с соседними секциями в пазу, очевидно, может быть выражена аналогичным образом:

$$e_r = 2w_c v_a A l_1 \zeta_r,$$

где эквивалентная проводимость ζ_r является по существу уже величиной переменной.

Если, однако, интересоваться средним значением реактивной э. д. с. e_r, то нужно под ζ_r понимать также среднее значение проводимости, как это было показано на рис. 5-12, $б$ для L_r, B_r и e_r. В таком предположении был сделан вывод формулы (5-35) для среднего значения

реактивной э. д. с. e_r Пихельмайером (Pichelmayer) [32], давшим на основании данных опыта для ζ_r пределы от $6 \cdot 10^{-6}$ до $9 \cdot 10^{-6}$ *гн/м*. Формула Пихельмайера выведена по существу для ширины щетки, равной ширине коллекторной пластины: $\beta = b_{щ}/t_к = 1$, но условия коммутации в среднем при уширении щетки изменяются относительно мало, если $u \geqslant 2$. Поэтому формула (5-35) практически может применяться и для случая, когда $\beta > 1$. Действительно, как было указано выше, величина э. д. с. e_r, равная $L_r \frac{2i_a}{T}$, пропорциональна отношению L_r/T. Если в пазу помещена обмотка с достаточно большим числом сторон секций по ширине паза, например $u = 4$, то при возрастании перекрытия коллекторных пластин щеткой от $\beta = 1$ до $\beta > 1$ одновременно возрастает как результирующий коэффициент самоиндукции L_r, так и период коммутации T. Отношение L_r/T изменяется сравнительно мало, и поэтому э. д. с. e_r практически сохраняет то же значение, которое выведено для $\beta = 1$. Например, исходя из диаграммы на рис. 5-10, имеем для секций *1* и *4* возрастание коэффициента средней результирующей самоиндукции в 1,8 раза при переходе от $\beta = 1$ к $\beta = 2{,}5$, а для секций *2* и *3* — в 2,4 раза, что дает в среднем возрастание L_r в $(1{,}8 + 2{,}4)/2 = 2{,}1$ раза. Период коммутации T возрастает прямо пропорционально перекрытию β, поэтому он увеличивается в 2,5 раза; отношение L_r/T уменьшается только в $2{,}1/2{,}5 = 0{,}84$ раза.

Если взять обмотку с $u = 1$, то в этом случае коэффициент результирующей самоиндукции L_r почти не изменяется с увеличением перекрытия β, потому что взаимоиндукция с секциями соседних пазов практически отсутствует. Так как период коммутации возрастает пропорционально перекрытию β, то в этом случае э. д. с. e_r должна уменьшаться. Нужно отметить, что обмотки с $u = 1$ применяются очень редко, так как они, как правило, дают более тяжелую коммутацию из-за высокого значения отношения высоты и ширины паза $h_п/b_п$.

Третгин (Trettin) [17, 43] дал более точное выражение зависимости величины ζ от параметров и режимов работы машины в виде следующей формулы:

$$\zeta = \left(0{,}6\,\frac{h_п}{b_п} + \frac{l_{лб}}{l_1} + \frac{500^2 a/p}{A l_1 w_c v_a}\right) \cdot 10^{-6} \ гн/м. \qquad (5\text{-}36)$$

В этой формуле учитываются достаточно существенные различия машин в отношении формы паза, выполнения обмотки, линейной нагрузки, активной длины машины и окружной скорости.

Для машин с добавочными полюсами Третгин рекомендует пользоваться для ζ следующими пределами:

1. Для малых машин с проволочной обмоткой и $w_c > 1$

$$\zeta = (6 \div 7) \cdot 10^{-6} \ гн/м.$$

2. Для машин средней мощности со стержневой обмоткой

$$\zeta = (5 \div 6) \cdot 10^{-6} \ гн/м.$$

3. Для тихоходных крупных машин с малой длиной активной стали

$$\zeta = (6 \div 8) \cdot 10^{-6} \ гн/м.$$

4. Для тихоходных крупных машин с большой длиной активной стали

$$\zeta = (3{,}8 \div 4{,}5) \cdot 10^{-6} \ гн/м.$$

5. Для быстроходных крупных машин

$$\zeta = (4 \div 5) \cdot 10^{-6} \ гн/м.$$

5-9. Индуктивность рассеяния короткозамкнутой секции в период ее коммутации

В соответствии с § 5-8 индуктивность рассеяния паза может быть выражена как

$$L_п = \mu_0 s_п^2 l_1 \sum \lambda_{пх} = \mu_0 s_п^2 l_1 \lambda'_п.$$

Здесь $\lambda'_п$ представляет собой коэффициент проводимости потока пазового рассеяния, l_1 — длину паза якоря и $s_п$ — число проводников в пазу. В части паза, занятой проводниками, трубки потока по высоте сцепляются неодинаково со всем сечением проводников (рис. 5-15). Элементарная трубка шириной dx, находящаяся на высоте x от основания проводника, имеет элементарную магнитную проводимость

$$d\lambda'_x = \frac{dx \cdot 1}{b_1} = \frac{dx}{b_1}.$$

Эта магнитная трубка сцепляется с числом проводников паза

$$s_x = s_п \frac{x}{h_1}.$$

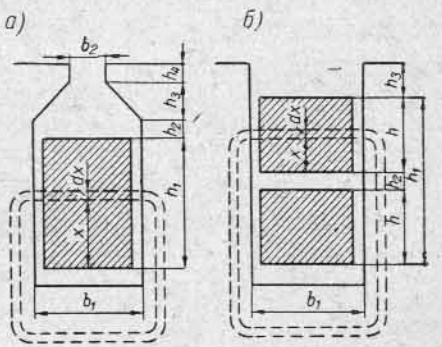


Рис. 5-15. К расчету пазовой проводимости $\lambda_п$ коммутируемых секций

Потокосцепление этой трубки на единицу длины якоря

$$s_x^2 d\lambda'_x = \frac{s_п^2}{h_1^2 b_1} x^2 dx.$$

Общее потокосцепление для всех проводников, занимающих высоту h_1,

$$s_п^2 \lambda'_{п1} = \int_0^{h_1} \frac{s_п^2}{h_1^2 b_1} x^2 dx = s_п^2 \frac{h_1}{3 b_1}.$$

Для частей паза, лежащих выше проводника, где поток сцепляется с полным числом проводников $s_п$, при полузакрытом пазе (рис. 5-15,*а*)

$$\sum\lambda' = \frac{h_2}{b_1} + \frac{2h_3}{b_1 + b_2} + \frac{h_4}{b_2}$$

и полный коэффициент проводимости рассеяния паза

$$\lambda'_п = \frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_2}{b_1} + \frac{2h_3}{b_1 + b_2} + \frac{h_4}{b_2}. \qquad (5\text{-}37)$$

Для двухслойной обмотки открытого паза (рис. 5-15, *б*) проводимость рассеяния нижней части паза пропорциональна

$$\lambda'_{п1} = \frac{1}{4} s_п^2 \left(\frac{4h}{3b_1} + \frac{h_2 + h_3}{b_1}\right), \qquad (5\text{-}38а)$$

а для верхней части паза —

$$\lambda'_{п1} = \frac{1}{4} s_п^2 \left(\frac{h}{3b_1} + \frac{h_3}{b_1}\right). \qquad (5\text{-}38б)$$

Проводимость взаимоиндукции проводников верхней и нижней частей паза в этом случае пропорциональна

$$\lambda'_{п12} = \lambda'_{п21} = \frac{1}{4} s_п^2 \left(\frac{h}{2b_1} + \frac{h_3}{b_1}\right). \qquad (5\text{-}38в)$$

Проводимость $\lambda'_{лб}$, определяющая индуктивность рассеяния лобовых частей, во время коммутации меняется гораздо меньше, чем результирующая проводимость пазовой части, поэтому для $\lambda'_{лб}$ приближенно можно принять некоторые средние значения.

1. Для бандажей из магнитных материалов $\lambda'_{лб} = 0{,}75$.
2. Для бандажей из немагнитной проволоки $\lambda'_{лб} = 0{,}5$.

5-10. Специальные средства уменьшения реактивной э. д. с. коммутации

Из приведенных выше формул (5-36) и (5-38) можно видеть, что основная часть индуктивности рассеяния короткозамкнутого контура приходится на пазовую часть обмотки. Эта часть рассеяния может быть в крупных ответственных машинах снижена посредством пазовых глушителей в виде медных экранов, закладываемых внутрь паза параллельно с обмоткой на всей длине пазов. Во время коммутации в глушителях возникают дополнительные токи, которые уменьшают реактивную э. д. с. и глушат резкие скачки поля рассеяния коммутируемой секции, не скомпенсированные коммутирующим полем.

Пазовые глушители в виде медных проводников были предложены в 1921 г. К. И. Шенфером [31] (рис. 5-16). Так как эти глушители обтекаются индуктированным током не только в периоды коммутации, но и в остальное время, то они увеличивают потери в машине.

Другая форма пазового глушителя была разработана Л. Дрейфусом [31, 80]. В этом случае ток протекает через проводники глушителя

только в те моменты, когда рабочие проводники якорной обмотки проходят через коммутацию, а в остальное время в глушителях токов нет, что снижает дополнительные потери в машинах (рис. 5-17).

Дополнительная э. д. с. коммутации, возникающая при изменении поперечного магнитного потока, создаваемого глушителем, определяется уравнением

$$e_d = -\frac{d\Phi}{dt} \approx \frac{\Phi_г}{T}\left(1 - \varepsilon^{-t/\tau_d}\right). \qquad (5\text{-}39)$$

Эта э. д. с. возрастает в течение периода коммутации по простому показательному закону, причем действует встречно по отношению к реактивной э. д. с. в коммутируемой секции.

Отношение $\Phi_г/T$ представляет собой э. д. с. коммутации, которая наводилась бы поперечным потоком при отсутствии глушителя, а мно-



Рис. 5-16. Пазовый глушитель по К. Шенферу

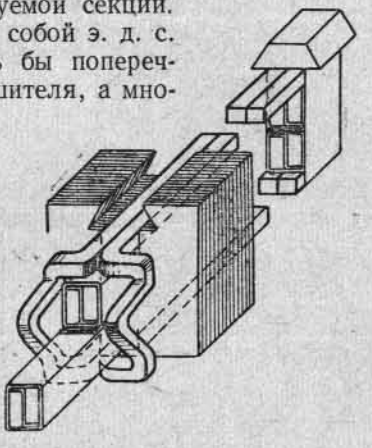


Рис. 5-17. Конструкция пазового глушителя по Л. Дрейфусу

житель в скобках указывает, во сколько раз уменьшается величина реактивной э. д. с. коммутации. Уменьшение э. д. с. коммутации зависит от отношения постоянной времени τ_d глушителя ко времени периода коммутации T. При $\tau_d = T$ э. д. с. коммутации снижается примерно до 63%, при $\tau_d = 2T$ — до 40%, а при $\tau_d/T = 4 \div 5$ — даже до 20%, что может дать существенное улучшение коммутации. Так как наличие глушителей осложняет конструкцию машины и в то же время все же несколько увеличивает потери в ней, то этот способ улучшения коммутации может применяться лишь как исключение в машинах большой мощности с особо тяжелыми условиями коммутации.

5-11. Коммутационная реакция якоря

Под коммутационной реакцией якоря понимают воздействие н. с., создаваемой токами коммутируемых секций, на основной поток машины.

Будем считать, что машина работает генератором, причем щетки установлены на геометрической нейтрали и шаг обмотки якоря $y_1 = \tau$

(рис. 5-18, *а*). В этом случае ось коммутируемых контуров совпадает с осью основных полюсов и, следовательно, н. с., создаваемая этими контурами, может действовать либо встречно, т. е. размагничивающим образом, относительно н. с. основных полюсов, либо согласно с нею, т. е. намагничивающим образом.

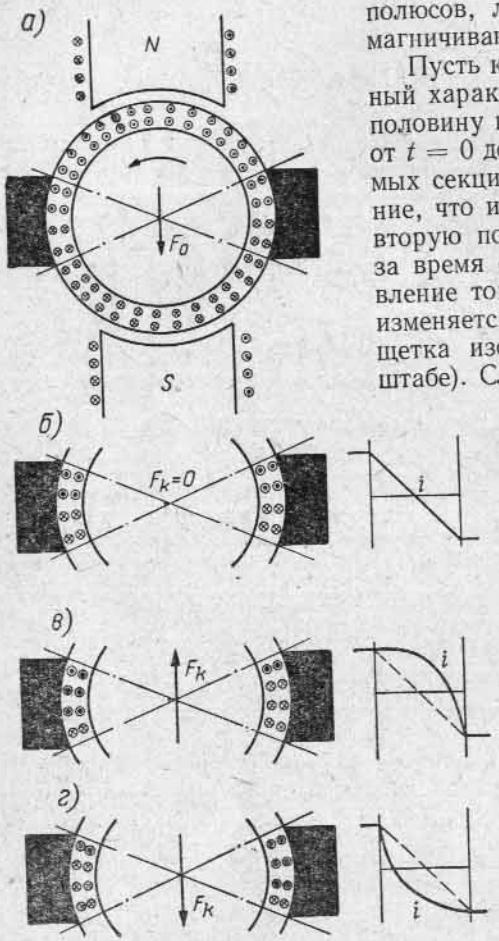


Рис. 5-18. Влияние н. с. коммутационной реакции якоря на основной поток машины

Пусть коммутация носит прямолинейный характер. В этом случае в первую половину периода коммутации за время от $t = 0$ до $t = T/2$ ток i в коммутируемых секциях имеет еще то же направление, что и до начала коммутации, а во вторую половину периода коммутации за время от $t = T/2$ до $t = T$ направление токов в коммутируемых секциях изменяется на обратное (рис. 5-18, *б*, щетка изображена в увеличенном масштабе). Следовательно, в первую половину коммутации н. с. коммутируемых секций оказывает на основное поле размагничивающее влияние, а во вторую половину — намагничивающее. В результате оба действия взаимно компенсируются, и на этом основании можно сказать, что при прямолинейной коммутации н. с. коммутационной реакции не оказывает влияния на основное магнитное поле. Этот вывод справедлив и для двигателя.

Если коммутация носит замедленный характер, то, как это видно на рис. 5-18, *в*, размагничивающее действие н. с. коммутируемых контуров преобладает, и в результате основное поле ослабляется. Нетрудно показать, что если машина работает двигателем, то коммутационная реакция оказывает на основное поле такое же размагничивающее действие при ускоренной коммутации.

Если, наоборот, коммутация носит ускоренный характер в генераторе или замедленный в двигателе, коммутационная реакция оказывает на основное поле намагничивающее действие (рис. 5-18, *г*).

5-12. Причины искрения электромагнитного характера

Взгляды на то, какие явления электромагнитного характера оказываются ближайшими причинами искрения, с течением времени изменялись. Первоначально было высказано предположение (Т. Райд) [30], что искрение вызывается чрезмерной плотностью тока под щеткой. Но поставленные затем опыты показали, что если щетка работает на коллекторе при практически активном сопротивлении коммутируемой секции, то искрение не наблюдается даже при плотностях тока 255 *а/см*^{2} в среднем на щетку и 350—400 *а/см*^{2} под сбегающим краем щетки.

Не вполне правильным оказалось также и другое предположение, а именно, что для образования искрения достаточно наличия известного напряжения размыкания между краем щетки и сбегающей пластиной коллектора. Опыты Арнольда и Ла-Кура показали, что в определенных условиях искрение не обнаруживалось даже при напряжении 10 *в*. Это привело к мысли, что искрение возникает в том случае, если короткозамкнутый щеткой контур имеет в момент размыкания достаточный запас электромагнитной энергии $^1/_2\, L_r i_k^2$, где i_k — добавочный ток коммутации при размыкании короткозамкнутого контура. По данным Арнольда, мощность, выделяющаяся при размыкании такого контура, не должна превышать 50 *вт* на 1 *см* длины сбегающего края щетки.

Исследования, проведенные К. И. Шенфером и С. Б. Юдицким, позволили прийти к выводу, что, когда в коммутируемой секции преобладает реактивная э. д. с. e_r, т. е. $e_r - e_k = +\Delta e_k$, то течение коммутационного процесса зависит от величины Δe_k, а именно: если Δe_k ниже некоторого критического значения $\Delta e_{k\,кр}$, то сопротивление R_k изменяется по кривой рис. 5-8, *г*, т. е. в момент $t = T$ оно стремится к бесконечности, а ток i_k — к нулю (см. рис. 5-8, *д*). В этом случае коммутация происходит без искрения. Если же $\Delta e_k > \Delta e_{k\,кр}$, то, начиная с некоторого момента времени $t > T/2$, сопротивление $R_к$ почти не увеличивается и, следовательно, при $t = T$ ток $i_k \neq 0$. Разряд электромагнитной энергии $^1/_2\, L_r i_k^2$, соответствующий этому току, и является причиной искрения на сбегающем крае щетки при разрыве цепи тока.

Искрение на набегающем крае щетки возникает при резко ускоренной коммутации, обусловленной значительным преобладанием э. д. с. внешнего поля e_k, т. е. при $-\Delta e_k$. При этом ток в момент замыкания проходит лишь по небольшому числу первоначально возникающих точек контакта между щеткой и пластиной. Это способствует значительному увеличению плотности тока и напряжения в этих точках, и если выделяющаяся при этом энергия достаточно велика, то набегающий край щетки раскаляется и начинает искрить.

Наряду с запасом электромагнитной энергии в коммутируемом контуре большое значение имеет мощность, выделяемая в переходном сопротивлении.

При перегрузках и, особенно, при внезапных коротких замыканиях энергия, выделяемая на коллекторе, приводит к образованию комму-

тационных дуг между щетками и коллектором и в предельном случае даже к возникновению кругового огня на коллекторе. Об этом подробнее изложено ниже в § 5-13, п. Б.

5-13. Причины искрения потенциального характера

Опыт показывает, что большое влияние на коммутацию оказывает распределение потенциала по коллектору и, в частности, наибольшее возможное напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами $u_{к.\,макс}$.

А. Распределение напряжения между соседними пластинами коллектора. Предположим, что на якоре уложена простая петлевая обмотка с полным шагом ($y_1 = \tau$). Напряжение между двумя соседними пластинами коллектора определяется э. д. с.

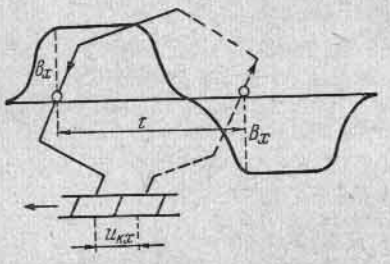


Рис. 5-19. Напряжение между двумя соседними пластинами коллектора

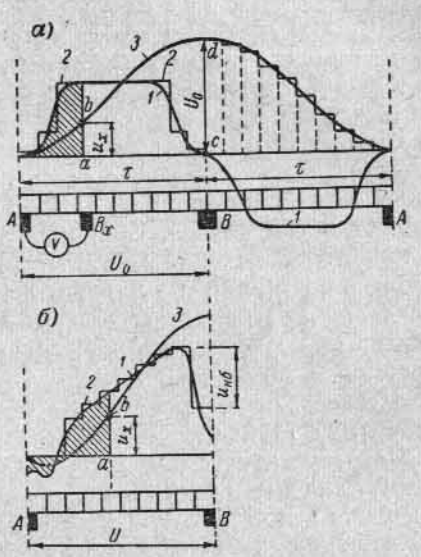


Рис. 5-20. Напряжение между соседними пластинами коллектора и потенциальные кривые: *а* — при холостом ходе; *б* — при нагрузке

$e_{kx} = 2B_x l_1 v_a = CB_x$, наводимой в секции, присоединенной к этим пластинам, причем B_x представляет собой индукцию в той точке зазора, где в данный момент находится секция (рис. 5-19). При достаточно большом числе коллекторных пластин можно считать, что распределение напряжения между соседними пластинами по коллектору соответствует в определенном масштабе распределению индукции вдоль зазора машины.

На рис. 5-20, *а* и *б* кривые *1* изображают распределение напряжения между коллекторными пластинами соответственно при холостом ходе машины и при ее нагрузке. При относительно небольшом числе коллекторных делений на полюс напряжение между пластинами имеет характер ступенчатой кривой *2*, средняя линия которой (кривая *1*) пропорциональна кривой индукции вдоль зазора машины.

Если U — напряжение между двумя соседними разнополярными щетками и K — число коллекторных делений, то среднее значение

напряжения между двумя соседними пластинами коллектора

$$u_{к.\,ср} = \frac{U}{K/2p} = 2p\frac{U}{K}. \qquad (5\text{-}40)$$

Можно показать, что напряжение $u_{к.\,ср}$ не зависит от типа обмотки.

Чтобы определить $u_{к.\,макс}$, нужно учесть, что а) э. д. с. машины создается не всем числом секций S, а только числом секций $\alpha' S = \alpha' K$ и б) поперечная реакция якоря в машинах без компенсационной обмотки может сильно искажать распределение магнитной индукции в зазоре, увеличивая ее на сбегающем крае полюса в генераторе и набегающем — в двигателе (§ 4-3 и 4-5); соответственно увеличивается э. д. с. секций, находящихся в этих местах под полюсами; такое увеличение учитывается посредством коэффициента $k_u = 1{,}3 \div 1{,}5$. Тогда

$$u_{к.\,макс} = k_u 2p\frac{U}{\alpha' K}. \qquad (5\text{-}41)$$

Испытания показали, что коммутация протекает благополучно только в том случае, если $u_{к.\,макс} \leqslant 25 \div 28$ *в* в машинах большой мощности, $30 \div 35$ *в* в машинах средней мощности и $50 \div 60$ *в* в машинах малой мощности. Если напряжение $u_{к.\,макс}$ выходит за эти пределы, то изоляционная прокладка между двумя соседними пластинами коллектора может быть перекрыта дугой, чему также способствует всегда имеющаяся на коллекторе металлическая и угольная пыль. Дуга ионизирует окружающее пространство и в свою очередь способствует образованию других, более мощных дуг, в результате чего работа машины может быть нарушена.

Б. Потенциальные кривые по коллектору. В тесной зависимости от распределения напряжения между пластинами находится кривая распределения напряжения вдоль окружности коллектора, называемая потенциальной кривой по коллектору. Чтобы получить эту кривую опытным путем, одну из щеток закрепляют относительно коллектора (обычно щетку, расположенную по линии геометрической нейтрали), а другую перемещают по окружности коллектора и измеряют напряжение между этими щетками с помощью вольтметра. На рис. 5-20, *а* и *б* кривые *3* изображают потенциальные кривые соответственно при холостом ходе машины и при ее нагрузке. Заштрихованные части площадей пропорциональны сумме э. д. с. всех секций обмотки, находящихся между щетками A и B_x, и выражают напряжение между ними. Таким образом, потенциальная кривая по коллектору представляет собой интегральную кривую по отношению к кривой распределения магнитной индукции в зазоре и, следовательно, по отношению к напряжению между соседними коллекторными пластинами. По этой кривой можно получить напряжение между любыми пластинами коллектора как разность между соответствующими ординатами потенциальной кривой. Так, например, напряжение между щетками A и B_x (рис. 5-20, *а*) определяется ординатой $ab = u_x$, напряжение между щетками A и B — ординатой $cd = U_0$ и т. д.

5-14. Причины искрения механического характера

Эти причины обусловлены, с одной стороны, недостатками коллектора и всей вращающейся части, а с другой стороны, недостатками щеточного аппарата. К первым из них относятся: эксцентричное расположение коллектора на валу, плохая балансировка вращающихся частей, неровность поверхности коллектора, выступающие края изоляционных прокладок между пластинами (поэтому обычно производится подрезка прокладки на глубину 1—1,5 *мм*), недостаточная формовка коллектора, выпучивание пластин и т. д. Ко вторым — недостаточно точное закрепление щеткодержателя на щеточном пальце, неравномерное распределение пальцев по окружности коллектора, недостаточно жесткое крепление щеточной траверсы, неправильный выбор марки щетки и т. д. Опыт показывает, что состояние «щеточного хозяйства» оказывает большое влияние на качество коммутации машины, особенно важное значение имеет щеточный контакт; о его природе и характеристиках см. в гл. 6.

5-15. Общая характеристика искрения на коллекторе при угольно-медном контакте

При удовлетворительной коммутации щетки достаточно спокойно работают на вращающемся коллекторе, без видимого искрения, и поверхности как коллектора, так и щеток остаются гладкими и блестящими.

Очистка коллектора время от времени посредством слегка пропитанного бензином или спиртом сукна весьма полезна для снятия грязи, в том числе частичек угольной пыли, которые отделяются от щеток. Без такой периодической очистки на коллекторе могут образоваться пленки масла с угольной пылью, окислов и солей меди. Это может нарушить удовлетворительную коммутацию и создать благоприятные условия для искрения, которое возникает постепенно и, несмотря на то, что другие причины отсутствуют, прогрессивно начинает возрастать. «Щебетание» или «журчание» щеток, вызванное наличием частиц грязи, также указывает на возможность возникновения искрения.

Искрение, вызванное такими пленками, имеет игольчатую форму и обычно наблюдается на краях щеток. Видимое свечение голубого цвета обязано малым частицам, нагретым до воспламенения, или малым путям светящегося газа, но оно еще не имеет характера дугообразования.

Игольчатые искры могут возникать как на сбегающем, так и на набегающем краях щетки. Это искрение встречается чаще всего и может приводить к значительным повреждениям сбегающих краев щеток, когда оно вызвано замедленной коммутацией, причем оно всегда начинается на анодной щетке.

Другой формой искрения, отличной от игольчатого, оказывающегося еще малоопасным, является разрушающее дугообразование. Оно происходит, когда имеет место полный разрыв угольно-медного контакта, и в этом случае ток должен протекать через больший или меньший промежуток, заполненный нагретым газом.

Анодные и катодные щетки (рис. 5-21) заметно различаются по своим дуговым свойствам. На рис. 5-21 стрелки обозначают соответствующие направления протекания тока, но переход электронов происходит в противоположных направлениях. Катодное пятно высокой температуры, из которого исходят электроны, находится на меди при анодной щетке и на угле при катодной щетке. В результате дуга зеленоватого цвета (от испарений меди), образующаяся на сбегающем крае анодной щетки, вытягивается вследствие движения коллектора и может поддерживаться до тех пор, пока ионизированный газ вытягивается вдоль коллектора в пространстве, остающемся достаточно проводящим. В этом случае медная пыль откладывается на щетках. Такое дугообразование проявляется особенно в том случае, когда размыкается контур с большой индуктивностью.

При катодной щетке пятно высокой температуры находится на самой поверхности щетки, обращенной к вращающейся поверхности коллектора. В этом случае получается короткая дуга, которая тесно прилегает к сбегающему краю щетки. В результате создается изрытый след на поверхности щетки, в общем случае параллельный коллекторной пластине, и тогда щеточная угольная пыль начинает покрывать коллектор.

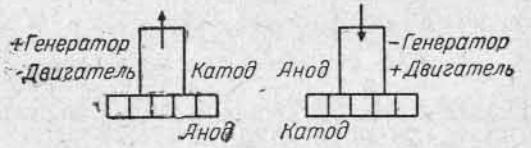


Рис. 5-21. Анодные и катодные щетки

Ближайшим по отрицательному воздействию к игольчатому искрению является «плюющееся» искрение, которое связано с взрывным действием газов, внезапно освобожденных из щеток в местах с высокими плотностями тока, в точках контакта угольной щетки с коллектором. Раскаленные частицы вылетают обычно из-под сбегающего края щетки, но иногда наблюдаются и со стороны ее набегающего края.

Струйное искрение представляет собой ленты красного цвета, выбрасываемые из-под сбегающего края катодной щетки, когда пятна с высокой температурой образуются на поверхности щетки со стороны, обращенной к коллектору. Струйное искрение состоит из раскаленных частиц угля, которые вытягиваются из-под щетки струей воздуха и цепляются за коллектор.

5-16. Круговой огонь по коллектору

При резких изменениях нагрузки или внезапном коротком замыкании может возникнуть так называемый круговой огонь по коллектору, представляющий собой мощную дугу, замыкающуюся непосредственно по коллектору между разноименными щетками или перекидывающуюся на корпус машины. Круговой огонь весьма опасен, так как может привести к тяжелой аварии машины. Изучение этого явления и разработка методов, препятствующих возникновению кругового огня или возможно быстро ликвидирующих

его последствия, имеет большое практическое значение. Физическая природа этого явления отличается чрезвычайной сложностью и была исследована А. И. Москвитиным и особенно О. Б. Броном и В. С. Александровым [114, 115].

В основных чертах процесс рисуется в следующем виде. Когда происходит резкий бросок тока, то в коммутируемой секции получает значительное преобладание реактивная э. д. с. e_r, вследствие чего коммутация приобретает замедленный характер. При этих условиях в переходном щеточном контакте выделяется значительная энергия, которая вызывает резкое возрастание переходного падения напряжения и приводит к возникновению между сбегающей коллекторной пластиной и краем щетки мощной коммутационной дуги. Вследствие движения коллектора эта дуга механически растягивается и под действием электродинамических сил движется по коллектору с большой скоростью, иногда превышающей окружную скорость коллектора.

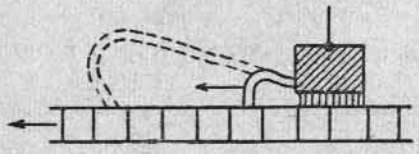


Рис. 5-22. Образование и развитие дуги на коллекторе

Наряду с этим большой бросок тока вызывает значительное искажение распределения основного поля из-за действия реакции якоря. Вследствие этого распределение потенциала между коллекторными пластинами, имевшее место при нормальном режиме, нарушается. Это, с одной стороны, может привести к возникновению потенциальных дуг между некоторыми соседними пластинами из-за возрастания напряжения между ними, а с другой стороны, искажение распределения потенциала вызывает резкое нарастание напряжения между щеткой и коллекторными пластинами по мере их удаления от сбегающего края щетки. Такое нарастание напряжения способствует движению коммутационной дуги по коллектору, так как с ее удлинением для поддержания горения дуги требуется все большая разность потенциалов.

При своем движении дуга сильно растягивается электродинамическими силами (рис. 5-22) и, дойдя до некоторой точки коллектора, гаснет. В этот момент возникает новая дуга и снова движется по коллектору. Вследствие ионизации надколлекторного пространства предыдущей дугой условия горения последующей дуги облегчаются, и она до своего погасания пробегает большее расстояние по коллектору. Весь процесс многократно повторяется, нося высокочастотный характер. При этом коммутационные дуги сливаются с потенциальными, образуя вокруг коллектора сплошное кольцо. Все это сопровождается сильным световым и звуковым эффектом. Средства борьбы с круговым огнем см. в гл. 6.

Другой причиной возникновения кругового огня на коллекторе, не связанной непосредственно с коммутационным искрением, может являться грязь на коллекторе. Частицы грязи или угольной пыли, пропитанные маслом, забивают изоляцию между пластинами. Эти частицы, проходя под щетками и воспламеняясь, создают проводящие мостики, что является благоприятным условием для протекания

значительного тока утечки между коллекторными пластинами. Ток поддерживает нагрев воспламененных пятен, создающих вокруг коллектора сильно ионизированное пространство. Такое нарушение нормальной работы машины может быть, однако, предотвращено надлежащей очисткой коллектора. Если же этим пренебречь, то может возникнуть круговой огонь, который является уже полным коротким замыканием от щетки к щетке вокруг всего коллектора.

Глава шестая

СРЕДСТВА УЛУЧШЕНИЯ КОММУТАЦИИ И МЕТОДЫ ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

6-1. Средства борьбы с искрением электромагнитного характера

В предыдущей главе было показано, что основной причиной искрения электромагнитного характера является добавочный ток коммутации i_k, причем

$$i_k = \frac{\Sigma e}{R_k} = \frac{e_r + e_k}{R_k}, \qquad (6\text{-}1)$$

где R_k — сопротивление всего коммутирующего контура.

Из формулы (6-1) следует, что уменьшения тока i_k и, следовательно, улучшения коммутации можно достигнуть посредством: а) уменьшения э. д. с. e_r, поскольку она ухудшает условия коммутации; б) создания в зоне коммутации коммутирующего поля такой величины и полярности, чтобы создаваемая им в коммутирующей секции э. д. с. e_k могла уравновесить э. д. с. e_r; в) увеличения сопротивления цепи коммутирующей секции путем выбора щетки с большим переходным сопротивлением щеточного контакта.

6-2. Уменьшение реактивной э. д. с. e_r

Из формулы (5-35) видно, что условия коммутации легче в машинах с меньшими значениями w_c, v_a, l_1, ζ и A. Поэтому обычно стремятся к тому, чтобы секция состояла из одного витка, т. е. $w_c = 1$; с точки зрения уменьшения магнитной проводимости ζ выгоднее меньшие по высоте и большие по ширине пазы и ступенчатые обмотки с укороченным шагом. Но, с другой стороны, уменьшение скорости v_a и линейной нагрузки A нецелесообразно, так как приводит к увеличению габаритов и соответственно стоимости машины.

6-3. Создание коммутирующего поля сдвигом щеток с нейтрали

В машинах без добавочных полюсов коммутирующее поле, необходимое для создания э. д. с. e_k, уравновешивающей э. д. с. e_r, образуется путем сдвига щеток с геометрической нейтрали.

Чтобы показать, как именно нужно сдвигать щетки, предположим, что машина работает генератором $Г$ и что щетки A и B поставлены по линии геометрической нейтрали (рис. 6-1, *а*). Изобразим э. д. с. e_a, наводимую в секции *а* до начала коммутации, отрезком, направленным вверх от оси абсцисс (рис. 6-1, *б*). При работе машины генератором ток i_a совпадает по направлению с э. д. с. e_a и создает в зоне коммутации поперечное поле якоря, показанное на рис. 6-1, *а* двумя штриховыми линиями. Применяя правило правой ладони, находим, что когда секция *а* подходит под щетку A и начинает коммутироваться, то поле якоря наводит в этой секции э. д. с. e_{aq} того же знака, что и э. д. с. e_a; поэтому на рис. 6-1, *б* э. д. с. e_{aq} изображается отрезком, направленным, так же как э. д. с. e_a, вверх от оси абсцисс.

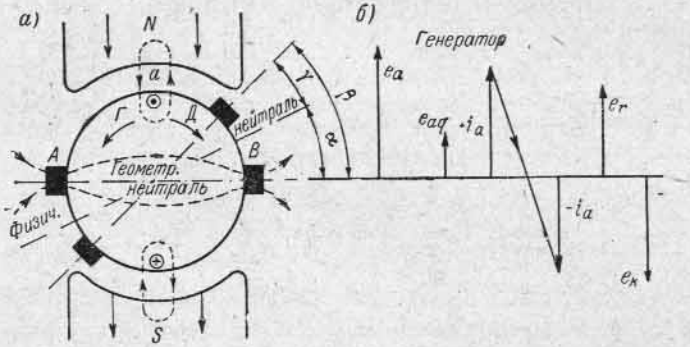


Рис. 6-1. Сдвиг щеток для улучшения коммутации в генераторе

За время коммутации T ток i_a изменяется от $+ i_a$ до $- i_a$, и в коммутируемой секции создается реактивная э. д. с. e_r, всегда направленная встречно относительно происходящего в секции изменения тока i_a; соответственно этому она должна быть изображена отрезком, направленным, так же как э. д. с. e_a и e_{aq}, вверх от оси абсцисс. Мы видим, что э. д. с. e_{aq} действует в том же направлении, что и э. д. с. e_r, т. е. замедляет коммутацию и, следовательно, оказывает на нее неблагоприятное влияние. Сдвинув щетки по направлению вращения якоря на угол α в положение физической нейтрали (рис. 6-1, *а*), получаем $e_{aq} = 0$. Но, кроме этого, нужно еще скомпенсировать реактивную э. д. с. e_r, создав в коммутируемой секции э. д. с. e_k, направленную относительно э. д. с. e_r в противоположную сторону; следовательно, на рис. 6-1, *б* она должна быть изображена отрезком, направленным вниз от оси абсцисс. Сопоставляя э. д. с. e_a и e_k, видим, что они должны быть разных знаков; другими словами, если э. д. с. e_a *до коммутации создается в поле северной полярности*, то э. д. с. e_k во время *коммутации* должна быть создана *в поле южной полярности*. Чтобы удовлетворить этому условию, нужно дополнительно сдвинуть щетки с физической нейтрали на некоторый угол γ по направлению вращения якоря.

Этот вывод носит общий характер, т. е. *для улучшения коммутации машины без добавочных полюсов, работающей в режиме генератора, нужно сдвигать щетки с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря на угол* $\beta = \alpha + \gamma$.

Если машина работает двигателем при той же полярности основных полюсов и при том же направлении тока в обмотке якоря, то по сравнению с генератором она вращается в противоположную сторону (на рис. 6-1, *а* — по направлению вращения часовой стрелки). Следовательно, *для улучшения коммутации при работе машины двигателем нужно сдвигать щетки с геометрической нейтрали против направления вращения якоря.*

Основной недостаток способа создания коммутирующего поля путем сдвига щеток состоит в том, что угол сдвига щеток β должен изменяться в зависимости от нагрузки. В ряде случаев это невозможно, например в машинах закрытого типа или в машинах, работающих при резко переменной нагрузке. Поэтому в таких машинах приходится ставить щетки в некоторое среднее положение, соответствующее некоторой средней нагрузке. Но в этом случае будет получаться излишнее коммутирующее поле при малых нагрузках и недостаточное при больших.

При щетках, стоящих на геометрической нейтрали, допустимая величина нескомпенсированной э. д. с. в машинах без добавочных полюсов составляет $e_r + e_{aq} \leqslant 2 \div 3$ *в*.

При сдвиге щеток в положение, соответствующее половине нагрузки, можно допустить $e_r + e_{aq} \leqslant 4$ *в*.

6-4. Создание коммутирующего поля посредством добавочных полюсов

Наиболее совершенным и широко распространенным способом улучшения коммутации является применение добавочных полюсов.

Они предложены Метером еще в 1885 г., но введены в практику электромашиностроения только примерно 20 лет спустя.

Добавочные полюсы располагаются между основными полюсами по линиям геометрических нейтралей (рис. 6-2). Щетки устанавливаются тоже по этим линиям и остаются в этом положении при всех нагрузках.

Число добавочных полюсов обычно равно числу основных полюсов, и только в машинах малой мощности его иногда уменьшают в два раза. Так, например, двухполюсные машины типа ПН-5, ПН-10 и ПН-17,5 мощностью 0,3 — 3,7 *квт* имеют два основных полюса и один добавочный.

Полярность добавочных полюсов определяется из соображения, что они должны выполнять ту же роль, что и сдвиг щеток в машинах без добавочных полюсов. Поэтому, *если машина работает в режиме генератора, то добавочный полюс должен иметь полярность того полюса, на который якорь набегает, а в двигателе — наоборот.*

Для взаимной компенсации э. д. с. e_r и e_k при какой-нибудь, например номинальной, нагрузке необходимо, чтобы коммутирующая э. д. с. e_k возможно ближе совпадала по форме с кривой реактивной э. д. с. e_r, определяемой кривой результирующей индуктивности. Практически достигнуть этого нельзя главным образом потому, что кривая э. д. с. e_r имеет ступенчатый характер (см. кривые на рис. 5-10). Примерные кривые э. д. с. e_k и e_r в зависимости от времени показаны на рис. 6-3; заштрихованные площадки на том же рисунке соответствуют остаточной э. д. с. $e_r + e_k$. Таким образом, говоря о взаимной компенсации э. д. с. e_r и e_k, мы должны иметь в виду их с р е д н и е

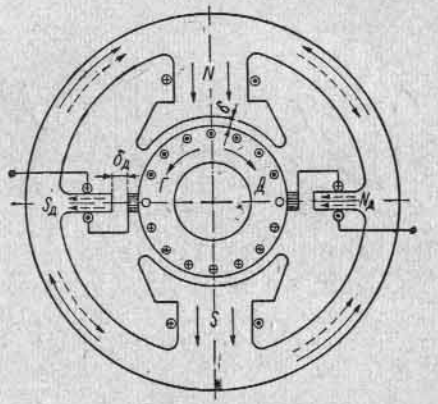


Рис. 6-2. Полярность добавочных полюсов при работе машины генератором *Г* и двигателем *Д*

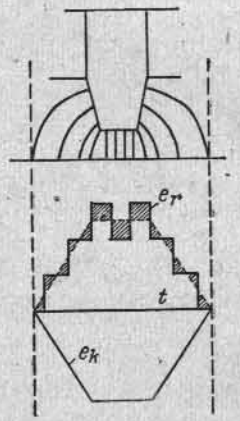


Рис. 6-3. Кривые полей в зоне коммутации

з а в р е м я к о м м у т а ц и и з н а ч е н и я, т. е. считать, что $e_k = e_r$. Пользуясь формулой (5-35) и выражением $e_k = 2w_c v_a l_k B_k$, получаем:

$$2w_c v_a l_k B_k = 2w_c v_a l_1 \zeta A,$$

откуда

$$B_k = \frac{l_1}{l_k} \zeta A. \qquad (6\text{-}2)$$

Чтобы сохранить пропорциональность между индукцией B_k и линейной нагрузкой A при всех режимах работы, *необходимо соединить обмотку добавочных полюсов последовательно с обмоткой якоря.* При этом *магнитная цепь добавочных полюсов должна быть не насыщена*, так как только в этом случае индукция B_k будет изменяться пропорционально току в якоре и, следовательно, линейной нагрузке. Для этого: а) увеличивают зазор под добавочным полюсом по сравнению с зазором главного полюса (см. табл. 11-1); б) индукцию в сердечнике добавочного полюса берут не более 0,8 — 1 *тл* при номинальном токе; в) индукцию в ярме, создаваемую основной н. с., берут не более 1,2 *тл*, принимая во внимание, что на отдельных участках ярма н. с. основных и добавочных полюсов суммируются (см. рис. 6-2).

Ширину полюсного наконечника добавочного полюса $b_д$ определяют в зависимости от ширины коммутационной зоны $b_{kм}$. Обычно

$$b_д = (0{,}9 \div 1{,}0)\, b_{kм}. \qquad (6\text{-}3)$$

Ширина коммутационной зоны для простой петлевой обмотки с полным шагом определяется по рис. 5-10, *б*. Если шаг обмотки укорочен на

$$\varepsilon = \frac{Z_э}{2p} - y_1 = \frac{S}{2p} - y_1 \text{ элементарных пазов,}$$

то стороны, находящиеся в нижнем слое паза, вступают в коммутацию не одновременно со сторонами в верхнем слое того же паза, а позже или раньше последних в зависимости от направления вращения якоря. Поэтому до конца коммутации последней нижней стороны якорь добавочно перемещается на расстояние $\left(\frac{S}{2p} - y_1\right) t_к \frac{D_a}{D_k} = \varepsilon t'_к$, и, следовательно, на ту же величину расширяется зона коммутации, т. е.

$$b_{kм} = b'_щ + (u - 1 + \varepsilon)\, t'_к. \qquad (6\text{-}4)$$

Рассуждая аналогично, имеем в общем случае

$$b_{kм} = b'_щ + \left(u - \frac{a}{p} + \varepsilon\right) t'_к. \qquad (6\text{-}5)$$

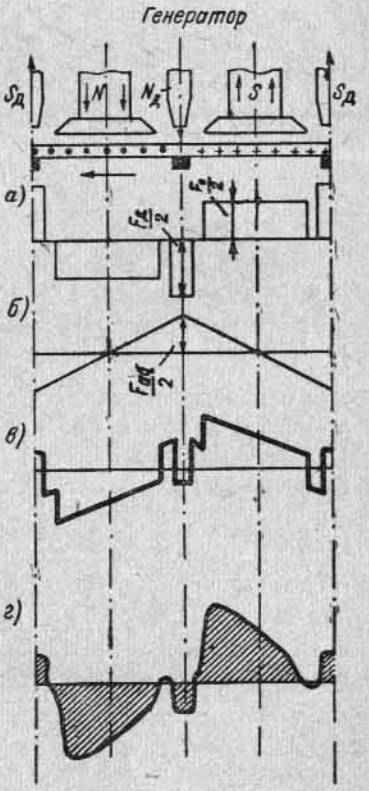


Рис. 6-4. Н. с. и кривая результирующего поля машины с добавочными полюсами без компенсационной обмотки

Чтобы рассчитать магнитную цепь добавочных полюсов, изобразим рис. 6-2 в развернутом виде и построим отдельно кривые н. с. основных полюсов F_0, поперечной реакции якоря F_{aq}, добавочных полюсов $F_д$, результирующей н. с. машины и кривую распределения поля в зазоре машины с добавочными полюсами, работающей в режиме генератора (рис. 6-4, *а*, *б*, *в*, *г*, см. также рис. 4-7, *а*). Мы видим, что *в зоне коммутации н. с. добавочных полюсов и реакции якоря действуют взаимно встречно, причем нетрудно убедиться, что этот вывод носит общий характер.*

Так как магнитная цепь добавочных полюсов не насыщена, то магнитным сопротивлением стали этой цепи можно пренебречь и считать, что

$$F_д = F_{aq} + F_{δд}, \qquad (6\text{-}6)$$

где $F_{\delta д}$ — н. с. на пару полюсов, необходимая для проведения потока добавочных полюсов через двойной зазор $2\delta_д$ между добавочным полюсом и якорем. Согласно формуле (4-4) $F_{aq} = \tau A$, а $F_{\delta д}$ выражается формулой, аналогичной (2-16) для зазора основного полюса. Следовательно,

$$F_д = \tau A + \frac{2}{\mu_0} B_k \delta_д k_{\delta д}. \qquad (6\text{-}7)$$

Здесь $k_{\delta д}$ — коэффициент зазора добавочных полюсов, который можно определить по формуле, аналогичной (2-15):

$$k_{\delta д} = \frac{t_1 + 5\delta_д}{b_{з1} + 5\delta_д}. \qquad (6\text{-}8)$$

Обычно

$$\delta_д > \delta; \quad k_{\delta д} \approx k_\delta; \quad \frac{F_д}{F_{aq}} = 1{,}15 \div 1{,}30.$$

Взаимно встречным действием н. с. $F_д$ и F_{aq} объясняется тот факт, что рассеяние добавочных полюсов значительно больше, чем рассеяние основных полюсов. Если $\Phi_д$ — поток в сердечнике добавочного полюса и $\Phi_{км}$ — поток в зазоре под этим полюсом, то в машинах без компенсационной обмотки имеем коэффициент рассеяния добавочных полюсов

$$k_{\delta д} = \Phi_д / \Phi_{км} = 2 \div 5.$$

Для уменьшения рассеяния добавочных полюсов их обмотку располагают по возможности ближе к якорю и воздушный зазор делят на две части — зазор между якорем и наконечником добавочного полюса и зазор между сердечником добавочного полюса и ярмом, заполняя последний прокладками из немагнитного материала.

Численный пример

Произведем расчет числа витков $w_д$ на один добавочный полюс для той же машины ПН-290, данные которой были приведены ранее при расчете н. с. основных полюсов (см. § 2-13).

При работе машины в режиме генератора имеем: $P_н = 23$ *квт*; $U_н = 230$ *в*; $I_н = 100$ *а* или, если учесть и ток возбуждения порядка 3 *а*, необходимый для возбуждения машины, то $I_a = I + i_в = 103$ *а*; $2p = 4$; $D_a = 295$ *мм*; $N = 524$; $2a = 2$; $\tau = 23{,}2$ *см*; длина добавочного полюса равна длине главного полюса и составляет $l_д = 13{,}5$ *см*; зазор под добавочным полюсом $\delta_д = 0{,}4$ *см*, в то время как зазор под главным полюсом $\delta = 0{,}2$ *см*; $t_1 = 28{,}1$ *мм* и $b_{з1} = 17{,}3$ *мм*.

Тогда по формуле (6-8)

$$k_{\delta д} = \frac{t_1 + 5\delta_д}{b_{з1} + 5\delta_д} = \frac{28{,}1 + 20}{17{,}3 + 20} = 1{,}29.$$

Линейная нагрузка якоря

$$A = \frac{i_a N}{\pi D_a} = \frac{\frac{103}{2} \cdot 524}{\pi \cdot 29{,}5} = 291 \ а/см.$$

Взяв среднее значение $\zeta = 7 \cdot 10^{-6}$ для магнитной проводимости рассеяния машины средней мощности с проволочной обмоткой (см. стр. 183), найдем [см. формулу (5-35)]:

$$e_r = 2 w_c l_1 v_a A \zeta = 2 \cdot 2 \cdot 14 \cdot 15 \cdot 291 \cdot 7 \cdot 10^{-6} = 1{,}71 \ в.$$

Тогда индукция коммутирующего поля B_k должна быть [см. формулу (6-2)]

$$B_k = \zeta A \frac{l_1}{l_д} = 7 \cdot 10^{-6} \cdot 291 \cdot 10^2 \cdot \frac{140}{135} = 0{,}211 \ тл = 2110 \ гс;$$

$$F_{aq} = \tau A = 23{,}2 \cdot 291 = 6750 \ а;$$

$$F_{\delta д} = \frac{2}{\mu_0} B_k \delta_д k_{\delta д} = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0{,}21 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}29 = 1740 \ а.$$

Следовательно,

$$F_д = F_{aq} + F_{\delta д} = 6750 + 1740 = 8490 \ а;$$

$$w_д = \frac{F_д}{2 I_a} = \frac{8490}{2 \cdot 103} = 41{,}3 \text{ витка}$$

(в натуре взято 41,5 витка).

Из приведенного примера, что в сумме н. с. $F_{aq} + F_{\delta д}$ главное значение имеет F_{aq}, причем $F_д / F_{aq} = 8490/6750 = 1{,}26$. Складывая кривые н. с. на рис. 6-4, *а* и *б*, получаем кривую результирующей н. с. на рис. 6-4, *в*; соответствующая кривая распределения магнитной индукции под главными и добавочными полюсами показана на рис. 6-4, *г*.

Следует заметить, что произвести точный расчет н. с. $F_д$ практически не удается, поскольку значения ζ являются приближенными, и окончательное установление величины $F_д$ производится уже на выполненных машинах путем «настройки» коммутации. Одним из способов «настройки» является метод безыскровой зоны, осуществляемый посредством снятия кривых подпитки. Это позволяет устанавливать оптимальное значение числа витков добавочного полюса $w_д$ или воздушного зазора под добавочным полюсом (см. § 6-11, п. В).

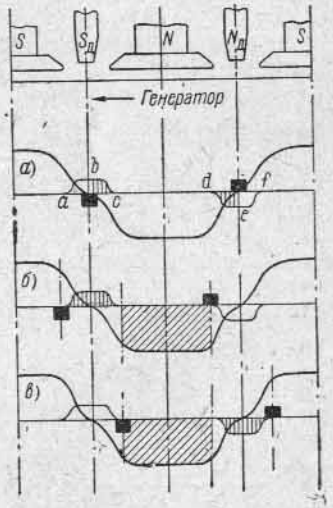


Рис. 6-5. Влияние добавочных полюсов на основное поле

6-5. Влияние добавочных полюсов на основное поле

При положении щеток на геометрической нейтрали добавочные полюсы не оказывают никакого влияния на основное поле, так как их размагничивающее и намагничивающее действия, определяемые заштрихованными площадками на рис. 6-5, *а*, взаимно нейтрализуются в пределах полюсного деления.

Если при работе машины генератором мы сдвинем щетки с нейтрали по направле-

нию вращения якоря (рис. 6-5, *б*), то заштрихованные площадки полей основного и добавочного полюсов будут иметь разные знаки, т. е. в этом случае добавочные полюсы размагничивают машину. Наоборот, при сдвиге щеток с нейтрали против направления вращения якоря генератора добавочные полюсы намагничивают машину (рис. 6-5, *в*). Таким образом, *добавочные полюсы оказывают такое же влияние на основное поле, как и продольная реакция якоря*. Поэтому часто действие добавочных полюсов включают в действие реакции якоря, не оговаривая его особо. Этот вывод можно распространить и на двигатель.

6-6. Влияние насыщения добавочных полюсов на коммутацию [87а]

Выше (см. § 6-4) мы видели, что компенсация реактивной э. д. с. e_r коммутирующей э. д. с. e_k возможна при изменении нагрузки только в том случае, если коммутирующее поле B_k изменяется практически пропорционально току I_a.

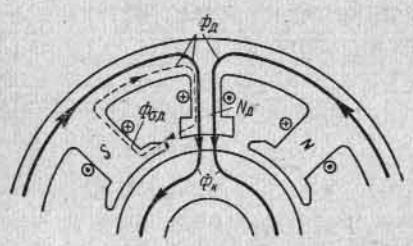


Рис. 6-6. Магнитная цепь добавочных полюсов

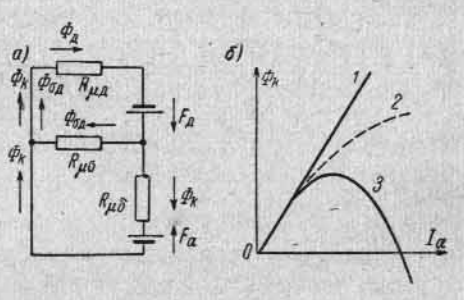


Рис. 6-7. Влияние насыщения добавочных полюсов

При значительном увеличении тока I_a сверх номинального магнитная цепь добавочных полюсов может оказаться насыщенной и линейность изменения $B_k = f(I_a)$ нарушается.

На рис. 6-6 показаны сплошными линиями полезный коммутирующий поток Φ_k и штриховой линией — поток рассеяния добавочного полюса $\Phi_{\sigma д}$. Результирующий поток в сердечнике добавочного полюса $\Phi_д = \Phi_k + \Phi_{\sigma д}$.

Имея в виду пару полюсов, представим магнитную цепь добавочного полюса схематически в виде эквивалентной цепи электрического тока (рис. 6-7, *а*). Здесь $F_д$ и F_a — встречно действующие н. с. добавочного полюса и якоря, $R_{\mu\delta}$, $R_{\mu\sigma}$ и $R_{\mu д}$ — магнитные сопротивления на путях: коммутирующего потока Φ_k в зазоре под добавочным полюсом, потока рассеяния $\Phi_{\sigma д}$ и результирующего потока $\Phi_д$ по стали. Тогда

$$F_д - F_a = \Phi_k R_{\mu\delta} + \Phi_д R_{\mu д},$$

откуда

$$\Phi_k = \frac{(F_д - F_a) - \Phi_д R_{\mu д}}{R_{\mu\delta}}.$$

В этой формуле сопротивление $R_{\mu\delta}$ может быть принято постоянным, поскольку оно обусловлено сопротивлением зазора. При увеличении тока I_a н. с. $F_д$ и F_a и, стало быть, разность $F_д - F_a$ растут пропорционально току I_a. Если машина не насыщена, то сопротивление $R_{\mu д}$ остается постоянным, а поток $\Phi_д$ растет пропорционально току I_a. В этих условиях поток Φ_k растет тоже пропорционально току I_a, и зависимость $\Phi_k = f(I_a)$ имеет характер прямой линии (кривая *1* на рис. 6-7, *б*). Но при насыщении магнитной цепи добавочного полюса сопротивление $R_{\mu д}$ начинает заметно возрастать, и зависимость $\Phi_k = f(I_a)$ начинает отступать от прямолинейного закона. При этом, если бы не было потока рассеяния $\Phi_{\sigma д}$, то эта зависимость имела бы характер кривой намагничивания (кривая *2* на рис. 6-7, *б*). В действительности поток рассеяния добавочного полюса способствует более быстрому росту потока $\Phi_д$ по сравнению с потоком Φ_k; поэтому произведение $\Phi_д R_{\mu д}$ растет быстрее, чем ток I_a, и тем быстрее, чем больше насыщение добавочного полюса. При некотором значении тока I_a поток Φ_k не только перестает увеличиваться, но начинает уменьшаться, а затем, при дальнейшем увеличении тока I_a, проходит через нуль и даже изменяет свой знак, как это представлено кривой *3* на рис. 6-7, *б*.

Из сказанного следует, что при перегрузках машины постоянного тока достигается такой предел, при котором коммутирующая э. д. с. e_k не только перестает уравновешивать реактивную э. д. с. e_r, но начинает действовать в том же направлении, что и последняя. В этих условиях безыскровая работа машины является, очевидно, совершенно невозможной [87 а].

6-7. Компенсационная обмотка

Компенсационная обмотка, предложенная Менгесом еще в 1884 г., является одним из самых действенных средств, способствующих улучшению коммутации машин, работающих при резко переменной нагрузке. Цель компенсационной обмотки состоит в том, чтобы в наибольшей возможной степени устранить искажение основного магнитного поля, вызываемое реакцией якоря. Для этого компенсационная обмотка укладывается в пазы, проштампованные в полюсных наконечниках основных полюсов, и выполняется по схеме на рис. 6-8. Чтобы компенсация имела место при любой нагрузке, нужно соединить компенсационную обмотку последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы н. с. обеих обмоток были направлены встречно друг другу. На рис. 6-9, *а* кривые *1* и *2* изображают распределение н. с. реакции якоря F_{aq} и компенсационной обмотки F_k; кривая *3*, показанная прямоугольником *adeh*, изображает н. с. добавочных полюсов для случая, когда машина не имеет компенсационной обмотки.

Чтобы при нагрузке искажение основного магнитного поля свести до минимума, нужно полностью скомпенсировать в пределах полюсной дуги $b' = \alpha'\tau$ н. с. поперечной реакции якоря F_{aq}; для этого необходимо выполнить компенсационную обмотку так, чтобы отрезки

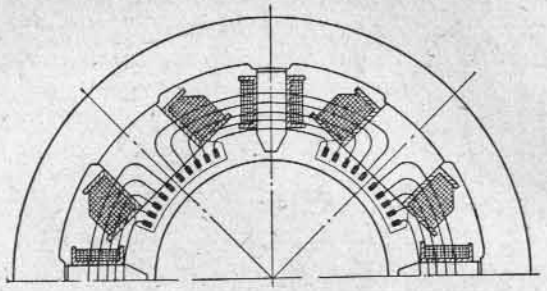


Рис. 6-8. Компенсационная обмотка

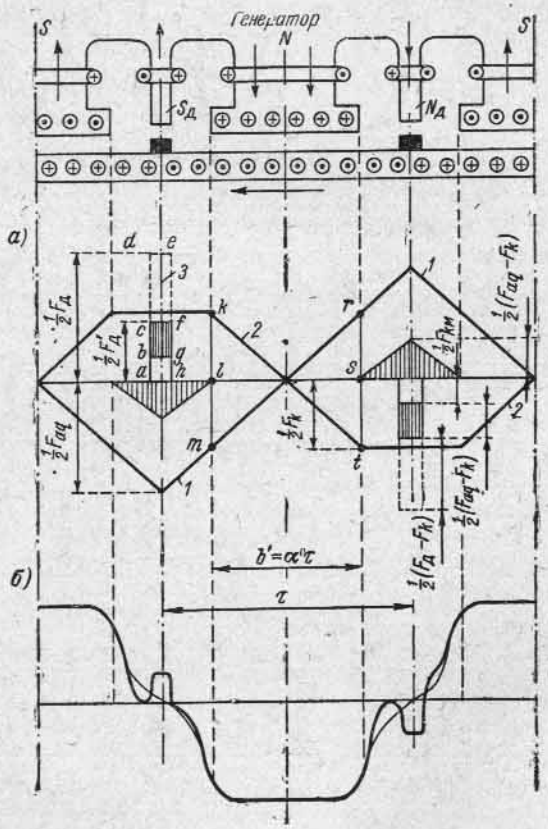


Рис. 6-9. Кривые н. с. F_{aq} и F_k и кривая результирующего поля машины с компенсационной обмоткой

$kl = ts = \frac{1}{2}F_k$ были равны отрезкам $ml = rs = \frac{1}{2}\alpha' F_{aq}$, т. е. чтобы

$$F_k = \alpha' F_{aq} = \alpha' \tau A = b' A. \qquad (6\text{-}9)$$

При таком распределении н. с. F_{aq} и F_k в междуполюсном пространстве образуется некомпенсированная (остаточная) н. с. $F_{aq} - F_k$ (на рис. 6-9, *а* заштрихованные треугольники), которая, однако, мало влияет на работу машины, так как поле, создаваемое ею в междуполюсном пространстве, невелико. При наличии компенсационной обмотки н. с. добавочных полюсов составляет $F'_д = F_д - F_k$, т. е. она значительно меньше, чем в машинах без компенсационной обмотки; на рис. 6-9, *а* н. с. $F'_д$ показана прямоугольником *acfh*, причем часть этой н. с., показанная прямоугольником *bcfg*, компенсирует оставшуюся в междуполюсном пространстве разностную н. с. $F_{aq} - F_k$, а прямоугольник *abgh* определяет н. с. $F_{kм}$, необходимую для создания коммутирующего потока Φ_k.

На рис. 6-9, *б* показана кривая распределения поля в машине с компенсационной обмоткой. Мы видим, что в такой машине кривая основного поля практически не зависит от нагрузки. Это повышает степень надежности работы машины в коммутационном отношении, но осложняет ее конструкцию и заметно повышает стоимость. Поэтому компенсационная обмотка применяется только в машинах относительно большой мощности, начиная примерно со 150 *квт*.

6-8. Добавочные средства борьбы с круговым огнем

Опыт показывает, что при резких изменениях тока круговой огонь может возникнуть даже в машинах с компенсационной обмоткой. Для повышения устойчивости машины в отношении кругового огня применяются следующие добавочные меры.

А. Специальный расчет и экспериментальная наладка коммутации. Машины, предназначенные для работы при перегрузках и резких изменениях тока, рассчитываются так, чтобы при номинальном режиме работы коммутация была несколько ускоренной. Тогда при перегрузках она приобретает замедленный характер, но расчет должен быть произведен так, чтобы в обоих случаях коммутация была достаточно благоприятной.

Об экспериментальной наладке коммутации машины — см. § 6-13.

Б. Индуктивный шунт. Мы знаем, что вихревые токи, возникающие в сплошных частях магнитной цепи машины при резких изменениях тока, препятствуют столь же резкому изменению магнитного потока добавочных полюсов. Чтобы устранить этот недостаток, иногда применяют индуктивный шунт («дивертор»), включаемый по схеме рис. 6-10, *а* параллельно обмотке добавочных полюсов *ДП*, а при компенсационной обмотке *КО* — последовательно с последней. При надлежащем выборе активного сопротивления шунта и его индуктивности можно добиться чтобы при резком изменении тока i ток добавочных полюсов $i_д$ изменялся еще резче, и этим ускорить про-

цесс изменения потока добавочных полюсов как при увеличении тока i, так и при его уменьшении (рис. 6-10, *б*).

При установившемся режиме работы ток шунта $i_ш \leqslant 0{,}1 I_н$. Основная область применения индуктивных шунтов — машины большой мощности, работающие при резко переменной нагрузке. С той же целью ослабления экранирующего действия вихревых токов сердечники добавочных полюсов выполняются, так же как и сердечники основных полюсов, из листовой стали.

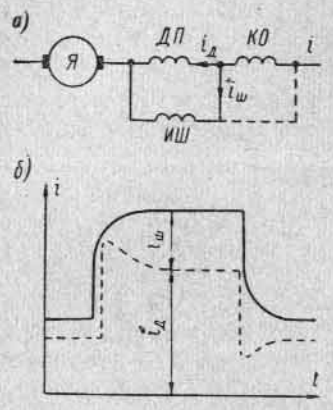


Рис. 6-10. Схема включения индуктивного шунта и кривые изменения токов i и $i_д$

В. Барьеры. Экраны. Быстродействующие автоматы выключения. Чтобы создать препятствие на пути распространения дуги, между щеточными болтами разной полярности устанавливают по длине коллектора барьеры из дугостойкого изолирующего материала. Для защиты обмотки якоря от повреждения дугой устанавливают между коллектором и петушками обмотки якоря, т. е. в поперечном направлении, изолирующий экран. С тою же целью применяют и воздушное дутье, сдувающее дугу в сторону подшипника, защищаемого особой цементноасбестовой перегородкой.

Особенно благоприятны условия образования кругового огня при коротком замыкании машины. Поэтому в цепи якоря устанавливают быстродействующий автомат, размыкающий эту цепь раньше, чем ток короткого замыкания достигнет опасного значения. Автомат системы А. И. Голубева может разомкнуть цепь короткого замыкания за 0,01 *сек*.

6-9. Щетки и их характеристики [97—100, 102—105]

Одной из важнейших характеристик щетки является величина ее удельного переходного сопротивления $\rho_щ$, т. е. сопротивления, рассчитанного на единицу контактной поверхности щетки. Если $R_щ$ — сопротивление всей контактной поверхности щетки и $S_щ$ — площадь этой поверхности, то $R_щ = \rho_щ / S_щ$. Следовательно, падение напряжения в контактном слое будет

$$\Delta U_щ = I R_щ = j_щ S_щ \frac{\rho_щ}{S_щ} = j_щ \rho_щ. \qquad (6\text{-}10)$$

Здесь I — ток, идущий в щетку или из нее; $j_щ$ — средняя плотность тока под щеткой.

Исследования показывают, что переходное сопротивление щетки и соответственно переходное падение напряжения зависят от ряда факторов, из числа которых главное значение имеют: а) материал щеток и материал коллектора или контактных колец; б) плотность тока $j_щ$; в) направление тока — от щетки к коллектору (кольцу) или

от коллектора к щетке; г) температура контактной поверхности; д) ее химическое состояние; е) удельное давление на щетку; ж) линейная скорость на окружности коллектора; з) механические факторы.

Применяемые в СССР марки щеток и их основные характеристики приведены в табл. 6-1.

Наибольшие сопротивления $\rho_щ$ имеют твердые угольно-графитные щетки; меньшее сопротивление имеют графитные и электрографитированные щетки и наименьшее — мягкие медно- или бронзо-графитные щетки.

На рис. 6-11 показаны кривые $\Delta U_щ = f(j_щ)$ для щеток различных марок. Так как падение напряжения при направлении тока от металла к угольной щетке больше, чем при обратном направлении

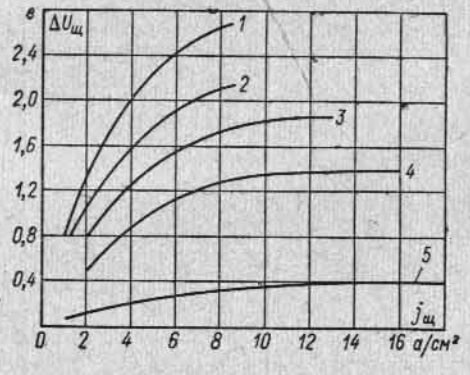


Рис. 6-11. Кривые $\Delta U_щ = f(j_щ)$ для щеток различных марок

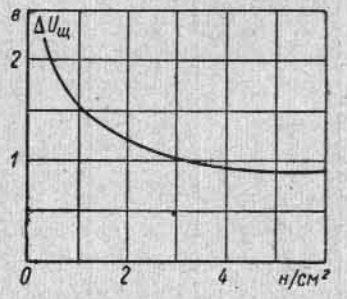


Рис. 6-12. Кривая напряжения $\Delta U_щ$ в зависимости от удельного давления на щетку

тока, то под $\Delta U_щ$ понимают сумму падений напряжения для щеток обеих полярностей. Кривые *1* и *2* относятся к твердым щеткам, кривые *3* и *4* — к щеткам средней твердости и мягким, кривая *5* — к бронзографитным щеткам. Для кривых *3* и *4* характерна их пологая часть, показывающая, что начиная с некоторой плотности тока $\Delta U_щ \approx \text{const}$, т. е. что переходное сопротивление изменяется в этой зоне почти обратно пропорционально $j_щ$.

С увеличением температуры электропроводность щеток возрастает, и, следовательно, переходное сопротивление уменьшается; поэтому машина, имеющая достаточно хорошую коммутацию в холодном состоянии, может начать заметно хуже коммутировать по мере повышения температуры. С этой точки зрения необходимо, чтобы в машине были применены щетки только одной марки, имеющие одинаковые размеры. Так как все одноименные щетки соединены параллельно, то при несоблюдении этого требования более нагретые щетки, имея меньшее переходное сопротивление, будут проводить больший ток; это вызовет дальнейшее повышение температуры этих щеток и может повести к выгоранию как самих щеток, так и токоподводящих кабелей.

Таблица 6-1

Группа щеток	Марка	Номинальная плотность тока $j \cdot 10^{-2}$, $a/м^2$	Максимальная окружная скорость, $м/сек$	Удельное нажатие $p \cdot 10^{-2}$, $н/м^2$	Удельное электросопротивление $\rho \cdot 10^3$, $ом \cdot м$	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения на пару щеток при номинальном токе и $v = 15$ $м/сек$, $в$	Коэффициент трения при $v=15$ $м/сек$	Износ за 50 ч работы при $v=15$ $м/сек$, не более $мм$
Угольно-графитные	Т2, Т6	6	10	2—2,5	40—60	45—58	2±0,5	0,3	0,1
	УГ2	8	15	2—2,5	18—30	40—60	2±0,4	0,25	0,3
	УГ4	7	12	2—2,5	26—38	45—65	2,1±0,5	0,25	0,3
Графитные	Г1	7	12	2—2,5	30—46	35—50	2,2±0,5	0,3	0,2
	Г2	8	15	2—2,5	25—37	40—50	1,7±0,5	0,25	0,15
	Г3	10—11	25	2—2,5	10—20	30—40	1,9±0,4	0,25	0,2
	Г6	9	18	2—2,5	26—42	35—50	2,2±0,6	0,25	0,2
	Г8	11	25	2—3	10—20	20—40	1,9±0,4	0,25	0,15
	Г58	9	25	1,75—2	20—30	35—50	—	0,25	—
Электрографитированные	ЭГ2	10	25	2—2,5	20—30	46—60	2,75±0,6	0,2	0,1
	ЭГ4	12	40	1,5—2	10—16	20—30	2±0,4	0,2	0,25
	ЭГ6	9	—	2—2,5	30—46	47—63	2,5±0,6	0,25	0,15
	ЭГ8	10	40	2—4	40—50	42—55	2,4±0,5	0,25	0,15
	ЭГ10	9	—	2—2,5	40—56	50—70	2,4±0,6	0,25	0,15
	ЭГ14	10—11	40	2—4	26—38	40—60	2,5±0,5	0,25	0,15
	ЭГ83	9	45	1,75—2,2	35—65	15—32	—	0,25	—
Медно-графитные	М1	15	25	1,5—2	2—6	26—38	1,5±0,5	0,25	0,18
	М3	12	20	1,5—2	7—12	30—40	1,8±0,4	0,25	0,15
	М6	15	25	1,5—2	2—6	26—35	1,5±0,5	0,2	0,15
	М16	12—14	25	1,5—2	0,5—1,5	20—30	0,9±0,3	0,25	0,2
	М20	12	20	1,5—2	5—13	24—36	1,4±0,4	0,26	0,2
	М22	11—14	25	1,5—2	1—4	20—30	1,2±0,3	0,2	0,2
	М24	20	15	1,75—2	0,1—0,3	—	0,5±0,2	0,25	0,7
	МГ	20	20	1,8—2,3	0,05—0,15	—	0,2±0,1	0,2	0,8
	МГ2	20	20	2—2,5	0,15—0,35	22—32	0,5±0,2	0,2	0,4
	МГ4	15	20	2—2,5	0,3—1,3	18—30	1,1±0,5	0,2	0,3
	МГ6	18	20	2—2,5	0,3—1,3		1±0,4	0,2	0,5
Бронзо-графитные	БГ	20	20	1,7—2,2	0,5—0,9	—	0,3±0,1	0,25	0,25

Химическое состояние поверхности коллектора оказывает заметное влияние на величину переходного сопротивления. При длительной работе медь коллектора покрывается тонкой оксидной пленкой повышенной твердости и нагревостойкости по отношению к искрению щеток и иногда приобретает темно-коричневую окраску («политура коллектора»). В этом случае переходное сопротивление увеличивается, и коммутация приобретает более благоприятный характер. Если же коллектор сохраняет свой натуральный цвет и имеет матовую поверхность, то это показывает, что на коллекторе еще не достигнуто устойчивое состояние, обеспечивающее надежную коммутацию.

При увеличении удельного нажатия на щетку падение напряжения $\Delta U_{щ}$ уменьшается сначала быстро, а затем все медленнее (рис. 6-12).

Линейная скорость на окружности коллектора мало влияет на величину $\Delta U_{щ}$. Но если при повышенной скорости щетки начинают дрожать, то переходное сопротивление щеток может сильно возрасти, и это может неблагоприятно отразиться на процессе коммутации.

Приведенные выше значения $\Delta U_{щ}$ получены для контакта между щеткой и кольцом. Для коллектора значения $\Delta U_{щ}$ всегда несколько выше из-за большей неровности его поверхности по сравнению с поверхностью кольца.

При выборе марки щетки часто приходится руководствоваться взаимно противоречивыми соображениями. Так, например, с точки зрения улучшения коммутации выгодно брать более твердые щетки с большим переходным сопротивлением. Но так как эти щетки допускают меньшую плотность тока, то при этом увеличивается поверхность щеточного контакта, размеры коллектора и растут потери. С другой стороны, допустимая плотность тока под щеткой $j_{щ}$ возрастает с уменьшением контактной поверхности щетки; поэтому выгоднее иметь большее число щеток меньшего размера, но при этом осложняется конструкция машины и растет ее стоимость.

Обычно в машинах постоянного тока нормального исполнения применяются графитные щетки, в машинах с более тяжелыми условиями коммутации—угольно-графитные или электрографитированные, а в машинах пониженного напряжения (до 30 *в*) медно- или бронзо-графитные.

6-10. Природа щеточного контакта

По мере изучения свойств скользящего контакта взгляды на его природу изменялись. Одной из первых явилась положенная в основу классической теории коммутации гипотеза непрерывного контакта, т. е. такого, когда ток равномерно распределяется по всей поверхности контакта. Но эта гипотеза не могла объяснить характера зависимости переходного падения напряжения от плотности тока (см. рис. 6-11). Поэтому на смену ей была выдвинута гипотеза, согласно которой скользящий контакт рассматривается как совокупность точек перебегающего непосредственного контакта, действительная поверхность которых в десятки раз меньше всей по-

верхности щетки. С действительной поверхностью контакта граничит клиновидное пространство между поверхностями щетки и коллектора, причем на некотором участке этого пространства частицы угольной или металлической пыли, приставшие к коллектору, еще могут прикасаться к щетке. Эта часть клиновидного пространства называется пылевой зоной и проводит ток только при наличии достаточно большого напряжения между поверхностями щетки и коллектора. С пылевой зоной граничит зона пробоя, в которой ток проводится путем ионной и электронной эмиссии, но лишь при условии предварительного соприкосновения трущихся поверхностей. В дополнение к этой гипотезе была выдвинута третья гипотеза, согласно которой основным фактором, определяющим поведение скользящего контакта, является пленка окислов на поверхности коллектора или кольца. Пленка находится в динамическом равновесии, т. е. одновременно происходит процесс образования пленки и ее разрушения вследствие шлифующего действия щеток; при этом происходит пробой пленки и образуются проводящие мостики.

С точки зрения этой гипотезы можно объяснить форму кривых на рис. 6-11. Действительно, пленка окислов на медном кольце может выдержать только определенное напряжение; с увеличением плотности тока пленка начинает разрушаться, и число точек, проводящих ток, увеличивается, вследствие чего переходное сопротивление падает. Для неокисляющегося кольца, например графитного, кривые $\Delta U_{щ} = f(j_{щ})$ носят прямолинейный характер.

Явления в щеточном контакте были подробно исследованы многими авторами (И. Нейкирхен, Е. Хольм, М. Ф. Карасев и др.). Кроме того, было подробно проанализировано влияние на щеточный контакт факторов химического, термического и механического характера. Из этого анализа могут быть сделаны следующие основные выводы.

1. При нагрузках, превосходящих некоторый ограниченный предел, зависящий от марки щетки, природа щеточного контакта является ионной.

2. Ионные процессы, происходящие под анодно- или катодно-поляризованными щетками, носят разный характер (щетка называется анодно-поляризованной или анодной при направлении тока от щетки к коллектору и катодно-поляризованной или катодной при направлении тока от коллектора к щетке — см. рис. 5-21). При этом в контактном слое щеток обеих полярностей происходит процесс электролиза. Если щетка поляризована катодно, то при прохождении тока мельчайшие частицы угля переносятся на коллектор и, сгорая в атмосфере кислорода воздуха, образуют на поверхности коллектора тонкий слой более тугоплавкой окисленной пленки, предохраняющей коллектор от истирания и увеличивающей переходное сопротивление щеточного контакта. Если же щетка поляризована анодно, то образования защитной пленки не происходит. Толщина пленки и ее характер зависят от плотности тока, свойств контактных поверхностей и окружающей среды.

3. Так как бóльшая часть поверхности щетки непосредственно не соприкасается с поверхностью коллектора, то, говоря об износе этих

частей машины, различают: а) чисто механический износ частей, т. е. износ без участия тока; б) механический износ при протекании тока и в) электрический износ без содействия механического истирания.

Механический износ коллектора и щеток, как правило, невелик, хотя могут быть случаи ненормально высокого износа этих частей в зависимости главным образом от структуры щеток.

Механический износ коллектора и щеток при протекании тока вообще гораздо больше, чем износ без тока. Это объясняется тем, что ионные процессы, происходящие в контактном слое при протекании тока, разрушают гладкие поверхности коллектора и щеток. Особенно сильное разрушительное действие оказывает дуга (так называемая дуга подъема), образующаяся при расхождении контактных поверхностей коллектора и щетки, например, при тряске машины. Износ носит полярный характер. Например, анодно-поляризованный коллектор изнашивается по сравнению с катодно-поляризованным быстрее. При прочих равных условиях износ зависит от окружающей среды: влажности воздуха, присутствия химически действующих на коллектор и щетки газов и т. д., которые способствуют увеличению износа.

Чисто электрический износ коллектора происходит в том случае, когда имеются условия образования дуги, например когда щетка скользит по прокладкам, выступающим между пластинами коллектора, практически не касаясь его поверхности. При катодной поляризации коллектора катодное пятно дуги связано с коллектором, и медь в пятне испаряется; в результате происходит катодное распыление меди коллектора.

4. При увеличении температуры коллектора ионизация контакта наступает при меньших значениях нагрузочного тока (по данным М. Ф. Карасева). Что же касается влияния температуры на искрение, то, по мнению И. Нейкирхена, оно является сопровождающим, но не определяющим фактором.

Представления об ионной проводимости, предполагающие прерывно-точечный характер контакта скользящих поверхностей, позволяют физически полнее и ближе к действительности объяснить сложный комплекс явлений, определяющих процесс коммутации коллекторной машины, но нуждаются еще в дальнейшей разработке.

6-11. Экспериментальные методы анализа и настройки коммутации

А. Общие соображения. Произведенный в гл. 5 теоретический анализ коммутации машин постоянного тока на основе классической теории коммутации базируется, как мы знаем, на ряде допущений, облегчающих анализ, но не имеющих полной достоверности. Вследствие этого получаемые на основании классической теории выводы хотя и представляют собой правильные тенденции качественного порядка, но не дают возможности производить точные количественные расчеты.

В результате не удается определить точное число витков добавочного полюса, установить точную величину зазора под добавочным по-

люсом и форму полюсного наконечника и т. д. Все эти вопросы приходится окончательно решать уже при экспериментальной наладке коммутации, внося необходимые коррективы в первоначальные данные расчета. Именно поэтому установить окончательные электрические данные машины, как правило, можно только в результате комбинации расчета и эксперимента.

Наиболее распространенными и ценными методами экспериментального анализа коммутации является снятие потенциальных кривых под щетками и кривых подпитки добавочных полюсов.

Б. Потенциальные щеточные кривые. Метод позволяет судить по форме снятой потенциальной щеточной кривой о характере коммутации, т. е. о том, является ли она прямолинейной, замедленной или ускоренной.

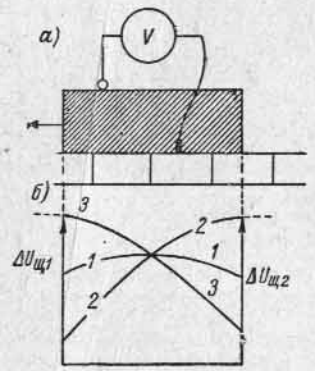


Рис. 6-13. Схема для снятия потенциальных кривых щетки и потенциальные кривые

Потенциальные кривые щетки снимаются по схеме на рис. 6-13, *а*. Вольтметр должен быть выбран так, чтобы можно было измерить напряжения до 1,5 — 3 *в*. Один зажим вольтметра присоединяется непосредственно к щетке, а другой — к тонкому металлическому или угольному контакту, перемещаемому по окружности коллектора вдоль щеточной обоймы.

Если коммутация прямолинейная, то плотность тока под щеткой всюду одинакова (см. рис. 5-6); следовательно, переходное падение напряжения $\Delta U_{щ}$ имеет одно и то же значение вдоль всей щетки, и потенциальная кривая щетки представляет собой почти прямую, параллельную оси абсцисс (кривая *1* на рис. 6-13, *б*).

При замедленной коммутации плотность тока и соответственно переходное напряжение больше на сбегающем крае щетки, чем на набегающем, т. е. $\Delta U_{щ2} > \Delta U_{щ1}$. В этом случае получается кривая *2* на рис. 6-13, *б*. При ускоренной коммутации получается кривая *3*.

Изложенный метод позволяет судить с известным приближением о величине коммутирующего поля, так как кривая *2* на рис. 6-13, *б* говорит о слабом коммутирующем поле, а кривая *3* — о слишком сильном поле.

Основные недостатки этого метода состоят в том, что а) трудно выполнить щеткодержатель, который бы обеспечил вполне равномерное давление по всей поверхности щетки, тогда как напряжение $\Delta U_{щ}$ зависит от силы, с которой щетка прижата к коллектору в данной точке; б) напряжение $\Delta U_{щ}$ пропорционально плотности тока только при малых плотностях, а затем растет значительно медленнее. Поэтому метод потенциальной щеточной кривой позволяет производить только качественную оценку коммутационного процесса.

В. Метод безыскровой зоны. Предложенный Треттином [18] и разработанный далее В. Т. Касьяновым [84] и М. П. Костенко [87] метод безыскровой зоны оказался чрезвычайно эффективным при экспериментальном налаживании коммутации. Сущность метода состоит в том, что обмотку добавочных полюсов подпитывают от особого источника постоянного тока и снимают подпиточные кривые, которые позволяют выявить зону безыскровой работы и с необходимой точностью определить наивыгоднейшее число витков добавочного полюса и величину зазора $\delta_д$.

Для снятия кривых подпитки может служить схема на рис. 6-14. Здесь *Я* — якорь испытуемой машины, *ДП* — обмотка добавочных полюсов, *Г* — генератор постоянного тока независимого возбуждения, служащий для подпитки добавочных полюсов, *П* — переключатель для изменения направления тока в цепи возбуждения и, следовательно, полярности генератора *Г*. При испытании машина может работать как в нагрузочном режиме, так и в режиме короткого замыкания, так как при одинаковой величине тока I_a в цепи якоря машины условия коммутации практически одинаковы в обоих случаях.

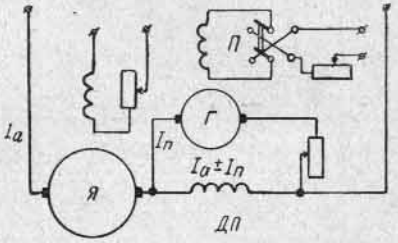


Рис. 6-14. Схема для снятия кривых подпитки

Снятие кривых подпитки начинают с холостого хода ($I_a = 0$). В этом случае реактивная э. д. с. $e_r = 0$. Подпитывая добавочные полюсы сначала в одном направлении, а затем в другом, мы можем установить величину того тока $\Delta I_п = \pm \frac{I_п}{I_н} \cdot 100\%$, при котором начинается первое заметное на глаз искрение. Причиной искрения является нескомпенсированная (избыточная) э. д. с. $\Delta e = \pm e_k$, создаваемая в коммутируемой секции полем добавочных полюсов. Если пренебречь явлением гистерезиса, то подпиточные токи разных знаков, вызывающие первое искрение под щетками, должны быть при холостом ходе равны (отрезки $OA = OB$ на рис. 6-15). Опыт показывает, что машина начинает искрить при $\Delta e \approx 1 \div 1{,}5$ *в* в зависимости главным образом от марки щетки и силы нажатия на нее, причем в машинах малой мощности $I\Delta_п = 10 \div 25\%$, а в машинах средней и большой мощности $6 \div 10\%$.

Если бы машина постоянного тока имела коммутирующее поле, подобранное так, чтобы при всех нагрузках оно полностью компенсировало реактивное поле коммутации, т. е. имело ту же величину и ту же форму, что и последнее, то реактивная и коммутирующая э. д. с. e_r и e_k находились бы всегда во взаимном равновесии. В этом случае кривые подпитки имели бы вид двух прямых, параллельных оси абсцисс и находящихся от нее на одинаковом расстоянии как в своей положительной, так и отрицательной ветви (штриховые линии на рис. 6-15, *а*).

Но так как в реальных машинах нельзя добиться полной компенсации э. д. с. e_r, то остаточная э. д. с. e_0 (заштрихованные площадки

на рис. 6-3) растет с увеличением нагрузочного тока I_a, и при некотором значении последнего машина начинает искрить даже при вполне правильно подобранном числе витков добавочных полюсов. В этом случае дополнительная подпитка этих полюсов может только увеличить расхождение между э. д. с. e_r и e_k и, следовательно, ухудшить коммутацию. Таким образом, реальную машину можно нагрузить лишь до такого предельного *тока ,при котором уже никакой регулировкой добавочных полюсов невозможно получить удовлетворительную коммутацию.*

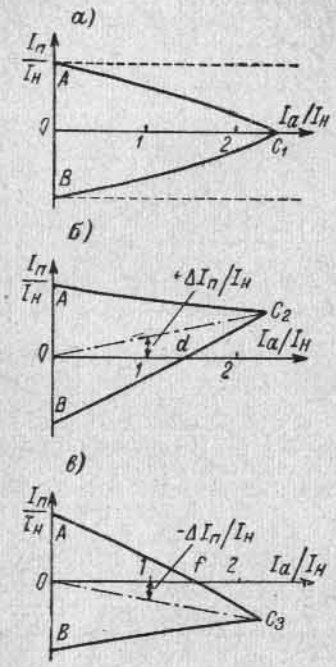


Рис. 6-15. Кривые подпитки

Таким образом, в реальных машинах кривые подпитки идут не параллельно оси абсцисс, а пересекаются в точках C_1, C_2 или C_3 в зависимости от того, в каком соотношении находятся между собой э. д. с. e_r и e_k. Если, например, э. д. с. e_r и e_k скомпенсированы более или менее точно, т. е. число витков добавочных полюсов подобрано наилучшим образом, то кривые подпитки пересекутся в точке C_1 на оси абсцисс и средняя линия этих кривых совпадает с осью абсцисс (рис. 6-15, *а*).

Если при работе машины без подпитки преобладает реактивная э. д. с. e_r и, следовательно, коммутация носит замедленный характер, то нужно подпитывать добавочные полюсы в положительном направлении, усиливая создаваемое ими поле в зоне коммутации. В этом случае средняя линия кривой пойдет выше оси абсцисс в точку пересечения кривых C_2 (рис. 6-15, *б*).

Наоборот, если преобладает э. д. с. e_k, то нужно подпитывать добавочные полюсы в отрицательном направлении, ослабляя создаваемое ими поле. В этом случае средняя линия кривой подпитки пойдет ниже оси абсцисс к точке пересечения кривых C_3 (рис. 6-15, *в*).

Сопоставляя между собой кривые на рис. 6-15, *а*, *б* и *в*, видим, что в первом случае машина может работать без искрения при бо́льших перегрузках (отрезок OC_1 на рис. 6-15, *а*), чем во втором и третьем случаях (отрезки *Od* и *Of* на рис. 6-15, *б* и *в*), т. е. кривая на рис. 6-15,*а* является наиболее благоприятной.

Кривые подпитки позволяют определить наивыгоднейшее число витков добавочного полюса $w_д$ при заданной величине зазора под добавочным полюсом или наивыгоднейший размер этого зазора при заданном числе витков $w_д$. Первый способ обычно применяется в машинах малой и средней мощности, второй — в машинах большой мощности с малым числом витков добавочного полюса.

Кроме того, кривые подпитки дают возможность предопределять

в известных пределах условия коммутации при изменении режима работы машины.

Предположим, что при заданном токе нагрузки I_a скорость вращения машины n увеличилась. В этом случае э. д. с. e_r и e_k увеличиваются

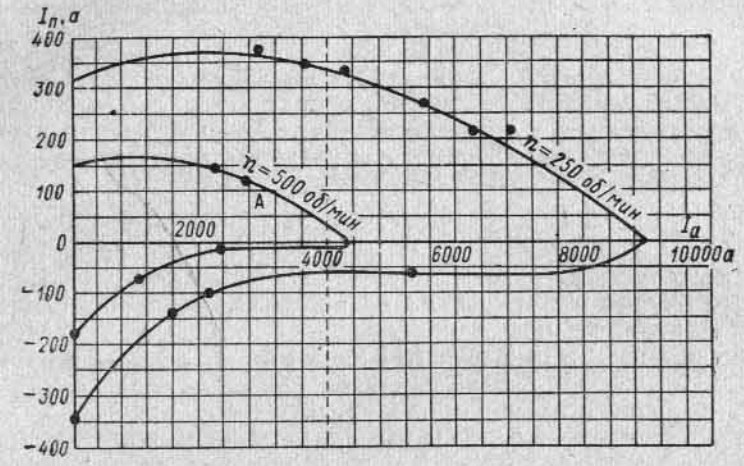


Рис. 6-16. Кривые подпитки для генератора постоянного тока ХЭМЗ на 2000 *квт*, 500 *в*, 4000 *а*, снятые для различных скоростей вращения машины

пропорционально скорости вращения и соответственно этому увеличиваются остаточная э. д. с. $e_r + e_k$ (см. рис. 6-3), и добавочный ток коммутации i_k; в результате зона безыскровой работы суживается.

На рис. 6-16 представлены кривые подпитки, полученные М. П. Костенко для генератора постоянного тока завода ХЭМЗ на 2000 *квт*, 500 *в*, 4000 *а*; кривые сняты для номинальной скорости вращения $n = 500$ *об/мин* и для скорости, пониженной вдвое, т. е. для $n = 250$ *об/мин*. Из сопоставления кривых видно, что в последнем случае зона безыскровой работы расширилась примерно вдвое по направлению обеих осей.

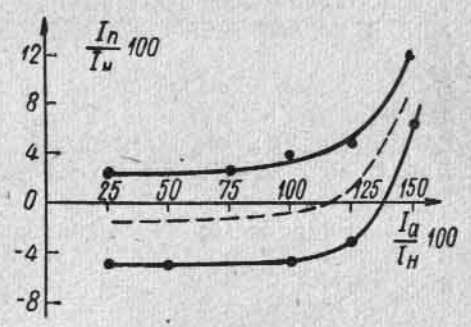


Рис. 6-17. Кривые подпитки машины постоянного тока 4,4 *квт*, 1430 *об/мин*, 220 *в*, 24 *а*

Вторым существенным фактором, влияющим на коммутацию, является насыщение добавочных полюсов. В этом случае коммутирующая э. д. с. e_k перестает расти пропорционально току I_a, и машина переходит в зону замедленной коммутации. Следовательно, для компенсации реактивной э. д. с. e_r и получения безыскровой коммутации

требуется больший ток подпитки, чем при малых нагрузках. Соответствующие кривые подпитки машины постоянного тока 4,4 *квт*, 1430 *об/мин*, 220 *в*, 24 *а* показаны на рис. 6-17.

6-12. Осциллографирование процессов коммутации

Весьма большой интерес представляют экспериментальные исследования тока в короткозамкнутых секциях в процессе коммутации, которые выполнялись рядом авторов различными методами. Е. Арнольд [30] производил осциллографические исследования тока в короткозамкнутой секции, которая разрезалась пополам в лобовой части и концы ее присоединялись к небольшому омическому сопротивлению; падение напряжения на этом сопротивлении подводилось с помощью двух контактных колец с наложенными на них щетками к магнитоэлектрическому осциллографу. К. И. Шенфер [31] разрезал обмотку якоря в одном месте и соединял концы ее с контактными кольцами, к щеткам которых присоединялась неподвижная секция, заложенная в пазы необмотанного якоря. Рядом с секцией в те же пазы закладывался дополнительный тонкий провод для измерения э. д. с., индуктированной в секции, а шунт в цепи секции давал возможность осциллографировать изменения тока в ней в процессе коммутации.

Недостатками указанных опытов являлось наличие значительного дополнительного контактного сопротивления между щетками и кольцами, а также погрешности записи магнитоэлектрическим осциллографом колебаний высокой частоты.

Значительно более точные и надежные результаты получились в исследованиях М. Болдвина [101] и О. Г. Вегнера [93] при осциллографировании токов коммутации с помощью безынерционного электронного осциллографа. При этом Болдвин использовал бифилярный контур по отношению к короткозамкнутой секции, концы которого присоединялись через контактные кольца к осциллографу. Болдвин этим методом произвел тщательные осциллографические исследования процесса коммутации на мощном тяговом двигателе типа GE-752, применяемом в массовом масштабе на тепловозах и электровозах США. Двигатель имел ступенчатую обмотку с $u = 3$ и $\varepsilon = 2{,}5$. Между двумя половинами каждого проводника были уложены бифилярные измерительные провода, присоединявшиеся через контактные кольца к электронному осциллографу, как это показано на схемах рис. 6-18, *а* и *б*.

Осциллографирование тока и напряжения производилось на всех трех секциях обмотки *A*, *B*, *C* в условиях замедленной, нормальной и ускоренной коммутации при скоростях вращения, отличавшихся более чем в три раза (600 и 1950 *об/мин*).

Сравнение теоретически возможных форм изменения тока по рис. 5-8, *а* при весьма ускоренной коммутации (кривая *6*), нормально ускоренной коммутации (кривая *5*) и заметно замедленной коммутации (кривая *3*) с экспериментальными кривыми на рис. 6-19, *а*, *б* и *в* показывает, что экспериментальные кривые достаточно хорошо

иллюстрируют изменения тока в секциях в условиях нормально ускоренной, замедленной и сильно ускоренной коммутации.

Условность исходных положений классической теории вызвала ряд попыток приблизить теоретические предположения к результатам экспериментальных исследований. Поскольку одно из основных

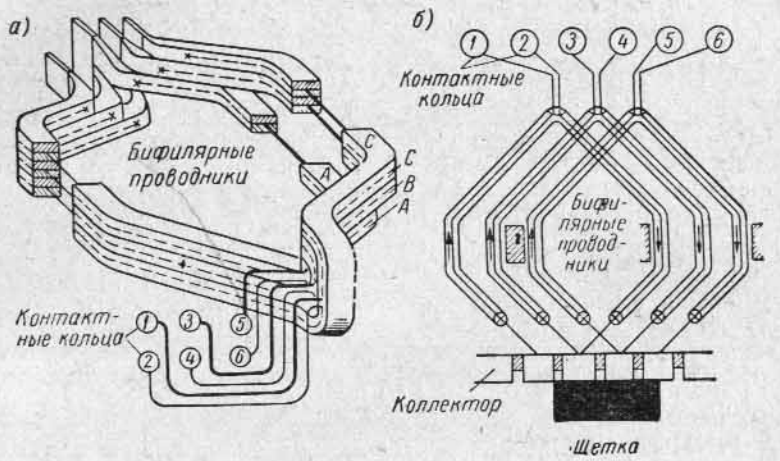


Рис. 6-18. Схема включения бифилярных проводников для осциллографирования токов в коммутируемых секциях в опытах Болдвина

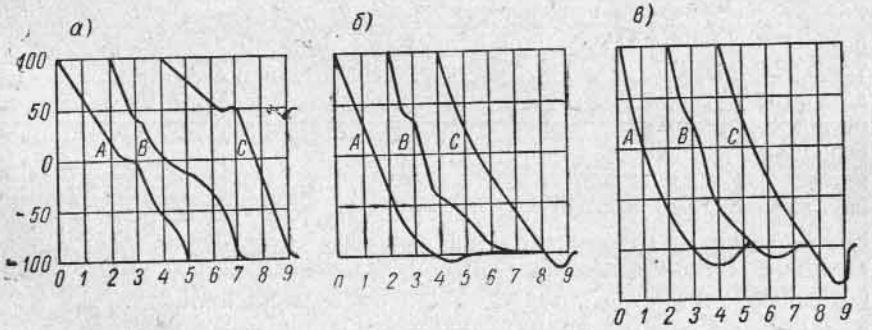


Рис. 6-19. Осциллограммы токов в коммутируемых секциях, полученные Болдвином: *а* — замедленная коммутация; *б* — нормально ускоренная и *в* — сильно ускоренная коммутация

положений классической теории — постоянство удельного сопротивления между щеткой и коллектором — определенным образом расходится с действительностью не только для статических, но и для динамических зависимостей переходного падения напряжения от плотности тока в контакте, О. Г. Вегнер предложил исходить из другого достаточно крайнего предположения. В основном уравнении коммута-

ции с учетом сопротивлений короткозамкнутого контура и соединительных петушков

$$\sum e = e_k - L_c \frac{di}{dt} = i_2 r_2 - i_1 r_1 + i_2 \rho - i_1 \rho + i R_c =$$

$$= \Delta U_2 - \Delta U_1 + i_2 \rho - i_1 \rho + i R_c, \qquad (6\text{-}11)$$

где $i_2 r_2 = \Delta U_2$ и $i_1 r_1 = \Delta U_1$ представляют собой переходные падения напряжения под сбегающим и набегающим краями щетки, О. Г. Вегнер предлагает принимать ΔU_2 и ΔU_1 постоянными, не зависящими от плотностей тока в контактах и от относительного перекрытия щетками коллекторных пластин. Тогда ΔU_1 и ΔU_2 оказываются противоположными по знаку до момента достижения током короткозамкнутой секции i величины тока $\pm i_a$ в обмотке вне этой секции. В дальнейшем процессе коммутации, если направление тока i_2 в петушке изменяется на обратное, то одновременно изменяется и направление переходного падения напряжения ΔU_2, и тогда в уравнении (6-11) получается не вычитание, а сложение падений напряжения $\Delta U_1 + \Delta U_2$. В этом случае ток i должен изменяться со значительно замедленной скоростью по сравнению с предшествующим промежутком времени, когда $\Delta U_1 - \Delta U_2 \approx 0$, т. е. в кривой $i = f(t)$ образуется характерная «ступень малого тока».

О. Г. Вегнером было проведено весьма значительное количество экспериментальных исследований как на специально подготовленной для эксперимента машине постоянного тока в 130 *квт* с волновой ступенчатой обмоткой, так и на ряде машин нормального исполнения. Изменения тока в исследованиях О. Г. Вегнера в основном носили характер нормально ускоренной коммутации. Подобный же характер изменения тока получался и в исследованиях Болдвина, но кривые тока сильно ускоренной и заметно замедленной коммутации в исследованиях Вегнера отсутствуют, поскольку, очевидно, этими режимами он в достаточной степени не интересовался. Нужно отметить, что представления Вегнера для больших переходных плотностей тока и соответствующих им падений напряжения ΔU_1 и ΔU_2 могут иметь известные основания. Но при малых переходных плотностях тока положения классической теории при ускоренной и замедленной коммутации, по-видимому, оказываются ближе к действительности, а они имеют по существу решающее значение для объяснения процесса безыскрового разрыва короткозамкнутого контура в процессе коммутации тока.

6-13. Практические выводы по теоретическим и экспериментальным исследованиям коммутации

На основании имеющихся в настоящее время наиболее достоверных теоретических положений и значительного количества подробных экспериментальных исследований можно составить ряд общих выводов в отношении процесса коммутации при ширине щетки, превышающей ширину коллекторной пластины.

Классическая теория коммутации, исходящая из постоянства удельного сопротивления под щеткой во всем периоде коммутации

$\rho_щ$ в определенной степени расходится с действительностью не только в отношении статической, но и динамической зависимости переходного падения напряжения между щеткой и коллектором от плотности тока в контакте. Однако разделение токов коммутации на две составляющие — прямолинейную $i_л$ и добавочную i_k — весьма полезно, поскольку этот метод дает возможность определять:

1) форму коммутирующего поля для получения наиболее благоприятной коммутации с учетом как самоиндукции самой секции, так и взаимоиндукции соседних секций;

2) коммутационную реакцию поля в зоне коммутации и его размагничивающее и намагничивающее действие на основное поле.

Это является весьма важным, так как характеризует поведение машины постоянного тока в процессе коммутации.

Крайние предположения Вегнера, исходящего из постоянства переходного напряжения $\Delta U_щ = \text{const}$, при котором разность переходных падений напряжения под сбегающим и набегающим краями щетки $\Delta U_1 - \Delta U_2 \approx 0$ при $i \leqslant i_a$, и внезапного изменения этой разности на их сумму $\Delta U_1 + \Delta U_2 \approx 2\Delta U_1$ при $i > i_a$, не могут считаться доказанными и оправданными с теоретической точки зрения. Однако многочисленные экспериментальные исследования Вегнера наряду с другими экспериментальными исследованиями являются полезными, хотя их трактовка в большинстве случаев может быть и иная по сравнению с той, которую дает сам Вегнер.

В особенности нужно отметить, что при малых плотностях тока, а также при снятии динамических характеристик падения напряжения положения классической теории являются достаточно оправданными, что имеет решающее значение для получения умеренно ускоренной коммутации, которая признается в настоящее время наиболее благоприятной для достижения безыскровой коммутации (см. стр. 173).

Большое значение имеет снятие кривых подпитки, которые позволяют оценивать качество коммутации и дают необходимые данные для более тщательного подбора числа витков добавочного полюса (машины малой мощности) и величины зазора под добавочным полюсом (машины средней и большой мощности).

При анализе условий коммутации необходимо различать два класса машин постоянного тока: машины малой мощности (меньше 100 *квт*) и машины средней мощности (больше 100 *квт*).

Первые отличаются малыми не регулируемыми по величине воздушными зазорами под добавочными полюсами и имеют значительно меньшую точность выполнения по геометрическим размерам машин, установке щеток в щеточных обоймах, величинам воздушных зазоров и т. д. Поэтому машины одного и того же типа, мощности, скорости вращения и ее регулирования, выполненные по одним и тем же электрическим данным и конструктивным чертежам, могут давать заметные отклонения — разброс — по своим коммутационным качествам.

Поскольку эти машины изготовляются по методу массово-поточного или серийного производства, они должны иметь бо́льшие технологические допуски и поэтому в них должны быть допущены меньшие реактивные э. д. с. Хотя экспериментальным путем и можно в извест-

ной степени повысить коммутационные качества каждой из таких машин, такая наладка не удовлетворяет требованиям массового производства.

Если взять машины одного и того же габарита, одной и той же номинальной скорости вращения, но различного напряжения, например 110, 220 и 440 *в*, то наиболее легкими по коммутации будут нерегулируемые машины наименьшего напряжения 110 *в*, а наиболее трудными — регулируемые машины на 440 *в*, поскольку при тех же основных данных v_a, l_1, A и ζ последние будут иметь числа витков короткозамкнутых секций w_c, в 4 раза бо́льшие.

Однако если взять машину постоянного тока с регулированием скорости вращения в отношении 1 : 2 на 220 *в* и нерегулируемую машину 440 *в*, то несмотря на пониженную в 2 раза мощность при верхней скорости, условия коммутации первой из них будут приблизительно в 2 раза тяжелее. Наиболее трудными по коммутации являются машины постоянного тока, регулируемые в отношении 1 : 3 — 1 : 4 на 440 *в*, поскольку они имеют наибольшее число витков в короткозамкнутых секциях w_c и соответственно наибольшую реактивную э. д. с. e_r.

В машинах постоянного тока массового производства с малыми величинами воздушных зазоров под добавочными полюсами наблюдается относительно большое влияние насыщения добавочных полюсов, поэтому они более чувствительны к перегрузкам имея кривые подпитки типа показанных на рис. 6-17.

Машины постоянного тока большой мощности имеют относительно большой воздушный зазор под добавочными полюсами, поэтому насыщение добавочных полюсов в них проявляется в значительно меньшей степени, особенно при наличии второго воздушного зазора у основания добавочного полюса и компенсационной обмотки.

С другой стороны, нужно учесть, что в крупных машинах с большим числом щеток на палец для каждого момента времени получается значительное число точек непосредственного контакта. Лучшее приближение к предположениям классической теории имеют машины с двумя щетками в каждом щеткодержателе и раздвижкой щеток в шахматном порядке, так как это еще более увеличивает число точек непосредственного контакта между щетками и коллектором.

В последнее время начали находить применение в ответственных тяговых двигателях электровозов также разрезанные на две части щетки, имеющие повышенные сопротивления в поперечном направлении. Такие машины обладают устойчивой коммутацией не только в условиях нормальной нагрузки, но также при значительных перегрузках, как длительных, так и толчкообразных.

Поскольку в машинах постоянного тока с большими воздушными зазорами и ступенчатыми обмотками гораздо легче подобрать коммутирующее поле добавочных полюсов, более полно и точно компенсирующее реактивное поле коммутации, то в этом случае можно увеличить значение реактивной э. д. с. коммутации и таким образом повысить использование машин постоянного тока для ответственных режимов их работы.

Глава седьмая

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ (К. П. Д) ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

7-1. Предварительные замечания

Электрические машины предназначены для преобразования механической энергии в электрическую (генераторы) или электрической энергии в механическую (двигатели).

При этом часть подведенной энергии не может быть полезно преобразована в машине и рассеивается практически в форме тепла в окружающее пространство. Эту часть энергии называют потерянной или просто потерями.

Потери в электрических машинах относительно невелики. Если, например, иметь в виду машины постоянного тока средней и большой мощности, то потери составляют всего 10—4% от подведенной мощности, а в синхронных машинах предельной мощности с водородным охлаждением — всего 1—2%. Тем не менее, если учесть огромное количество преобразуемой в настоящее время электроэнергии, вопрос о потерях имеет чрезвычайно важное значение, так как каждый лишний процент потерь соответствует в абсолютном выражении весьма значительным количествам неиспользованной энергии.

С другой стороны, поскольку потери преобразовываются в тепло, они вызывают нагревание машины. Опыт показывает, что если мы хотим обеспечить надежную работу машины в течение нормального эксплуатационного срока службы (16—20 лет), то температура различных частей машины не должна выходить за определенные пределы. Но температура данной части зависит не только от потерь в ней, но и от условий ее охлаждения. Применяя ту или иную систему вентиляции, мы можем значительно увеличить использование активных материалов машины (медь, сталь) и, следовательно, сделать машину легче и дешевле.

Таким образом, вопрос о потерях в машине тесно связан с вопросом об ее эксплуатационных и экономических характеристиках.

Следует особо отметить, что содержание данной главы относится в своей основной части ко всем типам электрических машин.

7-2. Классификация потерь

Все потери, возникающие в машине, могут быть разделены на две группы: основные и добавочные.

К основным относятся потери, возникающие в результате происходящих в машине основных электромагнитных и механических процессов. К числу таких потерь относятся:

Механические потери, а именно: а) потери в подшипниках; б) потери на трение щеток о коллектор или кольца; в) потери на трение о воздух, включая сюда и вентиляционные потери.

Потери в стали: а) потери на гистерезис в сердечнике якоря и зубцах; б) потери на вихревые токи в тех же частях.

Потери в меди: а) потери в меди обмотки якоря; обмоток, соединенных последовательно с обмоткой якоря — добавочных полюсов, компенсационной обмотки и т. д.; б) потери в цепи возбуждения.

Потери в контактном слое щеток или колец.

К добавочным потерям относятся потери в стали и в меди, возникающие в машине в результате происходящих в ней вторичных процессов электромагнитного характера. К числу добавочных потерь относятся: потери на вихревые токи от полей рассеяния в обмотках и массивных металлических частях машины, поверхностные потери в стали и пульсационные потери в зубцах, потери в уравнительных соединениях и т. д.

7-3. Механические потери

А. Потери в подшипниках скольжения. По общему закону трения эти потери выражаются следующим образом:

$$p_{пш} = k_{тр} F_ц v_ц = k_{тр} f_ц d_ц l_ц v_ц. \qquad (7\text{-}1)$$

Здесь $k_{тр}$ — коэффициент трения; $F_ц$ — полное давление на цапфу; $f_ц$ — удельное давление на цапфу, т. е. давление, отнесенное к единице проекции поверхности цапфы на плоскость, параллельную оси вала; $d_ц$ и $l_ц$ — диаметр и длина цапфы; $v_ц$ — скорость на окружности цапфы.

В единицах СИ давление $F_ц$ выражают в ньютонах и скорость $v_ц$ — в метрах в секунду. Если же мы будем выражать давление $F_ц$ в килограммах, то в правую часть формулы (7-1) нужно ввести переводной коэффициент 9,81.

Для смазки подшипника применяется масло. В состоянии покоя масло между трущимися частями выдавливается, и металл цапфы вступает в непосредственное соприкосновение с металлом вкладыша.

При вращении вала масло увлекается цапфой и создает в клиновидном пространстве между поверхностями вала и вкладыша повышенное давление, которое и поддерживает вал во взвешенном состоянии, так что между трущимися поверхностями появляется тонкая пленка масла. Чтобы трение имело чисто жидкостный характер, очень важно создать пленку, толщина которой была бы больше неровностей на поверхности трущихся частей.

Ряд исследований (Тоуера, Деттмара и др.) показал, что для скоростей $v_ц = 0{,}5 \div 4$ *м/сек* коэффициент жидкостного трения может быть выражен в виде:

$$k_{тр} = \frac{C v_ц^{0,5}}{f_ц \vartheta_ц}. \qquad (7\text{-}2)$$

Здесь C — постоянная, зависящая от сорта масла и величины зазора в подшипнике; $\vartheta_ц$ — температура подшипника, °С.

Если скорость $\vartheta_ц > 4$ *м/сек*, то коэффициент трения растет в зависимости от нее все медленнее и при $v_ц \geqslant 10$ *м/сек* перестает зависеть от скорости. В этом случае

$$k_{тр} = \frac{C'}{f_ц \vartheta_ц}, \qquad (7\text{-}3)$$

где C' — постоянная.

Исходя из формул (7-2) и (7-3), можно установить три следующих закона трения:

1) коэффициент трения $k_{тр}$ обратно пропорционален удельному давлению $f_ц$ при $\vartheta_ц = \text{const}$ и $v_ц = \text{const}$;

2) коэффициент трения обратно пропорционален температуре $\vartheta_ц$ при $f_ц = \text{const}$ и $v_ц = \text{const}$;

3) при $f_ц = \text{const}$ и $\vartheta_ц = \text{const}$ коэффициент трения переменным образом зависит от скорости $v_ц$; при скоростях до 4 *м/сек* $k_{тр} \sim v_ц^{0,5}$, при $v_ц \geqslant 10$ *м/сек* $k_{тр} = \text{const}$.

Подставляя значения $k_{тр}$ в равенство (7-1), получаем для потерь на трение в подшипниках следующие выражения:

$$p_{пш\ (v_ц < 4)} = \frac{C}{\vartheta_ц} d_ц l_ц v_ц^{1,5} \qquad (7\text{-}4а)$$

и

$$p_{пш\ (v_ц \geqslant 10)} = \frac{C'}{\vartheta_ц} d_ц l_ц v_ц. \qquad (7\text{-}4б)$$

Если потери $p_{пш}$ выражаются в ваттах, диаметр и длина цапфы — в сантиметрах и скорость — в *м/сек*, то в среднем $C = 26$ и $C' = 19{,}6$.

Из выражений для потерь в подшипниках (7-4а) и (7-4б) можно сделать существенно важный вывод, что потери $p_{пш}$ не зависят от удельного давления, и стало быть, от нагрузки машины, так как, согласно первому закону трения, $k_{тр} f_ц = \text{const}$. Это дает возможность определить потери при холостом ходе машины и затем считать, что при заданной скорости вращения они имеют то же значение при любой нагрузке ее до тех пор, пока сохраняется жидкостное трение в подшипнике.

Б. Потери в подшипниках качения. К этой группе подшипников относятся шариковые подшипники, применяемые в мелких машинах, и роликовые подшипники, применяемые в машинах средней мощности. В машинах промежуточной мощности нередко применяется роликовый подшипник со стороны привода.

По сравнению с подшипниками скольжения подшипники качения имеют ряд ценных преимуществ: значительно меньший (примерно в 10—15 раз) коэффициент трения, меньшие размеры, что позволяет уменьшить осевую длину машины; меньший уход за ними и т. д.

Потери в подшипниках качения рассчитываются по формуле

$$p_{пш} = k_{тр} \frac{F}{D_ш} v_ц. \qquad (7\text{-}5)$$

Здесь F — нагрузка на кольцо подшипника; $D_ш$ — диаметр окружности, проведенной через центры шариков или оси роликов; $v_ц$ — скорость на окружности цапфы.

Если F выражено в ньютонах, $D_ш$ — в *см* и $v_ц$ — в *м/сек*, то для шариковых подшипников $k_{тр} = 0{,}01 \div 0{,}02$, а для роликовых $k_{тр} = 0{,}02 \div 0{,}03$.

В. Потери на трение щеток ($p_{тр.щ}$). Пусть $k_{тр}$ — коэффициент трения щеток о коллектор или кольцо; $f_щ$ — удельное давление на щетку; $S_щ$ — поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором или кольцом; $v_к$ — скорость на окружности коллектора или кольца. Тогда

$$p_{тр.щ} = k_{тр} f_щ S_щ v_к. \qquad (7\text{-}6)$$

Если $f_щ$ выражают в *н/см²*, $S_щ$ — в *см²* и $v_к$ — в *м/сек*, то $p_{тр.щ}$ получают в ваттах.

Согласно опытным данным, для угольных щеток имеем: $k_{тр} = 0{,}2 \div 0{,}3$ для коллектора и $0{,}15 \div 0{,}20$ для контактных колец; $f_щ = 1{,}5 \div 2{,}5$ *н/см²*, но в специальных конструкциях, например в тяговых двигателях, оно может быть значительно больше — до 5 *н/см²*.

Г. Потери на вентиляцию ($p_{вн}$). Высокоиспользованные электрические машины выделяют в малых объемах активных материалов с относительно небольшими внешними охлаждающими поверхностями значительное количество энергии в виде тепла. В этом случае требуется применение форсированной вентиляции для повышения коэффициента теплорассеяния машины.

В машинах со встроенным вентилятором имеем:

$$p_{вн} = k_{вн} V v^2. \qquad (7\text{-}7)$$

Здесь V — количество вентилирующего воздуха; v — скорость на внешней окружности вентилятора.

Если V выражается в *м³/сек* и v — в *м/сек*, то $k_{вн} = 1{,}1$ Так как количество воздуха V пропорционально скорости v, то вентиляционные потери пропорциональны кубу скорости v и, следовательно, кубу скорости вращения машины n.

В машинах с внешним вентилятором

$$p_{вн} = k'_{вн} \frac{H}{\eta_{вн}} V. \qquad (7\text{-}8)$$

Здесь H — давление; в тихоходных машинах ($v = 15$ *м/сек*) $H = 30 \div 50$ *мм вод. ст.*; в быстроходных машинах $H = 50 \div 100$ *мм вод. ст.*; $\eta_{вн}$ — к. п. д. вентилятора, равный около 0,5 для тихоходных машин и 0,25 — 0,30 для быстроходных машин (типа турбогенераторов). Если V выражается в *м³/сек*, то $k'_{вн} = 9{,}81$.

Д. Суммарные механические потери ($p_{мх}$). Складывая все виды потерь на трение и потери на вентиляцию, получаем:

$$p_{мх} = p_{пш} + p_{тр.щ} + p_{вн}. \qquad (7\text{-}9)$$

7-4. Основные потери в стали

А. Виды основных потерь в стали. В процессе работы активная сталь электромашин подвергается периодическому перемагничиванию. Оно может происходить двумя способами. Первый способ перемагничивания, называемый переменным, типичен для трансформаторов, в которых индукция распределяется практически равномерно по активному сечению сердечника и изменяется во времени синусоидально. Почти такие же условия имеют место в зубцах якорей машин постоянного и переменного тока. Перемагничивание по второму способу, называемому вращательным, происходит в сердечнике машины постоянного тока, вращающейся в постоянном во времени поле главных полюсов.

В обоих случаях потери в стали состоят из потерь на гистерезис и на вихревые токи. Здесь будут сообщены только краткие сведения об этих видах потерь, поскольку их физическая природа освещается в курсе «Теоретические основы электротехники» [9, 10].

О данных, касающихся электротехнической стали,— см. введение.

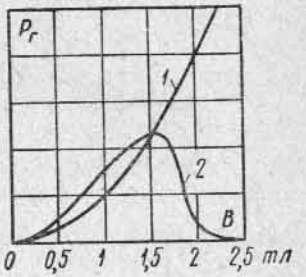


Рис. 7-1. Потери на гистерезис при переменном (*1*) и вращательном (*2*) перемагничивании стали

Б. Потери на гистерезис ($p_г$). Потери на гистерезис в единице массы при переменном перемагничивании выражаются эмпирической формулой, предложенной Штейнметцом в виде:

$$p_г = C_г f B^{\alpha}. \qquad (7\text{-}10)$$

Здесь $C_г$ — постоянная, зависящая от марки стали; f — частота перемагничивания; B — наибольшее значение магнитной индукции и α — экспериментально определенный показатель степени при индукции B. Для легированных сталей при индукциях в пределах от 0,8 до 1,6 *тл* в среднем берут $\alpha = 2$.

При вращательном перемагничивании в стали также имеют место потери на гистерезис. Природа вращательного перемагничивания, по-видимому, сложнее, чем переменного. Можно считать, что при вращательном перемагничивании потери $p_г$ сначала растут при увеличении индукции примерно до значения $B \approx 1{,}6$ *тл*, а затем, при дальнейшем увеличении индукции, начинают резко падать. На рис. 7-1 кривая *1* дает зависимость $p_г = f(B)$ для переменного перемагничивания, а кривая *2* — для вращательного.

Так как индукция в сердечнике якоря обычно меньше 1,6 *тл*, то потери на гистерезис, возникающие в электрических машинах при вращательном перемагничивании, рассчитывают по формуле (7-10), но в нее вводят поправочный коэффициент, установленный опытным путем и равный в среднем 1,8.

В. Потери на вихревые токи. При перемагничивании стали в ней возникают э. д. с. в направлении, определяемом обычным образом

по правилу правой ладони. В том же направлении текут создаваемые этими э. д. с. токи, называемые вихревыми. В машинах нормальной конструкции эти токи не используются. Вызывая потери энергии, они способствуют нагреванию стали и понижают к. п. д. машины. Чтобы уменьшить вредное действие этих токов, якорь собирают из листов электротехнической стали небольшой толщины (обычно 0,5 *мм*), изолированных друг от друга и располагаемых в плоскости, перпендикулярной оси машины (рис. 7-2).

При расчете потерь на вихревые токи мы предполагаем следующее:

1) толщина листа стали Δ незначительна по сравнению с его высотой и длиной;

2) индукция изменяется во времени синусоидально и по толщине листа распределяется равномерно, другими словами, мы пренебрегаем экранирующим действием возникающих в листе вихревых токов;

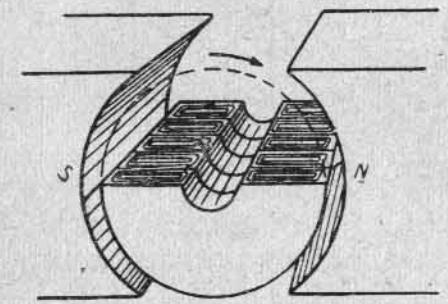


Рис. 7-2. Вихревые токи в стальных листах якоря при вращении в магнитном поле

3) магнитная проницаемость стали и ее удельное сопротивление остаются постоянными. В этом случае наводимая в листе э. д. с. может быть принята пропорциональной частоте перемагничивания f и индукции B, т. е. $e_{вх} \sim fB$; с другой стороны, $i_{вх} = e_{вх}/r$, где $r = \text{const}$.

Следовательно, потери на вихревые токи в единице массы выражаются в виде:

$$p_{вх} = i_{вх}^2 r = C_{вх} f^2 B^2, \qquad (7\text{-}11)$$

где $C_{вх}$ — постоянная, зависящая от марки стали и толщины листа.

Г. Суммарные потери в стали. Формулы (7-10) и (7-11) обычно выражают в следующем виде:

$$p_г = \sigma_г \left(\frac{f}{100}\right) B^2 \qquad (7\text{-}12)$$

и

$$p_{вх} = \sigma_{вх} \left(\frac{f}{100}\right)^2 B^2. \qquad (7\text{-}13)$$

Здесь потери $p_г$ и $p_{вх}$ выражаются в *вт/кг*, индукция B — в *тл*; значения коэффициентов $\sigma_г$ и $\sigma_{вх}$ приводятся в табл. 7-1.

Следовательно, суммарные потери в 1 *кг* массы стали составляют:

$$p_с = p_г + p_{вх} = \sigma_г \left(\frac{f}{100}\right) B^2 + \sigma_{вх} \left(\frac{f}{100}\right)^2 B^2. \qquad (7\text{-}14)$$

При расчете суммарных потерь в стали обычно пользуются величиной удельных потерь, возникающих в 1 *кг* массы стали данной марки

при частоте $f = 50$ *гц* и синусоидально изменяющейся во времени индукции $B = 1$ *тл*.

Кроме этого, в ГОСТ 802—58 приводятся значения удельных потерь для $B = 1{,}5$ и $1{,}7$ *тл*, последнее ее значение — только для холоднокатаной стали (см. введение, табл. В-4). В дальнейшем будем исходить из величины удельных потерь при $B = 1$ *тл*.

Таблица 7-1

Степень легирования стали	Толщина листа, *мм*	$\sigma_г$	$\sigma_{вх}$
Слабо- и среднелегированная	1,0	4,4	22,4
	0,5	4,4	5,6
	0,35	4,7	3,2
Высоколегированная	0,50	3,0	1,2
	0,35	2,4	0,6

Суммарные потери в стали данной части машины при любой частоте и любой индукции могут быть выражены в виде:

$$p_с = p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B^2 G_с. \qquad (7\text{-}15)$$

Здесь $p_{1,0/50}$ — удельные потери при $B = 1$ *тл* и $f = 50$ *гц*; f — частота перемагничивания стали; β — показатель степени, равный в среднем для слаболегированных сталей 1,5, для высоколегированных сталей 1,2 — 1,3; B — расчетная индукция в теслах в данной части машины; $G_с$ — масса этой части в килограммах.

Д. Практические формулы для расчета потерь в стали. Опыт показывает, что в исполненных машинах действительные потери в стали всегда больше потерь, рассчитанных по формулам (7-12) и (7-13). Это объясняется влиянием обработки и сборки листов активной стали: увеличением потерь на гистерезис вследствие образования «наклепа» в процессе штамповки и резки листов; увеличением потерь на вихревые токи вследствие образования заусениц при сборке пакетов или вследствие повреждения изоляции листов при запрессовке пакетов под слишком сильным давлением и т. д.

Мерами, ослабляющими влияние этих технологических факторов, являются: очистка листов от заусениц на специальных станках, отжиг вырубок в атмосфере водорода, запрессовка пакетов при вполне определенных давлениях и т. д.

Увеличение потерь в стали под влиянием причин технологического характера не поддается расчету. Поэтому в формулы (7-12) и (7-13) вводят поправочные коэффициенты, устанавливаемые опытным путем. Так, например, потери в стали машин постоянного тока можно рассчитывать по формулам:

для спинки якоря

$$p_{са} = \left[2\sigma_г \frac{f}{100} B_а^2 + 2{,}3\sigma_{вх} \left(\frac{f}{100} B_а\right)^2\right] G_{са}; \qquad (7\text{-}16)$$

для зубцов якоря:

$$p_{с.з} = \left[1{,}2\sigma_г \frac{f}{100} B^2_{з.ср} + 3\sigma_{вх}\left(\frac{f}{100} B_{з.ср}\right)^2\right] G_{с.з}. \qquad (7\text{-}17)$$

Здесь $\sigma_г$ и $\sigma_{вх}$ — коэффициенты по табл. 7-1; 2 и 2,3 — коэффициенты, учитывающие увеличение потерь при вращательном перемагничивании, а также вследствие неравномерного распределения магнитной индукции по перемагничиваемому объему стали; *1*, *2* и *3* — коэффициенты, учитывающие увеличение потерь вследствие наклепа материала при штамповке и вследствие несинусоидальности изменения индукции во времени; B_a и $B_{з.ср}$ — индукция в теслах в спинке якоря и средняя индукция в зубце.

При расчете суммарных потерь в стали можно пользоваться формулами:

$$p_{са} = (2{,}4 \div 4)\, p_{1{,}0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B^2_a G_{са}; \qquad (7\text{-}18)$$

$$p_{с.з} = (1{,}7 \div 2)\, p_{1{,}0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B^2_{з.ср} G_{с.з}. \qquad (7\text{-}19)$$

Здесь $(2{,}4 \div 4)$ и $(1{,}7 \div 2)$ — коэффициенты, учитывающие увеличение суммарных потерь в спинке якоря в зубцах; $\beta = 1{,}2 \div 1{,}5$.

7-5. Основные потери в меди

А. Потери в меди якоря. Рассчитаем потери в меди якоря машины постоянного тока. Пусть i_a — ток в одной ветви обмотки, $2a$ — число параллельных ветвей обмотки, r'_a — сопротивление одной ветви, $I_a = i_a 2a$ и $r_a = r'_a/(2a)$ — ток якоря и сопротивление обмотки якоря. Тогда

$$p_{ма} = i_a^2 r'_a 2a = \left(\frac{I_a}{2a}\right)^2 r'_a 2a = I_a^2 \frac{r'_a}{2a} = I_a^2 r_a. \qquad (7\text{-}20)$$

Пусть, далее, ρ_{15} — удельное сопротивление меди при температуре $\vartheta_0 = 15°$ С, N — число проводников обмотки якоря, $l_{пр}$ — длина полувитка обмотки, $S_{пр}$ — площадь поперечного сечения проводника, ϑ_a — температура обмотки якоря при работе, α — температурный коэффициент меди, численно равный увеличению сопротивления проводника в 1 *ом* при увеличении температуры на 1° С; для обычных в электромашиностроении пределов изменения температуры в среднем $\alpha = 0{,}004$. Тогда

$$r'_a = \rho_{15} \frac{N}{2a} \frac{l_{пр}}{S_{пр}} [1 + \alpha(\vartheta_a - \vartheta_0)].$$

Следовательно,

$$p_{ма} = \left(\frac{I_a}{2a}\right)^2 \rho_{15} \frac{N l_{пр}}{S_{пр}} [1 + \alpha(\vartheta_a - \vartheta_0)]. \qquad (7\text{-}21)$$

Если $l_{пр}$ выражается в *см* и $S_{пр}$ — в *мм*², то

$$\rho_{15} = \frac{1}{5700}\ ом \cdot мм^2/см \text{ при } \vartheta_0 = 15° \text{ С}.$$

Согласно ГОСТ 183—66, потери в меди электрических машин приводятся к температуре $\vartheta_a = 75°$ С. Тогда

$$p_{ма} = \left(\frac{I_a}{2a}\right)^2 \frac{N l_{пр}}{4600 S_{пр}}. \qquad (7\text{-}22)$$

С достаточной точностью можно считать, что $l_{пр} = l + 1{,}4\tau + (2 \div 3)$, где l — длина якоря и τ — полюсное деление, выраженные в *см*.

Формуле (7-22) можно придать другой вид, а именно:

$$p_{ма} = \left(\frac{i_a}{S_{пр}}\right)^2 \frac{N l_{пр} S_{пр}}{4600} = j_a^2 \frac{N l_{пр} S_{пр} \gamma_м}{4600 \gamma_м}.$$

Здесь $j_a = i_a/S_{пр}$ — плотность тока в обмотке якоря, $а/мм^2$; $\gamma_м = 8{,}9$ — плотность меди и $N l_{пр} S_{пр} \gamma_м = G_{ма}$ — масса меди обмотки якоря.

Если выразить $l_{пр}$ в *дм* и $S_{пр}$ — в $дм^2$, то после преобразований получаем

$$p_{ма} = j_a^2 \frac{G_{ма} \cdot 10^5}{4600 \cdot 8{,}9} = 2{,}4 j_a^2 G_{ма}, \qquad (7\text{-}23)$$

где масса $G_{ма}$ выражена в килограммах.

Численный пример

В машине ПН-290 (см. выше § 2-13) имеем: $I_a = 103\ а$; $a = 1$; $N = 524$; $l_a = 140\ мм$; $S_a = 1{,}81 \times 6{,}9 \approx 12{,}3\ мм^2$; $\tau = 23{,}2\ см$.

Следовательно,

$$l_{пр} = l_a + 1{,}4\tau + 2 = 14 + 1{,}4 \cdot 23{,}2 + 2 = 48{,}4\ см;$$

$$j_a = \frac{I_a}{2S_a} = \frac{103}{2 \cdot 12{,}3} = 4{,}18\ а/мм^2;$$

$$G_{ма} = 8{,}9 \cdot 524 \cdot 48{,}4 \cdot 12{,}3 \cdot 10^{-5} = 27{,}7\ кг \text{ (по табличным данным } G_{ма} = 27{,}1\ кг);$$

$$p_{ма} = 2{,}4 \cdot 4{,}18^2 \cdot 27{,}7 = 1160\ вт.$$

В процентном отношении к номинальной мощности машины потери в обмотке якоря составляют

$$\frac{p_{ма}}{P_н} = \frac{1{,}16}{23} \cdot 100 = 5{,}05\%.$$

Потери в меди других обмоток определяются по формулам, аналогичным формулам (7-22) или (7-23).

Б. Потери на возбуждение ($p_в$). Согласно ГОСТ 183—66, к потерям на возбуждение относятся потери собственно в обмотке возбуждения

и потери в регулировочных реостатах, если они необходимы для работы машины в номинальном режиме. Поэтому

$$p_в = U_в i_в, \qquad (7\text{-}24)$$

где $U_в$ — напряжение на зажимах цепи возбуждения; $i_в$ — ток в цепи возбуждения.

В. Потери в щеточном контакте ($p_щ$). Если $\Delta U_щ$ — переходное падение напряжения на пару щеток разной полярности и $I_a = 2ai_a$ — ток якоря, то потери в щеточном контакте можно определить по формуле

$$p_щ = \Delta U_щ I_a. \qquad (7\text{-}25)$$

Значения $\Delta U_щ$ приводятся в табл. 6-1. Согласно ГОСТ 183—66, падение напряжения в щеточном контакте считается постоянным и для щетки каждой полярности составляет: 1 *в* для угольных и графитных щеток и 0,3 — для металлоугольных щеток. Следовательно, формулу (7-25) можно написать соответственно марке щетки в виде:

$$p_щ = 2\,(0{,}3 \div 1{,}0)\, I_a. \qquad (7\text{-}26)$$

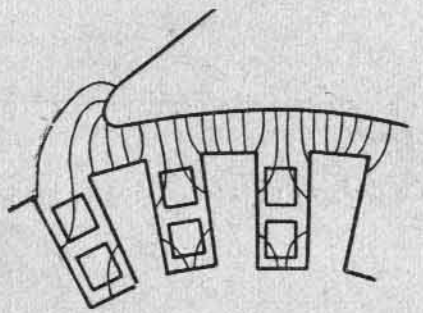


Рис. 7-3. Распределение поля в пазах якоря

7-6. Добавочные потери

Добавочные потери $p_д$ возникают как в стали, так и в меди электрических машин. Некоторые виды добавочных потерь появляются уже при холостом ходе, другие — только при нагрузке.

Здесь мы будем иметь в виду машины постоянного тока, для машин других типов необходимые сведения приводятся в соответствующих разделах.

При холостом ходе добавочные потери возникают:

1) в сердечниках основных и добавочных полюсов и в ярме вследствие продольной пульсации потока, обусловленной зубчатостью якоря (см. рис. 3-11);

2) в наконечниках основных полюсов вследствие поперечных колебаний магнитного потока (см. рис. 3-10);

3) в обмотке якоря вследствие неравномерного распределения в пазу основного магнитного поля (рис. 7-3). Это поле можно разложить на продольное поле, которое создает в обмотке основную э. д. с., и поперечное поле, которое создает в проводниках обмотки якоря вихревые токи.

Величина потерь на вихревые токи зависит от формы и размеров сечения проводника и от степени неравномерности распределения поля, с изменением нагрузки эти потери почти не изменяются.

Добавочные потери при нагрузке возникают:

1) в сердечнике якоря вследствие искажения основного магнитного поля реакцией якоря (в машинах без компенсационной обмотки);

2) в коммутируемых секциях при изменении сцепленного с коммутируемой секцией потока рассеяния соответственно изменению тока в секции от $+i_a$ до $-i_a$. При этом возникает неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника, и в обмотке якоря появляются добавочные потери, достигающие тем большей величины, чем больше число проводников, расположенных по высоте паза, и чем больше высота проводника $h_{пр}$ и частота перемагничивания f. Анализ показывает, что для двухслойной обмотки при $f = 50$ *гц* критическая высота проводника, выше которой начинается резкое увеличение добавочных потерь, составляет $h_{пр.\,кр} = 10$ *мм*;

3) в щеточном контакте вследствие неравномерного распределения плотности тока под щеткой при криволинейной коммутации;

4) в уравнительных соединениях, если машина ими снабжена.

Добавочные потери либо вовсе не могут быть рассчитаны, либо рассчитываются только с большим приближением. Поэтому ГОСТ 183—66 учитывает добавочные потери в машинах постоянного тока без компенсационной обмотки при номинальной нагрузке одним процентом (1%) от полезной мощности, если машина работает генератором, и от подводимой мощности, если машина работает двигателем, для компенсированных машин постоянного тока — 0,5%.

При изменении нагрузки считают, что добавочные потери изменяются пропорционально квадрату тока.

7-7. Суммарные потери в машине постоянного тока и ее к. п. д.

Зная потери в отдельных частях машины — механические потери $p_{мх}$, потери в стали $p_с$, потери в меди обмотки якоря и последовательно соединенных с нею обмоток $p_{ма}$, потери в цепи возбуждения $p_в$, потери в щеточном контакте $p_щ$, и добавочные потери $p_д$, мы можем определить их сумму:

$$\sum p = p_{мх} + p_с + p_{ма} + p_в + p_щ + p_д. \qquad (7\text{-}27)$$

Если P_1 — мощность, подводимая к машине, и P_2 — мощность, полезно отдаваемая машиной, то

$$P_1 = P_2 + \sum p. \qquad (7\text{-}28)$$

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) машины представляет собой отношение полезно отдаваемой ею мощности P_2 ко всей подведенной к ней мощности P_1:

$$\eta = P_2/P_1. \qquad (7\text{-}29)$$

Мощность генератора постоянного тока, отдаваемая им в сеть,

$$P_2 = U_с I_с,$$

где $U_с$ и $I_с$ — соответственно напряжение и ток внешней сети генератора. Тогда к. п. д. генератора

$$\eta_г = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = \frac{U_с I_с}{U_с I_с + \Sigma p}. \qquad (7\text{-}30)$$

Так как Σp обычно составляет лишь небольшую величину по сравнению с P_2, то уравнение (7-30) можно представить в другой форме, дающей при вычислениях более точный результат:

$$\eta_г = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}. \qquad (7\text{-}31)$$

Если, как это часто делается, выражать к. п. д. в процентах, то

$$\eta_г = 100 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p} \cdot 100\%. \qquad (7\text{-}31а)$$

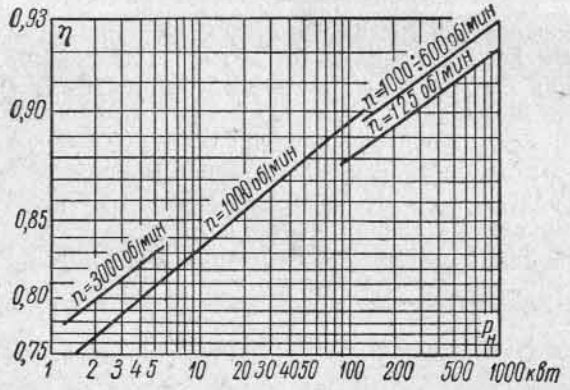


Рис. 7-4. Кривые к. п. д. машин постоянного тока

Для двигателей постоянного тока полезной является мощность, развиваемая ими на валу. Мощность, подведенная к двигателю из сети $U_с I_с$, включая мощность, необходимую для его возбуждения, составляет P_1, поэтому

$$\eta_д = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = \frac{U_с I_с - \Sigma p}{U_с I_с} \qquad (7\text{-}32)$$

или иначе

$$\eta_д = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1}. \qquad (7\text{-}33)$$

Если выражать к. п. д. двигателя в процентах, то

$$\eta_д = 100 - \frac{\Sigma p}{P_1} \cdot 100\%. \qquad (7\text{-}33а)$$

С ростом мощности машин постоянного тока относительная доля потерь в них ($\Sigma p / P_н$), как правило, уменьшается и к. п. д. соответственно возрастает. На рис. 7-4 приведены примерные зависимости к. п. д. машин постоянного тока от их номинальной мощности.

7-8. Изменение к. п. д. машины постоянного тока с изменением нагрузки и максимальный к. п. д.

При изменении режима работы машины постоянного тока меняется как подводимая к ней мощность P_1, так и Σp, а поэтому и к. п. д.

При холостом ходе, когда $P_2 = 0$, к. п. д. $\eta = 0$; с возрастанием нагрузки к. п. д. сначала сравнительно быстро увеличивается до некоторого максимального значения, а затем начинает уменьшаться. Величина нагрузки, при которой к. п. д. достигает $\eta_{макс}$, зависит от соотношения между величинами отдельных составляющих потерь и их изменения с изменением нагрузки.

Рассмотрим условия получения $\eta_{макс}$ для генератора постоянного тока параллельного возбуждения (см. § 8-1), работающего при постоянной скорости вращения $n = \text{const}$ и постоянным напряжении $U = \text{const}$. В этом случае потери холостого хода (при $I = 0$) являются постоянными:

$$p_0 = p_{мх} + p_с + p_{тр.щ} + p_{в0} = \text{const}, \qquad (7\text{-}34)$$

где $p_{в0}$ — потери на возбуждение при $U = U_с = \text{const}$ и $I = 0$. При нагрузке генератора дополнительно возникают потери в цепи якоря генератора $p_{ма} = r_a I^2$ и в контактах щеток $p_щ = \Delta U_щ I$. Кроме того, для поддержания $U = U_с = \text{const}$ при увеличении тока нагрузки ток возбуждения должен несколько повышаться (см. § 8-9, п. Д), как это можно приблизительно описать уравнением $i_в = i_{в0} + k_1 I$. Таким образом, потери в цепи возбуждения $i_в^2 r_в$ будут состоять из постоянной $p_{в0}$ и переменной составляющих, последняя из которых пропорциональна I.

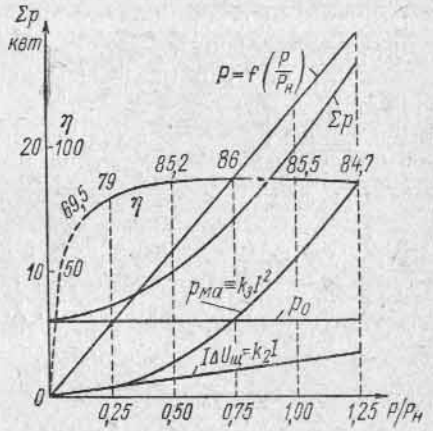


Рис. 7-5. Кривые потерь и к. п. д. для генератора

В машине под нагрузкой сумма потерь может быть выражена уравнением

$$\Sigma p = p_0 + k_2 I + k_3 I^2 \qquad (7\text{-}35)$$

и к. п. д. —

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = \frac{UI}{p_0 + (U + k_2) I + k_3 I^2}. \qquad (7\text{-}36)$$

Для нахождения условий достижения $\eta_{макс}$ возьмем производную от η по току I и приравняем ее нулю:

$$\frac{d\eta}{dI} = \frac{[p_0 + (U + k_2) I + k_3 I^2] U - UI (U + k_2 + 2k_3 I)}{[p_0 + (U + k_2 I) + k_3 I^2]^2} = 0,$$

откуда получим

$$k_3 I^2 = p_0. \qquad (7\text{-}37)$$

Таким образом,

к. п. д. достигает максимума, когда потери, пропорциональные квадрату тока, становятся равными потерям, не зависящим от тока.

Подобным же образом могут быть найдены условия достижения $\eta_{макс}$ и при изменяющейся скорости вращения машины.

При проектировании машин постоянного тока соотношения между постоянными и переменными потерями выбираются так, чтобы $\eta_{макс}$ получался в области нагрузок, при которых машина работает наиболее продолжительное время.

На рис. 7-5 приведены кривые зависимости составляющих потерь и к. п. д. от относительной нагрузки $P/P_н$ для генератора постоянного тока $P_н = 115$ *квт*, у которого $\eta_{макс} = 0{,}86$ при $P/P_н = 0{,}75$. Как легко видеть, при этой нагрузке потери $p_{ма} = p_0$.

7-9. Опытное определение к. п. д. машины постоянного тока

Опытное определение к. п. д. электрической машины представляет собой одну из ответственных задач ее испытания.

Непосредственное нахождение к. п. д. по формуле (7-29), путем измерения отданной P_2 и подведенной P_1 мощностей, может быть произведено с достаточной точностью только в том случае, если к. п. д. машины не превосходит 80%, так как при этом ошибки в измерении мощностей P_1 и P_2 непосредственно определяют ошибку получаемой величины к. п. д.

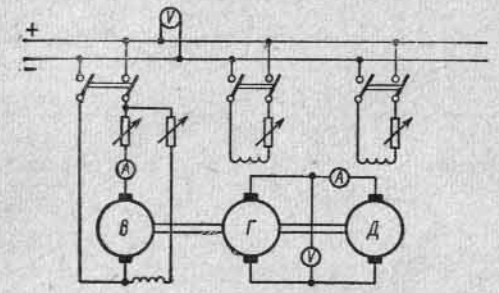


Рис. 7-6. Схема включения для определения к. п. д. по методу возвратной работы

При $\eta > 80\%$ вычисление к. п. д. необходимо производить по формулам (7-31) и (7-33) — по данным измерений отдельных потерь или их суммы. В этом случае ошибка в измерении потерь, будучи отнесена к подведенной мощности, сильно уменьшается и поэтому весьма мало влияет на погрешность результирующей величины к. п. д.

При наличии двух одинаковых машин к. п. д. может определяться методом возвратной работы, при котором обе машины соединяются механически и электрически (рис. 7-6). В этом случае одна из машин работает в режиме генератора, а вторая — в режиме двигателя. Извне доставляется механическим (или электрическим) путем только мощность, необходимая для покрытия потерь обеих машин, так как мощность, отдаваемая генератором, возвращается обратно в двигатель. Зная сумму потерь Σp_a агрегата, можно вычислить к. п. д. каждой из машин, принимая, например, потери в них одинаковыми и равными $\Sigma p_a/2$. Тогда для машины, работающей генератором,

$$\eta_г = \frac{UI}{UI + \frac{\Sigma p_a}{2}}, \qquad (7\text{-}38)$$

а для машины, работающей двигателем,

$$\eta_г = \frac{UI - \frac{\Sigma p_0}{2}}{UI}. \qquad (7\text{-}39)$$

При применении метода возвратной работы для определения к. п. д. машин постоянного тока с независимым возбуждением (см. § 8-1) генератору дается повышенное возбуждение по сравнению с двигателем таким образом, чтобы в главной цепи обеих машин протекал ток I, а на зажимах электрически соединенных машин получалось номинальное напряжение $U_н$ (рис. 7-6). В этом случае механические потери, потери в меди главной цепи, потери в стали и потери в контактах щеток покрываются механическим путем от вспомогательного двигателя B, приводящего весь агрегат во вращение, а потери на возбуждение — непосредственно из сети постоянного тока, питающей обмотки возбуждения машин.

Глава восьмая

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

8-1. Предварительные замечания

На современных электрических станциях практически генерируется только электроэнергия трехфазного переменного тока. Значительная часть этой энергии используется в той же форме переменного тока в промышленности для целей освещения и бытовых нужд. В тех случаях, когда по условиям производства необходим или предпочтителен постоянный ток (предприятия химической и металлургической промышленности, транспорт и т. д.), он получается чаще всего путем преобразования переменного тока в постоянный с помощью преобразователей ионного или машинного типа. В последнем случае широко применяются установки по схеме двигатель — генератор, в которых двигатель переменного тока сочленяется с генератором постоянного тока на одном валу. В качестве первичных источников энергии генераторы постоянного тока применяются главным образом в изолированных установках (как возбудители синхронных машин), на автомашинах, самолетах, при сварке дугой, для освещения поездов, на подводных лодках и т. д.

Таким образом, область применения генераторов постоянного тока достаточно широка и соответственно многообразны предъявляемые к ним требования в отношении мощностей, напряжений, скоростей вращения, надежности работы, сроков службы и т. д. Здесь мы рассмотрим только основные свойства генераторов постоянного тока, не касаясь специальных режимов их работы.

8-2. Классификация генераторов постоянного тока по способу возбуждения

По способу возбуждения генераторы постоянного тока делятся на генераторы независимого возбуждения и генераторы с самовозбуждением.

Генераторы независимого возбуждения делятся на а) генераторы, возбуждаемые электромагнитным путем, и б) генераторы с постоянными магнитами.

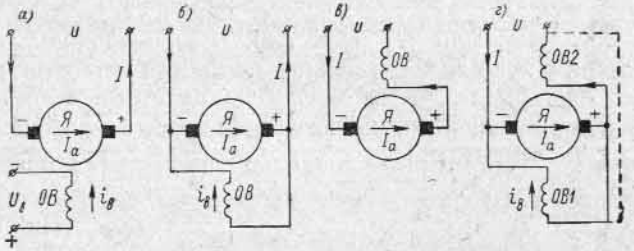


Рис. 8-1. Принципиальные схемы генераторов постоянного тока

Так как последние имеют ограниченное значение, то в дальнейшем мы будем иметь в виду только первые.

Генераторы с самовозбуждением делятся в зависимости от способа включения обмоток возбуждения на а) генераторы параллельного возбуждения (шунтовые), б) генераторы последовательного возбуждения (сериесные) и в) генераторы смешанного возбуждения (компаундные).

На рис. 8-1, *а*, *б*, *в*, *г* изображены принципиальные схемы генераторов независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Здесь *Я* — якорь; *ОВ* — обмотка возбуждения; U и $U_в$ — напряжения на зажимах генератора и цепи возбуждения; I_a — ток в якоре; I — ток, отдаваемый генератором в сеть; $i_в$ — ток возбуждения.

В генераторе независимого возбуждения $I_a = I$, в общем случае $U_в \neq U$. В генераторе параллельного возбуждения $I_a = I + i_в$ и $U_в = U$. В генераторе последовательного возбуждения $i_в = I$, т. е. возбуждение генератора зависит от его нагрузки. Генератор смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения — параллельную *ОВ1* и последовательную *ОВ2*, н. с. которых могут либо складываться, либо вычитаться. Во всех случаях на возбуждение генератора тратится 1—3% от его номинальной мощности.

8-3. Энергетический процесс генератора постоянного тока

В основе работы генератора любого типа, и в частности генератора постоянного тока, лежит процесс преобразования подводимой к нему механической энергии в электрическую. Для этого генератор сочленяют с каким-нибудь первичным двигателем, например двигателем внутреннего сгорания, который приводит его во вращение с некоторой скоростью n.

Рассмотрим процесс преобразования энергии на примере генератора независимого возбуждения, приводимого во вращение с постоянной скоростью, т. е. при $n = \text{const}$. При независимом возбуждении, если возбудитель не находится на одном валу с генератором, мощность $P_в$, необходимая для покрытия потерь в цепи возбуждения, не входит в мощность P_1, подводимую к генератору от первичного двигателя (рис. 8-2). При преобразовании энергии часть мощности P_1 тратится на покрытие механических потерь $p_{мх}$ и потерь в стали $p_с$, а остальная часть преобразовывается в электромагнитную энергию, определяемую электромагнитной мощностью $P_a = E_a I_a$. Таким образом,

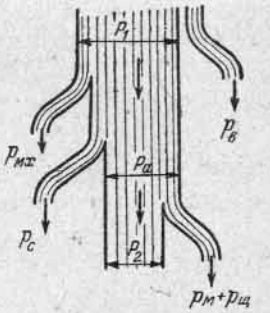


Рис. 8-2. Энергетическая схема генератора постоянного тока независимого возбуждения

$$P_a = E_a I_a = P_1 - (P_{мх} + P_с). \qquad (8\text{-}1)$$

Полезная мощность $P = UI_a$, отдаваемая генератором в сеть, меньше мощности P_a на величину потерь в меди якорной цепи машины $p_м = I_a^2 R_{ам}$ и потерь в щеточном контакте $p_щ = \Delta U_щ I_a$, где $R_{ам}$ — сопротивление последовательно соединенных обмоток, составляющих цепь якоря, и $\Delta U_щ$ — переходное падение напряжения на пару щеток. Возникающие при работе машины добавочные потери мы особо не учитываем, включая их частью в потери в стали $p_с$, частью — в потери в меди $p_м$.

Таким образом,

$$UI_a = P_2 = P_a - (p_м + p_щ) = E_a I_a - \left(I_a^2 R_{ам} + \Delta U_щ I_a\right). \qquad (8\text{-}2)$$

Электромагнитная мощность $P_a = E_a I_a$ есть основное звено, связывающее подведенную к генератору механическую мощность P_1 и электрическую мощность $P_2 = UI_a$, полезно отданную генератором в сеть.

8-4. Уравнение э. д. с. генератора при $n = \text{const}$

Сократив обе части равенства (8-2) на I_a, получаем уравнение э. д. с генератора в виде

$$U = E_a - (I_a R_{ам} + \Delta U_щ) \qquad (8\text{-}3а)$$

или

$$E_a = U + (I_a R_{ам} + \Delta U_{щ}). \qquad (8\text{-}3б)$$

Для упрощения сумму $I_a R_{ам} + \Delta U_{щ}$ часто представляют в виде

$$I_a\left(R_{ам} + \frac{\Delta U_{щ}}{I_a}\right) = I_a R_a.$$

В этом случае

$$E_a = U + I_a R_a. \qquad (8\text{-}4)$$

Из этого равенства видно, что при $n = \text{const}$ э. д. с. E_a имеет две составляющие: одна (U) выводится на зажимы генератора и действует на приключенную к генератору внешнюю цепь, а другая ($I_a R_a$) преодолевает сопротивление генератора и обычно называется падением напряжения в якоре генератора.

8-5. Электромагнитный момент генератора

Предположим, что первичный двигатель создает на валу генератора момент M_1, приводящий генератор во вращение против часовой стрелки с некоторой постоянной скоростью n (рис. 8-3). Если генератор возбужден, то в проводнике a обмотки якоря, находящемся под северным полюсом, наводится э д. с., направленная к нам; в том же направлении течет по проводнику a ток i_a.

Между магнитным полем и расположенным в нем проводником с током i_a возникает сила электромагнитного взаимодействия f_x. Будем считать, что индукция B_x имеет одно и то же значение по длине проводника l', расположенного в плоскости, перпендикулярной к направлению линий магнитного поля. В этом случае

$$f_x = B_x l' i_a.$$

Так как линии поля направлены нормально к поверхности якоря, то сила f_x создает на валу генератора момент

$$M_x = f_x \frac{D_a}{2} = B_x l' i_a \frac{D_a}{2}.$$

Чтобы определить направление этого момента, достаточно совместить основное магнитное поле и поле, созданное током в проводнике i_a (рис. 8-4, *а*). Результирующее поле показано на рис. 8-4, *б*. Мы видим, что сила f_x направлена встречно относительно направления вращения якоря и, следовательно, *электромагнитный момент проводника M_x действует встречно относительно момента первичного двигателя M_1, т. е. является по отношению к последнему тормозящим*. Этот вывод носит общий характер, т. е. *справедлив в любых условиях работы машины генератором*.

В действительной машине под каждым полюсом находится $N/2p$ проводников, поэтому электромагнитный момент генератора, создаваемый всеми проводниками в машине с числом полюсов $2p$, будет

$$M_a = 2p \sum_{1}^{N/2p} M_x = 2pl' i_a \frac{D_a}{2} \sum_{1}^{N/2p} B_x.$$

При достаточно большом числе проводников величина суммы $\sum_{1}^{N/2p} B_x$ равна среднему значению индукции $B_{ср}$, умноженному на число проводников под одним полюсным делением, т. е.

$$\sum_{1}^{N/2p} B_x = B_{ср} \frac{N}{2p}.$$

Принимая во внимание, что

$$B_{ср} = \frac{\Phi}{\tau l'} = \frac{\Phi}{\frac{\pi D_a}{2p} l'} = 2p \frac{\Phi}{\pi D_a l'} \quad \text{и} \quad i_a = \frac{I_a}{2a},$$

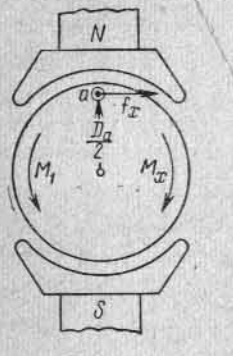


Рис. 8-3. Электромагнитный момент генератора

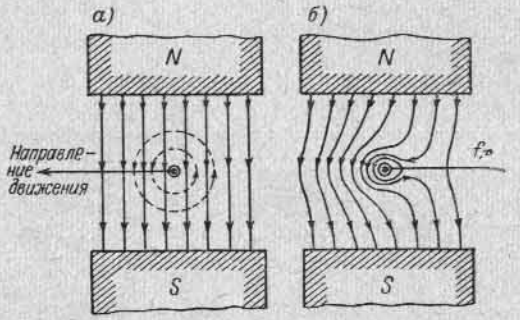


Рис. 8-4. Картина совмещенных полей

получаем для электромагнитного момента выражение

$$M_a = 2pl' i_a \frac{D_a}{2} N \frac{\Phi}{\pi D_a l'} = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N I_a \Phi. \qquad (8\text{-}5)$$

Это выражение можно представить в виде

$$M_a = \frac{1}{\pi}\left(N \frac{I_a}{2a}\right)(p\Phi), \qquad (8\text{-}6)$$

т. е.

> **электромагнитный момент генератора пропорционален потоку всех p пар полюсов машины ($p\Phi$) и току всей обмотки якоря $\left(N \frac{Ia}{2a}\right)$.**

В исполненной машине p, N и a заданы. В этом случае формулу для момента можно написать в следующем упрощенном виде:

$$M_a = C_м I_a \Phi, \qquad (8\text{-}7)$$

где

$$C_м = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a}.$$

Выражение для электромагнитного момента можно получить из выражения для электромагнитной мощности $P_a = E_a I_a$, где $E_a = \frac{p}{a} nN\Phi$. По общему правилу $M_a = \frac{P_a}{\omega}$, где $\omega = 2\pi n$ — угловая скорость вращения. Следовательно,

$$M_a = \frac{P_a}{\omega} = \frac{E_a I_a}{2\pi n} = \frac{\frac{p}{a} nN\Phi I_a}{2\pi n} = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} NI_a\Phi.$$

В единицах СИ поток выражается в веберах, момент — в ньютонометрах. Если же поток Ф выражается в максвеллах, а момент M_a — в килограммометрах, то в правую часть формулы (8-5) вводится переводной коэффициент $10^{-8}/9{,}81$.

Численный пример

Рассчитаем момент M_a и мощность P_a шунтового генератора типа ПН-290, данные которого были приведены ранее в § 2-13. В данном случае: $P_н = 23$ *квт*; $U_н = 230$ *в*; $n_н = 970$ *об/мин* $= 16{,}15$ *об/сек*; $p = 2$; $a = 1$; $N = 524$; $\Phi = 1{,}47 \times 10^6$ *мкс* $= 1{,}47 \cdot 10^{-2}$ *вб*; $I_н = 100$ *а*; $I_a = 103$ *а*. Следовательно [см. формулу (8-6)],

$$M_a = \frac{1}{2\pi}\left(N\frac{I_a}{a}\right)(p\Phi) = \frac{1}{2\pi}(524 \cdot 103)(2 \cdot 1{,}47 \cdot 10^{-2}) = 251 \text{ нм} \quad \text{(ньютонометров)}$$

или

$$\frac{1}{2\pi}(524 \cdot 103)(2 \cdot 1{,}47 \cdot 10^{6}) \cdot \frac{10^{-8}}{9{,}81} = 25{,}6 \text{ кгс} \cdot \text{м};$$

$$P_a = M_a\omega = 25{,}6 \cdot 2\pi \cdot 16{,}15 = 25\,900 \text{ вт} = 25{,}9 \text{ квт}.$$

Так как, согласно данным для той же машины, падение напряжения в цепи ее якоря, включая и падение напряжения в контакте щеток, составляет $I_a R_a = 19$ *в*, то $p_м + p_щ = 19 \cdot 103 = 1{,}96$ *квт*. Кроме того, из той же мощности P_a на возбуждение тратится $U_в i_в = 3 \cdot 230 = 0{,}69$ *квт*, поскольку генератор работает в режиме самовозбуждения. Следовательно, $P_2 = 25{,}9 - (1{,}96 + 0{,}69) = 23{,}25$ *квт*, что достаточно близко к номинальной мощности генератора 23 *квт*.

8-6. Уравнение моментов генератора

Кроме тормозящего электромагнитного момента M_a, на валу генератора существует еще тормозящий момент холостого хода M_0, соответствующий мощности p_0, которую нужно подвести к генератору при холостом ходе, чтобы покрыть потери холостого хода $p_{мх} + p_с$. По общему правилу

$$M_0 = \frac{p_0}{\omega} = \frac{p_0}{2\pi n}. \qquad (8\text{-}8)$$

При $n = \text{const}$ *вращающий момент первичного двигателя* M_1 *и тормозящий момент генератора* $M_г = M_a + M_0$ *должны находиться во взаимном равновесии, т. е. должны быть равны друг другу по величине и направлены в обратные стороны.*

Следовательно, при $n = \text{const}$ имеем:

$$M_1 = -M_г = -(M_a + M_0). \qquad (8\text{-}9)$$

Обычно под M_a и M_0 понимают составляющие момента M_1 первичного двигателя, каждая из которых уравновешивает соответствующий момент генератора. В этом случае

$$M_1 = M_a + M_0. \qquad (8\text{-}10)$$

Уравнение моментов для случая, когда $n \neq \text{const}$, рассматривается ниже при изучении работы машины двигателем.

8-7. Основные характеристики генераторов постоянного тока

Свойства генераторов анализируются с помощью характеристик, устанавливающих зависимости между основными величинами, определяющими работу генератора. Такими величинами являются: а) напряжение на зажимах генератора U; б) ток возбуждения $i_в$; в) ток в якоре I_a; г) скорость вращения n.

Так как генераторы чаще всего работают с постоянной скоростью вращения, то основная группа характеристик снимается при $n = \text{const}$. Из остальных трех величин напряжение U имеет наибольшее значение, поскольку оно определяет свойства генератора в отношении той сети, на которую генератор работает. Поэтому основными характеристиками являются:

1. Нагрузочная характеристика $U = f(i_в)$ при $I = \text{const}$. В частном случае, когда $I = 0$, нагрузочная характеристика переходит в характеристику холостого хода, имеющую важное значение для оценки генератора и построения его других характеристик.

2. Внешняя характеристика $U = f(I)$ при постоянном сопротивлении цепи возбуждения $R_в = \text{const}$.

3. Регулировочная характеристика $i_в = f(I)$ при $U = \text{const}$. В частном случае, когда $U = 0$, регулировочная характеристика переходит в характеристику короткого замыкания $I_к = f(i_в)$.

Наряду с перечисленными главными характеристиками существуют еще другие, в частности характеристики при переменной скорости вращения, но они имеют вспомогательное значение.

Мы рассмотрим характеристики генераторов в зависимости от способа возбуждения как основного фактора, определяющего свойства генераторов.

8-8. Характеристики генератора независимого возбуждения

Независимое возбуждение применяется достаточно широко: в генераторах низкого напряжения (4—24 *в*), в генераторах высокого напряжения (свыше 600 *в*), в машинах большой мощности, когда требуется широкая регулировка напряжения и т. д.

А. Характеристика холостого хода: $U_0 = f(i_в)$ при $I = 0$ и $n =$ $=$ const. Схема для снятия этой характеристики представлена на рис. 8-5. Обозначения те же, что и на рис. 8-1; реостат $r_{рг}$ должен быть подобран так, чтобы ток $i_в$ можно было регулировать в широких пределах; P — рубильник, который в данном случае размыкает цепь якоря.

При снятии характеристики щетки должны находиться на линии геометрической нейтрали как в машинах с добавочными полюсами, так и в машинах без них.

Так как в машине всегда имеется остаточный магнитный поток, то при $i_в = 0$ на зажимах генератора получается напряжение $U'_{00} =$

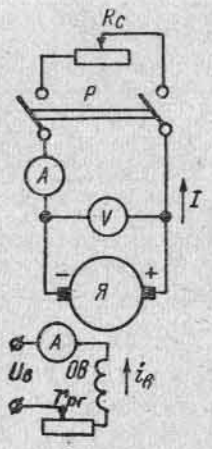


Рис. 8-5. Схема для снятия характеристик генератора независимого возбуждения

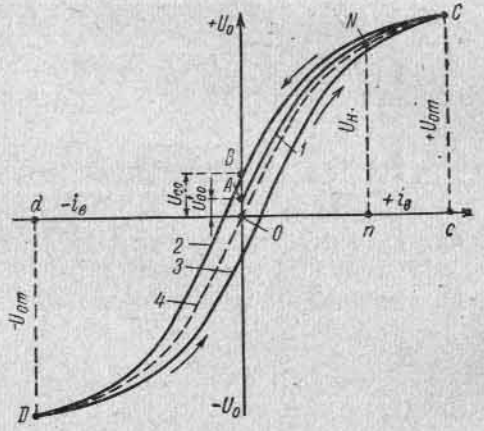


Рис. 8-6. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

$= OA$ (рис. 8-6). Обычно $U'_{00} = (2 \div 3)$ % от номинального напряжения $U_н$.

При изменении тока $i_в$ от $i_в = 0$ до наибольшего значения $+ i_{вm} =$ $= Oc$ напряжение U_0 растет по кривой *1* до значения $+ U_{0m} = Cc$. Обычно $U_{0m} = (1{,}1 \div 1{,}25)\, U_н$.

При холостом ходе якорь генератора независимого возбуждения включен только на вольтметр, имеющий относительно большое сопротивление; поэтому можно считать, что

$$U_0 = E_0 = C_e n \Phi = C'_e \Phi.$$

Таким образом, зависимость $U_0 = f(i_в)$ повторяет в некотором масштабе зависимость $\Phi = f(i_в)$, т. е. представляет собой характеристику намагничивания машины.

Теперь будем изменять ток $i_в$ от значения $+ i_{вm} = Oc$ до значения $i_в = 0$, а затем, переключив ток в цепи возбуждения на обратное направление, будем продолжать изменять ток $i_в$ в пределах от $i_в = 0$ до $- i_{вm} = Od$. Полученная таким путем кривая *2* проходит в первом квадранте выше кривой *1* вследствие возрастания величины остаточного магнитного потока.

Если же теперь мы повторим операцию изменения тока возбуждения в обратном порядке от $- i_{вm} = Od$ до $+ i_{вm} = Oc$, то получим кривую *3*, которая совместно с кривой *2* образует гистерезисную петлю, определяющую свойства стали полюсов и ярма. Кривые *2* и *3* называются нисходящей и восходящей ветвями характеристики холостого хода. Проведя между ними среднюю линию *4*, получим так называемую расчетную характеристику холостого хода. Следует иметь в виду, что изменение тока можно производить только в одном направлении, так как в противном случае мы будем переходить на другие кривые намагничивания, не соответствующие данному циклу.

Начальная часть характеристики холостого хода представляет собой практически прямую линию. Это объясняется тем, что при малых токах возбуждения почти вся н. с. идет на проведение магнитного потока через зазор, т. е. среду с постоянной магнитной проницаемостью. Но по мере увеличения тока $i_в$ и соответственно потока Ф сталь машины начинает насыщаться, и мы получаем сначала средненасыщенную часть характеристики холостого хода, или так называемое колено кривой, а затем сильно насыщенную ее часть. Точка N, соответствующая номинальному напряжению $U_н$, обычно лежит на колене кривой, так как при работе машины на прямолинейной части кривой напряжение генератора неустойчиво, а при работе на насыщенной части кривой ограничивается возможность регулирования напряжения.

> **Характеристика холостого хода позволяет судить о насыщении магнитной цепи генератора при номинальном режиме работы (о степени насыщения — см. § 2-12).**

Из последующего будет видно, что та или иная степень насыщения оказывает большое влияние на рабочие свойства машины.

Б. Нагрузочные характеристики: $U = f(i_в)$ при $I =$ const и $n =$ $=$ const. Здесь и в дальнейшем мы будем считать, что щетки занимают на коллекторе нормальное рабочее положение. В этом случае при нагрузке генератора током I напряжение на зажимах генератора уменьшается вследствие: а) падения напряжения $IR_{ам} + \Delta U_щ = IR_a$ и б) реакции якоря. Поэтому нагрузочная характеристика проходит ниже характеристики холостого хода и тем ниже, чем больше ток I.

На рис. 8-7 кривые *1* и *2* изображают соответственно характеристики холостого хода и нагрузочную. Если к значениям напряжения нагрузочной характеристики добавить падение напряжения IR_a, то получится внутренняя нагрузочная характеристика $U + IR_a = E_a = f(i_в)$ при $I =$ const и $n =$ const (кривая *3*).

Нагрузочная характеристика, снятая совместно с характеристикой холостого хода, позволяет построить так называемый характе-

ристический треугольник генератора постоянного тока. Этот треугольник дает возможность, с одной стороны, оценить влияние падения напряжения и реакции якоря на напряжение генератора, а с другой стороны, может быть использован для построения внешней и регулировочной характеристик генератора.

Построение характеристического треугольника производится следующим образом.

Проведем через произвольно взятую на оси абсцисс точку D прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с кривыми *2*, *3* и *1* в точках C, B и F. Согласно построению, отрезок $CB = IR_a$. При холостом ходе мы имели бы для того же тока возбуждения $i_в = OD$ напряжение $U_0 = DF$, поэтому полное падение напряжения на зажимах генератора CF при его нагрузке током I больше падения напряжения $CB = IR_a$ на величину отрезка BF, что уже вызвано реакцией якоря. С другой стороны, при холостом ходе э. д. с. $E_a = DB$ получается при токе возбуждения $i_в = OG$, меньшем, чем OD, на величину отрезка $DG = OD - OG$. Отсюда следует, что величина н. с. реакции якоря, выраженная в масштабе тока возбуждения, равна DG. Чтобы построить характеристический треугольник ABC, достаточно провести через точку B прямую $BA = DG$ параллельно оси абсцисс.

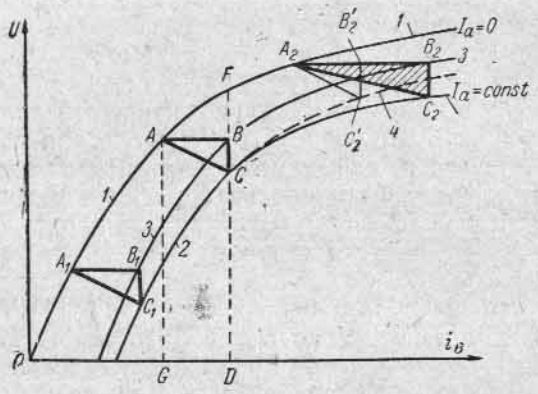


Рис. 8-7. Нагрузочная характеристика независимого возбуждения

При $I = \text{const}$ сторона $BC = IR_{ам} + \Delta U_щ$ остается постоянной по величине независимо от тока возбуждения $i_в$. Но вторая сторона AB, соответствующая н. с. реакции якоря, остается неизменной только в том случае, если мы можем пренебречь влиянием насыщения на величину реакции якоря. В гл. 4 мы видели, что если машина не насыщена, то поперечная реакция якоря практически не влияет на работу машины (см. рис. 4-7, *а*, кривая *3*); поэтому сторона AB треугольника ABC (если пренебречь небольшой величиной н. с. коммутационной реакции якоря) определяется по существу только продольной реакцией якоря. Но по мере увеличения насыщения влияние поперечной реакции якоря начинает сказываться все сильнее, и соответственно этому все более растет сторона AB. Отрезок $B_2'B_2$, представляющий собой разность между отрезком A_2B_2, соответствующим насыщенной магнитной цепи, и отрезком $A_2B_2' = A_1B_1$, соответствующим ненасыщенной магнитной цепи, характеризует, таким образом, н. с. поперечной реакции якоря, оказывающую размагничивающее действие. Если бы машина оставалась ненасыщенной и при больших значениях тока $i_в$, то мы получили бы нагрузочную характеристику, перемещая треугольник ABC параллельно самому себе так, чтобы вершина A все время оставалась на характеристике холостого хода (штриховая линия *4* на рис. 8-7.)

Обычно нагрузочные характеристики снимаются для двух значений нагрузочного тока, например для $I = I_н/2$ и $I = I_н$. Так же как при снятии характеристики холостого хода, ток возбуждения $i_в$ нужно изменять только в одном направлении.

В. Внешняя характеристика: $U = f(I)$ при $R_в = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Внешняя характеристика снимается по схеме рис. 8-5 при замкнутом рубильнике P. Напряжение $U_в$ на зажимах цепи возбуждения предполагается постоянным; следовательно, $i_в = U_в/R_в = \text{const}$.

Согласно ГОСТ 183—66,

> **номинальным изменением напряжения электрического генератора называется изменение напряжения на зажимах генератора (при работе отдельно от других генераторов) при изменении нагрузки от номинальной до нулевой и при сохранении номинальной скорости вращения, для машин с независимым возбуждением, кроме того, при сохранении номинального тока возбуждения, а для машин с самовозбуждением — при обмотке возбуждения, имеющей расчетную рабочую температуру и неизменное сопротивление цепи обмотки возбуждения.**

Изменение напряжения выражается в процентах от номинального напряжения $U_н$.

Условимся выражать напряжение U и нагрузочный ток I в долях от номинальных значений этих величин, приняв, что $U_н = 1$, $I_н = 1$.

Для снятия внешней характеристики приводим генератор во вращение с номинальной скоростью и устанавливаем такой ток возбуждения $i_{в.н}$, чтобы при $I = I_н = 1$ мы имели $U = U_н = 1$ (рис. 8-8). Затем постепенно разгружаем генератор вплоть до холостого хода. Напряжение генератора растет по кривой *1*, так как по мере уменьшения нагрузки уменьшается падение напряжения в якоре IR_a и реакция якоря. При холостом ходе $U_0 = OA$. Следовательно,

$$\Delta U = \frac{OA - OB}{OB} \cdot 100 = \frac{U_0 - U_н}{U_н} \cdot 100\%. \qquad (8\text{-}11)$$

Так как можно считать, что $R_a = \text{const}$, то зависимость $IR_a = f(I)$ выражается на рис. 8-8 прямой *2*. Кривая *3*, представляющая собой зависимость $U + IR_a = E_a = f(I)$, называется внутренней характеристикой генератора.

Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения может быть построена по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику, если предположить, что стороны этого треугольника изменяются пропорционально току I. Из построения характеристических треугольников на рис. 8-7 следует, что их вершины A, A_1, A_2 и т. д. лежат на характеристике холостого хода, а стороны BC, B_1C_1, B_2C_2 проводятся параллельно оси ординат.

Отсюда вытекает способ построения внешней характеристики генератора независимого возбуждения.

Пусть на рис. 8-9 кривая $OA_н A_0$ представляет собой характеристику холостого хода генератора. По-прежнему, примем что $U_н = 1$, $I_н = 1$. Характеристический треугольник $A_н B_н C_н$ для тока $I_н = 1$ строим на диаграмме так, чтобы вершина $A_н$ лежала на характеристике холостого хода, а катеты $A_н B_н$ и $B_н C_н$ были параллельны — первый оси абсцисс, а второй оси ординат. Этим определяется положение точки $C_н$, соответствующей напряжению $U_н = 1$. Продолжив сторону $B_н C_н$ треугольника до пересечения с осью абсцисс в точке $C_к$, находим номинальный ток возбуждения генератора $i_{в.н} = OC_к$, соответствующий номинальному режиму его работы. Продолжив ту же сторону $B_н C_н$ до пересечения с характеристикой холостого хода в точке A_0, найдем напряжение при холостом ходе генератора $U_0 = C_к A_0$, соответствующее току возбуждения $i_в = \text{const}$. Точку $C_н$ сносим в точку $D_н$ влево от оси ординат соответственно току $I_н = 1$, а точку A_0 — в точку D_0 на оси ординат.

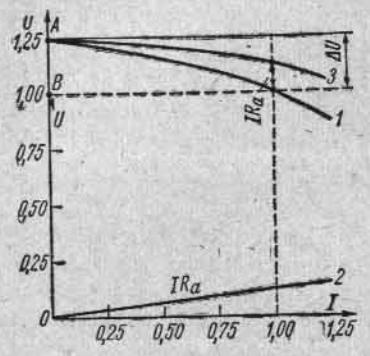


Рис. 8-8. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

Чтобы получить промежуточные точки внешней характеристики, например точку для тока $I = I_н/2$, нужно повторить построение,

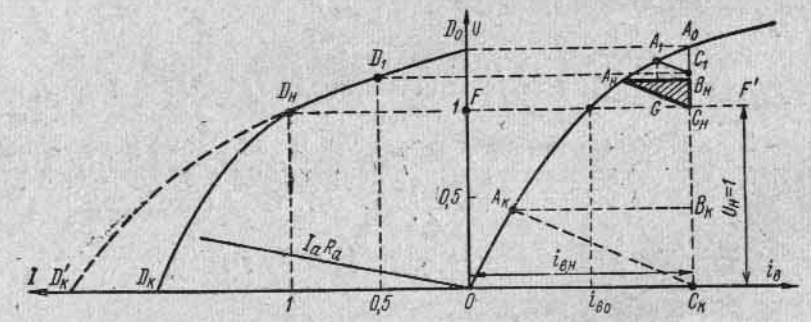


Рис. 8-9. Построение внешней характеристики генератора независимого возбуждения

уменьшив каждую из сторон треугольника $A_н B_н C_н$ в два раза. Но вместо этого можно разделить гипотенузу $A_н C_н$ пополам в точке G и перенести отрезок $C_н G$ вдоль прямой $C_н A_0$ в положение отрезка $C_1 A_1 = A_н C_н/2$. После этого сносим точку C_1 в точку D_1 соответственно току $I = I_н/2$ и по точкам D_0, D_1 и $D_н$ строим внешнюю характеристику.

Этим построением можно пользоваться лишь в определенных пределах тока I, пока еще можно считать, что стороны характеристического треугольника ABC (см. рис. 8-7) изменяются пропорционально току I. При значительном увеличении тока стороны треугольника ABC начинают расти быстрее, чем ток I, о чем подробнее см. ниже, в п. Д.

Г. Регулировочная характеристика: $i_в = f(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

Так как при $i_в = \text{const}$ напряжение U на зажимах генератора понижается при увеличении тока I и наоборот (см. рис. 8-8), то для поддержания напряжения U постоянным по величине нужно увеличивать ток возбуждения при увеличении нагрузки и уменьшать его при уменьшении последней. В первом случае мы идем по восходящей ветви кривой намагничивания (см. рис. 8-6), во втором — по нисходящей. Соответственно этому регулировочная кривая имеет вид, показанный на рис. 8-10. Средняя кривая, проведенная штриховой линией между восходящей и нисходящей ветвями, считается практической регулировочной характеристикой.

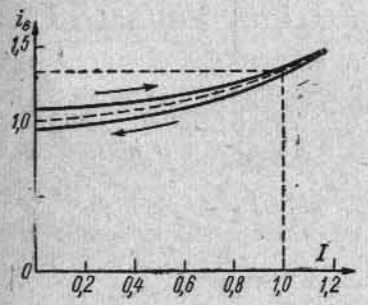


Рис. 8-10. Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

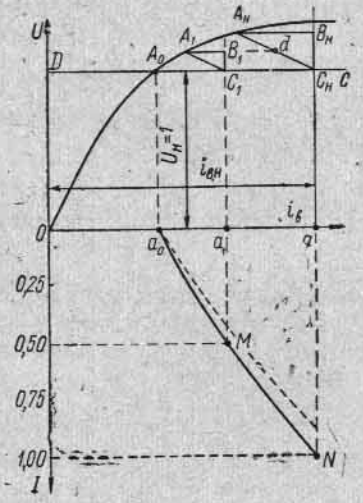


Рис. 8-11. Построение регулировочной характеристики генератора независимого возбуждения

Регулировочную характеристику, так же как и внешнюю, можно построить по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику. Для этого на рис. 8-11 проводим линию DC параллельно оси абсцисс на расстоянии $OD = U_н = 1$ от последней. Построив характеристический треугольник $A_н B_н C_н$ для какого-нибудь, например номинального, тока $I_н$, мы должны расположить этот треугольник так, чтобы вершина $A_н$ лежала на характеристике холостого хода, а вершина $C_н$ — на прямой DC; этим определяется необходимый для создания напряжения $U_н$ ток возбуждения $i_{в.н} = Oa$. Снося точку a вниз от оси абсцисс соответственно току $I_н$, получим точку N регулировочной характеристики для номинальной нагрузки.

Так же строятся и другие точки регулировочной характеристики, например точка M для $I = I_н/2$, при условии, что все стороны харак-

теристического треугольника изменяются пропорционально току I. Для холостого хода имеем $i_{в0} = Oa_0$ и строим регулировочную характеристику по точкам H, M и a_0.

В действительных условиях работы машины реакция якоря растет быстрее, чем ток I, и чтобы поддержать напряжение $U = \text{const}$, необходим больший ток $i_в$. Поэтому действительная регулировочная характеристика проходит несколько выше построенной, как это показано штриховой линией на рис. 8-11.

Д. Характеристика короткого замыкания: $I_к = f(i_в)$ при $U = 0$ и $n = \text{const}$. Чтобы снять эту характеристику, генератор приводим во вращение с номинальной скоростью и замыкаем его якорную цепь только через амперметр. В этом случае можно пренебречь сопротивлением внешней цепи генератора и считать, что $U = 0$. Тогда из уравнения э. д. с. генератора [см. формулу (8-3б)] имеем:

$$E_a = I_a R_{ам} + \Delta U_щ = I_к R_a, \quad (8\text{-}12)$$

т. е. при коротком замыкании генератора его э. д. с. E_a равна только падению напряжения в цепи якоря и щеточном контакте.

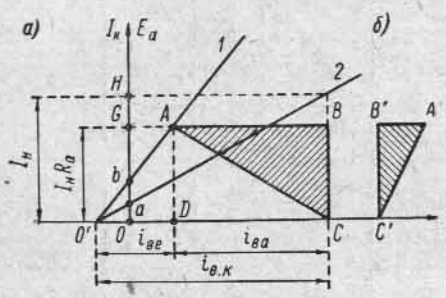


Рис. 8-12. Построение характеристического треугольника

При $I_к \approx I_н$ э. д. с. E_a обычно не превышает нескольких процентов от номинального напряжения. В этих условиях можно считать, что магнитная цепь генератора является ненасыщенной и что характеристика холостого хода на этом участке представляет собой прямую линию (прямая *1* на рис. 8-12, *а*). Если бы можно было пренебречь изменением сопротивления щеточного контакта и считать, что $R_a = \text{const}$, то характеристика короткого замыкания тоже была бы прямой линией. В действительности она несколько отступает от прямой, но при $I_к \leqslant (1{,}1 \div 1{,}2)\, I_н$ в большинстве случаев этим отступлением можно пренебречь.

Так как в машине имеется остаточный магнитный поток, то при $i_в = 0$ в цепи якоря появляется ток короткого замыкания $I_{к0} = Oa$ соответственно э. д. с. $E_a = Ob$. Затем возбуждаем генератор так, чтобы направление поля возбуждения совпало с направлением поля остаточного магнетизма. Обычно доводим ток короткого замыкания до значений $I_к = (1 \div 1{,}25)\, I_н$ и по полученным данным строим характеристику короткого замыкания (прямая *2* на рис. 8-12, *а*).

Начальная ветвь характеристики холостого хода и характеристика короткого замыкания дают возможность построить характеристический треугольник для какого-нибудь, например номинального, тока $I_н$. Для этого мы продолжаем прямые *1* и *2* до пересечения с осью абсцисс в точке O', которую мы принимаем за новое начало координатной системы. Отложим по оси ординат в масштабе для тока $I_к$ отрезок $OH = I_н$ и определим по характеристике короткого замыкания отрезок $O'C = i_{в.к}$, представляющий собой полную н. с. короткого замыкания при $I_к = I_н$, выраженную в масштабе тока возбуждения $i_в$. Эта н. с. должна быть достаточна, чтобы а) скомпенсировать реакцию якоря и б) создать э. д. с. $E_a = I_н R_a$. Считая, что R_a известно, откладываем на оси ординат отрезок $OG = E_a = I_н R_a$ и определяем по характеристике холостого хода ток возбуждения $i_{вe} = O'D$, необходимый для создания э. д. с. E_a; тогда отрезок $DC = O'C - O'D = i_{в.к} - i_{вe} = i_{вa}$ представляет собой н. с. возбуждения, компенсирующую реакцию якоря при токе $I_к = I_н$. Треугольник ABC со сторонами $BC = I_н R_a$ и $AB = i_{вa}$ является характеристическим треугольником генератора при заданном токе короткого замыкания.

Так как при коротком замыкании магнитная цепь генератора практически не насыщена, то можно считать, что поперечная реакция якоря не вызывает размагничивающего эффекта и при прямолинейной коммутации, когда отсутствует коммутационная реакция якоря, катет AB соответствует только н. с. продольной реакции якоря, которая возникает в генераторе при сдвиге щеток с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря (см. § 4-4). При положении щеток на геометрической нейтрали продольной реакции якоря нет, и, следовательно, катет $AB \approx 0$. Если же щетки сдвинуты с геометрической нейтрали против направления вращения якоря генератора, то продольная реакция якоря оказывает уже намагничивающее действие и катет $B'A'$ располагается вправо от катета $B'C' = BC$ (рис. 8-12, *б*).

Следует заметить, что если при снятии характеристики короткого замыкания ток $I_к \geqslant I_н$, то в генераторах постоянного тока большой мощности с ускоренной коммутацией часто наблюдается явление самовозбуждения машины, объясняемое намагничивающим действием коммутационной реакции якоря; это может привести к значительному увеличению тока $I_к$ и сильному искрению на коллекторе. Для предотвращения этого явления прибегают чаще всего к устройству временной небольшой обмотки последовательного возбуждения, действующей встречно относительно основной н. с. генератора.

При $I_к > I_н$ стороны характеристического треугольника ABC начинают расти не пропорционально току $I_к$, а быстрее. Сторона AB растет в результате: а) значительного насыщения зубцовой зоны под сбегающим краем полюса, вследствие чего размагничивающее действие н. с. поперечной реакции якоря резко возрастает, и б) коммутационной реакции якоря, действие которой объясняется тем, что при больших токах $I_к$ добавочные полюсы насыщаются, и коммутация приобретает замедленный характер; в этом случае коммутационная реакция якоря действует размагничивающим образом в отношении основного поля (см. § 5-12), т. е. в том же направлении, что и поперечная реакция якоря.

Сторона $BC = I_к R_{ам} + \Delta U_щ$ характеристического треугольника начинает расти быстрее, чем ток $I_к$, вследствие того, что при расстройстве коммутации и появлении искрения на коллекторе рост падения напряжения в щеточном контакте $\Delta U_щ$ может опережать рост тока $I_к$.

Из сказанного следует, что действительный ток короткого замыкания $I_к$, изображенный на рис. 8-9 отрезком $OD_к$, должен быть меньше,

чем ток $I_к$, изображенный на том же рисунке отрезком $OD'_к$, построенным в предположении, что стороны характеристического треугольника изменяются пропорционально току $I_к$.

8-9. Характеристики генератора параллельного возбуждения

Генератор параллельного возбуждения является весьма распространенным типом генератора постоянного тока, так как не требует особого источника тока для возбуждения и дает в пределах нормальной нагрузки устойчивое напряжение.

А. Условия самовозбуждения. Генератор параллельного возбуждения работает по схеме рис. 8-13 с самовозбуждением и не нуждается для своего возбуждения в постороннем источнике постоянного тока. Для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы в нем был небольшой (2—3% от нормального) поток остаточного намагничивания $Ф_{ос}$. Если, замкнув цепь возбуждения, мы приведем генератор во вращение с некоторой, например номинальной, скоростью, то на его зажимах появится небольшое напряжение $U_{ос}$, равное примерно 2—3% от $U_н$, и по цепи возбуждения будет протекать небольшой ток, который создаст добавочный поток намагничивания $Ф_0$. В зависимости от направления тока в обмотке возбуждения поток $Ф_0$ может быть направлен либо встречно относительно потока $Ф_{ос}$, либо согласно с ним. Генератор может самовозбудиться только при согласном направлении обоих потоков, другими словами, *процесс самовозбуждения генератора может идти только в одну сторону*, определяемую направлением потока $Ф_{ос}$.

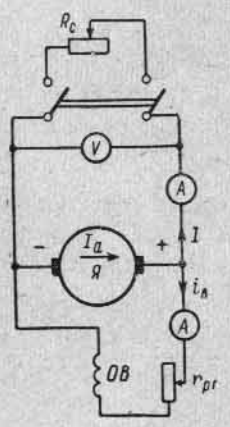


Рис. 8-13. Схема генератора параллельного возбуждения

При согласном направлении обоих потоков результирующий поток возбуждения увеличивается, это приводит к увеличению индуктируемой в якоре э. д. с. и, в свою очередь, вызывает дальнейшее увеличение тока и потока возбуждения, и т. д.

Выясним предел, до которого идет процесс самовозбуждения. При этом будем считать, что генератор работает вхолостую, т. е. $I = 0$.

При самовозбуждении уравнение э. д. с. в цепи возбуждения может быть написано следующим образом:

$$u_0 = i_в R_в + \frac{d(L_в i_в)}{dt} \qquad (8\text{-}13а)$$

или

$$u_0 - i_в R_в = \frac{d(L_в i_в)}{dt}. \qquad (8\text{-}13б)$$

Здесь u_0 — переменное напряжение на зажимах генератора и, следовательно, на зажимах цепи возбуждения; $R_в$ — сопротивление этой цепи и $L_в$ — ее индуктивность.

Если $R_в = \text{const}$, то падение напряжения $i_в R_в$ изменяется прямо пропорционально току $i_в$. Графически оно выражается прямой *1* на рис. 8-14, идущей под углом α к оси абсцисс, причем

$$\operatorname{tg}\alpha \sim i_в R_в / i_в = R_в. \qquad (8\text{-}14)$$

Следовательно, каждому значению $R_в$ соответствует особая прямая, выходящая из начала координат под углом, определяемым формулой (8-14).

На том же рис. 8-14 кривая *2* представляет собой характеристику холостого хода. Отрезки ординат между кривыми *2* и *1* дают разность $u_0 - i_в R_в = \frac{d(L_в i_в)}{dt}$ и служат мерой интенсивности происходящего

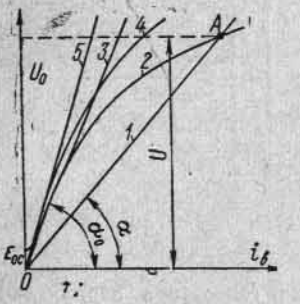


Рис. 8-14. Условия самовозбуждения генератора параллельного возбуждения

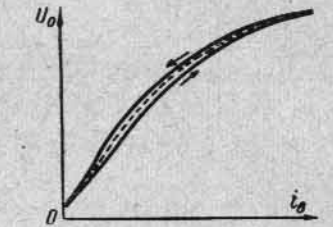


Рис. 8-15. Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения

процесса самовозбуждения. Очевидно, что этот процесс окончится тогда, когда разность $u_0 - i_в R_в$ станет равна нулю, другими словами, когда характеристики *1* и *2* пересекутся. Таким образом, установившееся значение тока $i_в$ определяется точкой пересечения *A* характеристик *1* и *2*.

Если мы будем увеличивать сопротивление $R_в$, т. е. угол α, то точка *A* будет скользить по характеристике холостого хода в направлении к точке *O*. При некотором сопротивлении $R_{в.кр}$, которое называется критическим сопротивлением, прямая *1* будет касательной к начальной части характеристики холостого хода (прямая *3* на рис. 8-14). В этих условиях генератор практически не возбуждается.

Так как при заданных масштабах напряжения U_0 и тока $i_в$ наклон характеристики холостого хода зависит от скорости вращения якоря, то очевидно, что каждой скорости соответствует свое критическое сопротивление $R_{в.кр}$. Так, например, для характеристики холостого хода *4*, соответствующей большей скорости вращения, критическое сопротивление определяется прямой *5* и $R'_{в.кр} > R_{в.кр}$.

Б. Характеристика холостого хода: $U_0 = f(i_в)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$. Так как генератор параллельного возбуждения самовозбуж-

дается только в одном направлении, то и характеристика холостого хода этого генератора может быть снята тоже только в одном направлении (рис. 8-15). Между характеристиками холостого хода генераторов независимого и параллельного возбуждения по существу нет разницы, так как протекающий во втором случае по якорю ток $I_a = i_в$ не превышает 1—3% от номинального тока генератора и поэтому не может вызвать заметного изменения напряжения на его зажимах.

В. Нагрузочные характеристики: $U = f(i_в)$ при $I = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Нагрузочные характеристики, снятые как по схеме независимого, так и по схеме параллельного возбуждения, являются практически совпадающими, так как увеличение тока I_a на величину тока

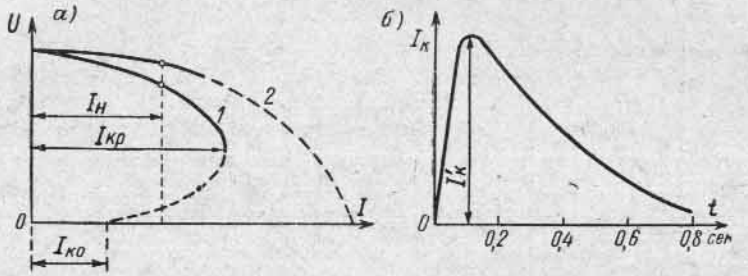


Рис. 8-16. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (*а*) и кривая изменения тока внезапного короткого замыкания (*б*)

возбуждения во втором случае по сравнению с первым не может оказать сколько-нибудь заметного влияния на напряжение генератора.

Г. Внешняя характеристика: $U = f(I)$ при $R_в = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения, так же как генератора независимого возбуждения, должна выявить влияние изменения нагрузки на напряжение генератора без какого-либо регулирования тока возбуждения посредством регулировочного реостата, т. е. при $r_в + r_{рг} = R_в = \text{const}$. Поэтому при независимом возбуждении $i_в = U_в/R_в = \text{const}$, а при параллельном возбуждении $i_в = U_в/R_в = U/R_в \sim U$. При изменении, например при увеличении, нагрузки напряжение на зажимах генератора независимого возбуждения уменьшается под действием двух причин — реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря IR_a. В генераторе параллельного возбуждения к этим двум причинам присоединяется третья — уменьшение тока возбуждения $i_в$ пропорционально напряжению U, что вызывает дополнительное по сравнению с генератором независимого возбуждения падение напряжения (кривые *1* и *2* на рис. 8-16, *а*).

Той же третьей причиной объясняется разница между внешними характеристиками генераторов независимого и параллельного возбуждения. Если мы будем постепенно уменьшать сопротивление внешней цепи (сети) $R_с$, то при независимом возбуждении ток I будет непрерывно расти и достигнет своего наибольшего значения при $R_с = 0$,

т. е. при коротком замыкании генератора. При параллельном возбуждении ток I будет увеличиваться только до некоторого критического значения $I_{кр}$, обычно не превышающего номинальный ток больше чем в 2 — 2,5 раза, а затем начнет уменьшаться (штриховая часть кривой *1* на рис. 8-16, *а*). Это объясняется следующим образом. При уменьшении сопротивления $R_с$ ток I стремится расти, но указанные выше три причины, вызывающие падение напряжения на зажимах генератора, действуют в противоположном направлении. Пока машина насыщена достаточно сильно и, следовательно, ее магнитная система достаточно устойчива, преобладает действие первого фактора, и ток растет. Но затем машина переходит во все более ненасыщенное состояние (прямолинейная часть характеристики холостого хода), и преобладающее значение получают факторы, вызывающие падение напряжения. Ток $I_к$, достигнув значения $I_{кр}$, начинает уменьшаться и при коротком замыкании достигает значения $I_{к0}$, определяемого только потоком остаточного намагничивания, так как в этом режиме $U = 0$ и $i_в = 0$.

Внешняя характеристика на рис. 8-16, *а* получается при медленном изменении токов и напряжения. Но в эксплуатационных условиях возможно так называемое внезапное короткое замыкание. Так как машина обладает известным запасом электромагнитной энергии, то уменьшение ее магнитного потока и соответствующей ему э. д. с. происходит с задержкой во времени. Поэтому ток внезапного короткого замыкания успевает достигнуть за время 0,1 — 0,2 *сек* значения, в 8—12 раз превосходящего номинальное значение тока, после чего он сравнительно быстро спадает (рис. 8-16, *б*). При таком резком изменении тока на валу генератора возникает значительный тормозящий момент, а на коллекторе появляется сильное искрение, которое может перейти в круговой огонь. Таким образом, внезапное короткое замыкание генераторов параллельного возбуждения, особенно большой мощности, является опасным, и поэтому их нужно защитить с помощью быстродействующих выключателей. Подробнее о внезапном коротком замыкании генераторов постоянного тока — см. в книге М. П. Костенко «Электрические машины. Специальная часть», гл. 28.

Построение внешней характеристики генератора параллельного возбуждения производится так же, как и для генератора независимого возбуждения, но при условии, что в генераторе параллельного возбуждения ток $i_в$ изменяется пропорционально U; соответственно этому зависимость $i_в = f(U)$ на рис. 8-17 изображается прямой OA_0, проведенной из начала координат под углом α к оси абсцисс, причем $\operatorname{tg}\alpha \sim R_в$ [см. формулу (8-14)]. Характеристический треугольник $A_нB_нC_н$ помещается между характеристикой холостого хода и прямой OA_0.

Слева от оси ординат на рис. 8-17 произведено построение внешней характеристики по точкам для $I = 0$, $I = I_в/2$ и $I = I_н$ в предположении, что стороны характеристического треугольника изменяются пропорционально току I. Чтобы получить критический ток $I_{кр}$, нужно провести к характеристике холостого хода касательную MN парал-

лельно прямой OA_0 и в точке касания $A_{кр}$ провести прямую $A_{кр}C_{кр}$ параллельно гипотенузе $A_нC_н$ характеристического треугольника для тока $I = I_н$. Тогда

$$I_{кр} = I_н \frac{A_{кр}C_{кр}}{A_нC_н}.$$

Но если ток $I_{кр}$ значительно превышает номинальный ток, то возникают явления, о которых мы говорили выше в § 8-8, п. Д и которые стремятся ограничить ток $I_{кр}$.

Номинальное изменение напряжения определяется, как выше в § 8-8, п. В, и рассчитывается по формуле (8-11).

Д. Регулировочная характеристика: $i_в = f(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Если для какого-нибудь генератора мы снимем регулировочную характеристику сначала при независимом возбуждении, а затем в тех же условиях при параллельном возбуждении, то между обеими кривыми не будет никакой разницы, что непосредственно следует из построения на рис. 8-11.

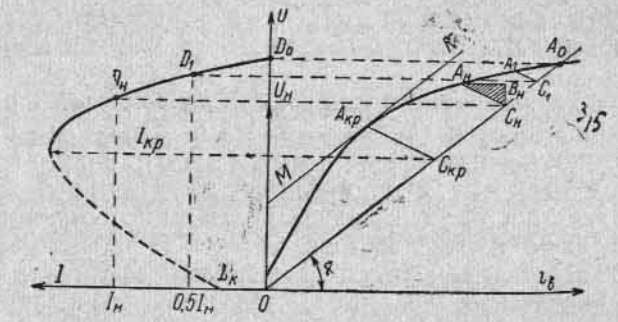


Рис. 8-17. Построение внешней характеристики генератора параллельного возбуждения

Е. Характеристика короткого замыкания: $I_к = f(i_в)$ при $U = 0$ и $n = \text{const}$. При самовозбуждении характеристику короткого замыкания нельзя снять, так как в этом случае напряжение U и, следовательно, ток возбуждения $i_в$ равны нулю.

8-10. Генератор последовательного возбуждения

В генераторе последовательного возбуждения $I_в = I_a = I$ (рис. 8-18). Следовательно, характеристику холостого хода генератора, его нагрузочные характеристики, а равно и характеристику короткого замыкания можно снять только по схеме независимого возбуждения (см. рис. 8-5). Эти характеристики имеют вид, обычный для генераторов независимого возбуждения (см. § 8-8). По характеристикам холостого хода и короткого замыкания можно построить характеристический треугольник по способу, изложенному выше в § 8-8, п. Д, и использовать его для дальнейших построений.

Так как в генераторе последовательного возбуждения, работающем при постоянной скорости вращения, остаются только две переменные величины, а именно U и I, то этот генератор имеет по существу одну характеристику, а именно внешнюю $U = f(I)$ при $n = \text{const}$.

На рис. 8-19 кривая *1* представляет собой характеристику холостого хода, кривая *2* — внешнюю характеристику генератора последовательного возбуждения, кривая *3* — падение напряжения $IR_a = f(I)$ и кривая *4* — внутреннюю характеристику генератора $E_a = U + IR_a = f(I)$. Разница между кривыми *1* и *4* объясняется реакцией якоря. Для номинального тока $I_н = 1$ треугольник $A_нB_нC_н$ является характеристическим треугольником генератора. Перемещая его параллельно самому себе так, чтобы точка A все время оставалась на характеристике холостого хода, и изменяя стороны

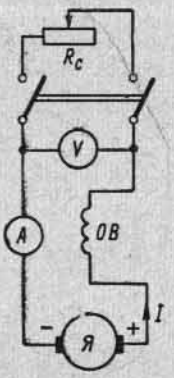


Рис. 8-18. Схема генератора последовательного возбуждения

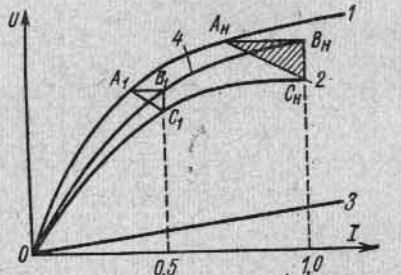


Рис. 8-19. Построение внешней характеристики генератора последовательного возбуждения

треугольника пропорционально току I, можно построить внешнюю характеристику генератора последовательного возбуждения.

Так как напряжение U генератора последовательного возбуждения резко изменяется с изменением нагрузки, то в обычной практике эти генераторы не применяются.

8-11. Генератор смешанного возбуждения

Так как генератор смешанного возбуждения имеет параллельную и последовательную обмотки возбуждения, то он совмещает в себе свойства генераторов обоих типов. Схема генератора смешанного возбуждения может быть выполнена с коротким шунтом, как это показано сплошной линией на рис. 8-20, или с длинным шунтом, как это показано на той же схеме штриховой линией. Разницы между обеими схемами практически нет, так как сопротивление последовательной обмотки и соответственно падение напряжения на ее зажимах весьма невелики.

Обычно обмотки возбуждения включаются согласно, т. е. так, что их н. с. складываются. Встречное включение этих обмоток приме-

няется в специальных схемах, например в некоторых типах сварочных генераторов. При согласном включении обмоток возбуждения главную роль играет параллельная обмотка, тогда как последовательная имеет целью компенсировать н. с. реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря при определенной нагрузке. Этим достигается автоматическое регулирование напряжения генератора в определенных пределах нагрузочного тока.

Зная характеристики генераторов параллельного и последовательного возбуждения, легко объяснить характеристики генератора смешанного возбуждения. Так, например, характеристика холостого

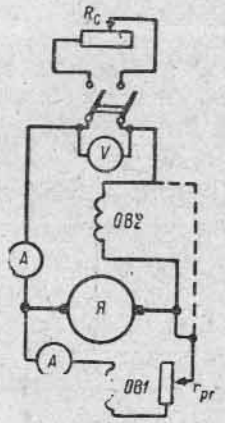


Рис. 8-20. Схема генератора смешанного возбуждения

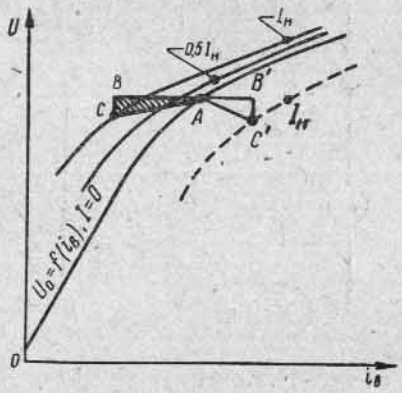


Рис. 8-21. Построение нагрузочной характеристики генератора смешанного возбуждения

хода генератора смешанного возбуждения $U_0 = f(i_в)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$ ничем не отличается от соответствующей характеристики генератора параллельного возбуждения, так как в этом случае ток последовательной обмотки возбуждения равен нулю.

Нагрузочные характеристики генератора смешанного возбуждения $U = f(i_в)$ при $I = \text{const}$ и $n = \text{const}$ имеют тот же вид, что и соответствующие характеристики генератора параллельного возбуждения, но при достаточно сильной последовательной обмотке они могут расположиться выше характеристики холостого хода (рис. 8-21). Подобный характер нагрузочной характеристики генератора смешанного возбуждения виден из ее построения по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику ABC. Так как последовательная обмотка производит намагничивание, пропорциональное току якоря, то катет AB соответствует алгебраической сумме н. с. последовательной обмотки и н. с. реакции якоря ($F_{AB} = F_{пс} \pm F_{ра}$) в масштабе тока возбуждения. Если н. с. реакции якоря $F_{ра}$ имеет размагничивающий характер (отрезок AB' на рис. 8-21), но н. с. последовательной обмотки $F_{пс}$ (отрезок BB') больше $F_{ра}$, то катет AB характе-

ристического треугольника располагается вправо от катета $BC = I_н R_а$ (см. рис. 8-12, *б*). Если мы будем перемещать треугольник ABC параллельно самому себе так, чтобы его вершина A скользила по характеристике холостого хода, то вершина C должна описать нагрузочную характеристику таким же образом, как и для генератора независимого возбуждения.

Изменяя стороны треугольника ABC пропорционально току I, можем построить ряд нагрузочных характеристик, например, для $I = I_н$ и $0{,}51\ I_н$.

Пользуясь характеристикой холостого хода и характеристическим треугольником, можно построить также внешнюю характеристику генератора смешанного возбуждения $U = f(I)$ при $r_в + r_{рг} = R_в =$

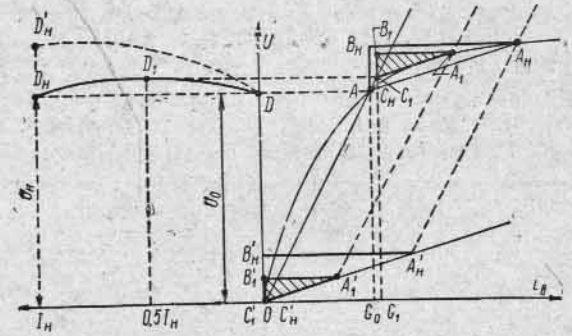


Рис. 8-22. Построение внешней характеристики генератора смешанного возбуждения

$= \text{const}$ и $n = \text{const}$. Построение этой характеристики принципиально ничем не отличается от построения внешней характеристики генератора параллельного возбуждения на рис. 8-17.

Пусть, например, $I = 0{,}5\ I_н$. Проводим из начала координатной системы прямую OA, выражающую зависимость $i_в = U/R_в \sim U$ для заданного значения $r_в + r_{рг} = R_в$ (рис. 8-22). Характеристический треугольник $A'_1B'_1C'_1$, соответствующий току $I = 0{,}5\ I_н$, располагаем в начале координатной системы и перемещаем его параллельно самому себе вдоль прямой OA до тех пор, пока он не займет положения треугольника $A_1B_1C_1$ с вершинами A_1 на характеристике холостого хода и C_1 на прямой OA (заштрихованная площадка на рис. 8-22). Тогда ордината G_1C_1 определяет напряжение на зажимах генератора при нагрузочном токе $I = 0{,}5\ I_н$. Таким же образом производим построение для тока $I = I_н$ (треугольники $A'_нB'_нC'_н$ и $A_нB_нC_н$).

Можно рассчитать последовательную обмотку так, чтобы точка $C_н$ треугольника $A_нB_нC_н$ совпала с точкой A, т. е. чтобы напряжение при номинальной нагрузке $I_н$ было равно напряжению при холостом ходе U_0. Снеся точки A, C_1, $C_н$ (последняя совпадает с точкой A) в точки D, D_1, $D_н$ соответственно токам $I = 0$; $0{,}5\ I_н$; $I_н$, . . . налево от оси ординат и соединив точки D, D_1, $D_н$, . . . плавной кривой, по-

лучим искомую внешнюю характеристику генератора смешанного возбуждения.

Чтобы иметь возможность поддерживать постоянное напряжение на зажимах приемников электроэнергии, нужно скомпенсировать падение напряжения в линии. В этом случае усиливают последовательную обмотку возбуждения так, чтобы внешняя характеристика имела вид кривой $DD'_н$, изображенной штриховой линией на рис. 8-22.

При встречном включении обмоток возбуждения построение внешней характеристики генератора смешанного возбуждения производится так же, как для генератора параллельного возбуждения.

Генераторы с согласным включением обмоток возбуждения применяются в тех случаях, когда нужно автоматически поддерживать напряжение на зажимах генератора, в особенности при резких изменениях режима нагрузочного тока. Встречное включение обмоток возбуждения применяется в некоторых типах сварочных генераторов, где, наоборот, требуется крутой спад внешней характеристики.

Обычно генераторы смешанного возбуждения насыщены слабо, так как только в этом случае поток, создаваемый последовательной обмоткой возбуждения, почти пропорционален току в этой обмотке.

В этих условиях последовательная обмотка возбуждения наиболее эффективна.

Глава девятая

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

9-1. Общие соображения

На станциях и преобразовательных подстанциях постоянного тока обычно устанавливают несколько агрегатов постоянного тока с тем, чтобы иметь необходимый резерв и при переменном графике нагрузки обеспечить работу агрегатов в наивыгоднейших для них условиях.

При совместной работе генераторов возможны два способа их соединения:

1) последовательное, когда соединяются между собой точки разноименных потенциалов, например «плюс» одного генератора с «минусом» другого;

2) параллельное, когда соединяются между собой точки одноименных потенциалов.

Здесь мы рассмотрим только параллельную работу генераторов, так как последовательное соединение встречается сравнительно редко, главным образом в установках повышенного напряжения, например на тяговых подстанциях электрических железных дорог с электромашинными преобразователями энергии.

9-2. Параллельная работа генераторов параллельного возбуждения

А. Включение на параллельную работу. Предположим, что один из генераторов на рис. 9-1, например генератор *I*, уже работает под некоторой нагрузкой, создавая на шинах напряжение U.

Чтобы приключить к тем же шинам генератор *II*, нужно соблюсти два условия, а именно:

1) зажимы «плюс» и «минус» включаемого генератора должны быть соединены с одноименными зажимами сборных шин;

2) э. д. с. включаемого генератора должна быть практически равна напряжению U.

Чтобы выполнить эти условия, поступают следующим образом. Генератор *II* приводят во вращение с требуемой скоростью и, не возбуждая его, замыкают один из его рубильников, например левый. Если к оставшемуся разомкнутым правому рубильнику приключить вольтметр, то он измерит напряжение U (влиянием остаточного намагничивания генератора *II* пренебрегаем).

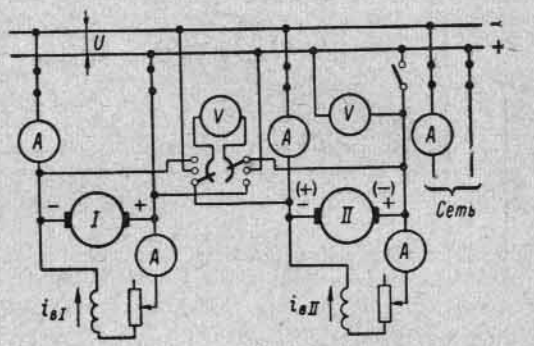


Рис. 9-1. Схема параллельной работы генераторов параллельного возбуждения

Теперь начнем возбуждать генератор *II*. Если его полярность не совпадает с полярностью шин, то оба генератора соединены последовательно (знаки «плюс» и «минус» для этого случая поставлены на схеме в скобках и вольтметр измерит сумму $U + E_{aII}$. В этом случае включать генератор на шины, конечно, нельзя, так как это соответствовало бы короткому замыканию обеих машин.

Наоборот, если полярность включаемого генератора совпадает с полярностью шин, то вольтметр начнет уменьшать свои показания, измеряя разность $U - E_{aII}$. Когда эта разность станет равна нулю, то можно включить правый рубильник и тем самым включить генератор *II* на шины.

Если э. д. с. E_{aII} генератора *II* точно равна напряжению сети U, то из основного уравнения э. д. с. генератора [см. формулу (8-4)] следует, что ток генератора *II*

$$I_{II} = \frac{E_{aII} - U}{R_{aII}} = 0.$$

Чтобы нагрузить генератор *II*, нужно увеличить подводимую к нему от первичного двигателя механическую мощность. Этого можно достигнуть, либо непосредственно воздействуя на регулятор скорости первичного двигателя генератора и этим увеличивая его скорость вращения, либо увеличивая ток возбуждения $i_{вII}$ генератора *II*. В последнем случае процесс идет следующим образом: при увеличении тока $i_{вII}$ соответственно увеличивается э. д. с. E_{aII}, и в генераторе *II* появляется ток I_{II}; при данном положении регулятора первичного

двигателя скорость вращения агрегата начинает уменьшаться, но тогда регулятор приходит в действие и восстанавливает прежнюю скорость вращения при увеличенной мощности агрегата *II*.

Б. Параллельная работа генераторов в режиме внешней характеристики. Будем для простоты считать, что мощности генераторов *I* и *II* равны, т. е. $P_I = P_{II}$, и что их первичные двигатели обладают одинаковыми скоростями вращения $n = \text{const}$.

Пусть на рис. 9-2 кривые *1* и *2* представляют собой внешние характеристики генераторов *I* и *II*, работающих независимо друг от друга при одном и том же напряжении холостого хода U_0, а кривая *3* — суммарную внешнюю характеристику $U = f(I_c) = f(I_I + I_{II})$, где $I_c = I_I + I_{II}$ — ток, отдаваемый генераторами в сеть. Если генераторы работают параллельно, то при увеличении нагрузки напряжения обоих генераторов должны уменьшаться на одну и ту же величину

$$\Delta U = U_0 - U = OF - OD = OF - aA.$$

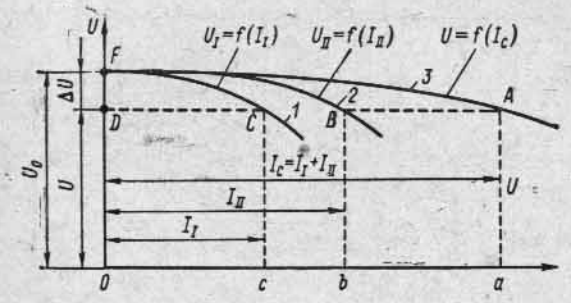


Рис. 9-2. Распределение нагрузки между генераторами параллельного возбуждения

Чтобы определить токи I_I и I_{II} каждого генератора, достаточно провести из точки *A* прямую параллельно оси абсцисс до пересечения с кривыми *1* и *2* в точках *B* и *C*; тогда $I_I = DC = Oc$ и $I_{II} = DB = Ob$. Мы видим, что токи I_I и I_{II} не равны, причем $I_{II} > I_I$.

Этот вывод носит общий характер, т. е. *генератор* с более пологой (жесткой) внешней характеристикой и, следовательно, *с меньшим падением напряжения при нагрузке берет на себя больший нагрузочный ток, чем генератор с более наклонной внешней характеристикой.*

Таким образом, для равномерного распределения нагрузки между генераторами равной мощности, работающими без регулирования напряжения, необходимо, чтобы внешние характеристики этих генераторов были одинаковы. Если генераторы разной мощности, то для распределения в них токов при изменении нагрузки, пропорционального их номинальным мощностям, нужно, чтобы совпадали их относительные внешние характеристики $U = f(I/I_н)$.

В. Распределение и перевод нагрузки. Из основного уравнения э. д. с. генератора постоянного тока имеем:

$$E_{aI} - I_I R_{aI} = E_{aII} - I_{II} R_{aII} = U.$$

Если R_c — сопротивление внешней цепи, то

$$U = (I_I + I_{II}) R_c.$$

Решая эти уравнения относительно токов I_I и I_{II}, получаем:

$$I_I = \frac{E_{aI}(R_c + R_{aII}) - E_{aII} R_c}{R_c(R_{aI} + R_{aII}) + R_{aI} R_{aII}}; \qquad (9\text{-}1)$$

$$I_{II} = \frac{E_{aII}(R_c + R_{aI}) - E_{aI} R_c}{R_c(R_{aI} + R_{aII}) + R_{aI} R_{aII}}. \qquad (9\text{-}2)$$

Следовательно,

$$U = \frac{R_c(E_{aI} R_{aII} + E_{aII} R_{aI})}{R_c(R_{aI} + R_{aII}) + R_{aI} R_{aII}}. \qquad (9\text{-}3)$$

Из формул (9-1), (9-2) и (9-3) следует, что при заданных сопротивлениях R_{aI}, R_{aII} и R_c распределение нагрузочных токов между генераторами зависит от э. д. с. E_{aI} и E_{aII}, т. е. от скоростей вращения n_I и n_{II} и результирующих потоков Φ_I и Φ_{II} ($E = C_e n \Phi$) генераторов.

Из этих формул видно, что если мы изменим возбуждение только какого-нибудь одного генератора, то при этом изменятся токи I_I, I_{II} и напряжение *U*. Если же мы хотим производить перераспределение нагрузки между генераторами при $U = \text{const}$, то для этого нужно одновременно изменять скорости вращения или возбуждения обоих генераторов в противоположном направлении, так чтобы сумма $E_{aI} R_{aII} + E_{aII} R_{aI}$ в числителе формулы (9-3) оставалась без изменения.

Если мы хотим отключить один из генераторов, при $U = \text{const}$, например генератор *I*, то мы должны уменьшать его возбуждение и одновременно увеличивать возбуждение генератора *II* до тех пор, пока ток I_I не станет равным нулю. При дальнейшем уменьшении возбуждения генератора *I* разность $E_{aI} - U$ становится отрицательной и ток $I_I = \frac{E_{aI} - U}{R_{aI}}$ изменяет свое направление относительно э. д. с. E_{aI}. Физически это означает, что машина *I* начинает работать в режиме электродвигателя.

В этом случае на одном валу находятся два двигателя — первичный двигатель и электродвигатель (в дальнейшем называемый двигателем), что может вызвать аварию агрегата. Поэтому в схемах генераторов предусматриваются минимальные автоматы, выключающие генератор, как только его ток станет меньше определенного значения или изменит свой знак.

9-3. Параллельная работа генераторов смешанного возбуждения

Принципиальная схема генераторов смешанного возбуждения при параллельной работе показана на рис. 9-3. Ее отличительная особенность состоит в том, что точки *1* и *2*, в которых последовательные обмотки приключены к одноименным зажимам якоря, соединены между собой уравнительным проводом.

Необходимость такого провода объясняется следующим образом. Предположим, что скорость вращения одного из генераторов, например генератора I, возросла на некоторую незначительную величину, в соответствии с чем повысилась э. д. с. E_{aI} этого генератора. Будем считать, что параллельная обмотка возбуждения генератора I создает поток Φ_1, а последовательная — поток Φ_2, причем $\Phi_2 = C_2 I_I$. В этом случае

$$I_I = \frac{E_{aI} - U}{R_{aI}} = \frac{C_e n (\Phi_1 + \Phi_2) - U}{R_{aI}} = \frac{C_e n (\Phi_1 + C_2 I_I) - U}{R_{aI}},$$

откуда

$$I_I = \frac{C_e n \Phi_1 - U}{R_{aI} - C_e C_2 n}.$$

Так как знаменатель в этой формуле мал, то с повышением из-за влияния случайных причин $C_e a \Phi_1$ ток I_I возрастает на значительно большую процентную величину, соответственно чему увеличивается и поток Φ_2, создаваемый последовательной обмоткой. Вследствие этого E_{aI} возрастает еще больше и вызовет дальнейшее возрастание тока I_I, который, в свою очередь, вызовет дальнейшее увеличение E_{aI}, и т. д. В результате это приведет к такому увеличению тока I_I, что генератор I не только возьмет на себя всю нагрузку сети, но и заставит второй генератор перейти из режима работы генератором в режим работы двигателем со встречным включением параллельной и последовательной обмоток. Сильный толчок нагрузки на первом генераторе может повлечь за собой уменьшение скорости сочлененного с ним первичного двигателя, вследствие чего произойдет переход всей нагрузки на второй генератор и первый генератор перейдет в двигательный режим. Тогда первичный двигатель первого генератора снова повысит свою скорость и снова возьмет на себя всю нагрузку и т. д. Таким образом, может возникнуть колебательный процесс периодической переброски нагрузочного тока с одного генератора на другой, и, следовательно, устойчивая работа генераторов окажется невозможной.

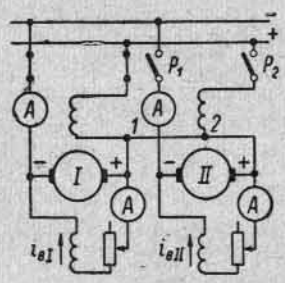


Рис. 9-3. Принципиальная схема параллельной работы генератора смешанного возбуждения

При наличии уравнительного провода последовательные обмотки возбуждения генераторов оказываются включенными параллельно между собой (рис. 9-3). Следовательно, их токи находятся в одном и том же отношении, определяемом сопротивлениями этих обмоток. Если почему либо увеличится ток в последовательной обмотке одного генератора, то в той же мере он увеличится и в последовательной обмотке другого генератора. В соответствии с этим одновременно увеличатся э. д. с. и нагрузочные токи обоих генераторов, и колебательный процесс, о котором говорилось выше, теперь происходить не будет. В этих условиях параллельная работа генераторов смешанного возбуждения становится вполне устойчивой и принципиально происходит так же, как и работа генераторов параллельного возбуждения.

Некоторые особенности представляет включение генераторов смешанного возбуждения на параллельную работу. Его можно произвести двумя различными способами.

Первый способ включения состоит в следующем. Убедившись в правильной полярности включаемого генератора, например генератора II, мы регулируем его напряжение до величины напряжения на шинах и затем сразу замыкаем рубильники P_1 и P_2. В этом случае ток I_I в последовательной обмотке генератора I разветвляется после включения генераторов на шины между последовательными обмотками обоих генераторов: часть этого тока, например 0,5 I_I, ответвляется в последовательную обмотку генератора II, а в последовательной обмотке генератора I ток уменьшается до значения 0,5 I_I. Вследствие этого э. д. с. генератора I и его нагрузочный ток уменьшаются, а э. д. с. и ток генератора II соответственно увеличиваются. Так как при этом $E_{aI} + E_{aII} \approx \text{const}$, то напряжение сети в момент включения генератора II не изменится, но чем быстрее и чем в большей степени будет происходить перераспределение нагрузок, тем резче и сильнее будет ощущаться механический толчок на валу первичных двигателей. Данный способ включения применяется на станциях с преобладающей осветительной нагрузкой.

Второй способ включения состоит в том, что предварительно, до включения генератора II на шины, замыкается рубильник P_2 и напряжение включаемого генератора регулируется, так чтобы оно было равно напряжению на шинах U. Если после этого мы замкнем рубильник P_1, то включенный генератор не возьмет на себя нагрузки, а следовательно, не будет и механического толчка. Недостаток этого способа включения состоит в том, что непосредственно вслед за включением рубильника P_2 напряжение на шинах более или менее заметно падает, так как ток в последовательной обмотке работающего генератора уменьшается.

Глава десятая

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

10-1. Принцип обратимости электрических машин

Предположим, что машина работает в режиме генератора на сеть (шины) с постоянным напряжением $U = \text{const}$ и развивает электрический момент $M_г$ (рис. 10-1, *а*). Мы знаем (см. § 8-6), что этот момент является тормозящим по отношению к вращающему моменту M_1 первичного двигателя, приводящего генератор во вращение. При этом $I_a = \frac{E_a - U}{R_a}$ [см. формулу (8-4)].

Будем уменьшать э. д. с. E_a генератора, уменьшая скорость его вращения или его магнитный поток Ф. При достаточном уменьшении э. д. с. E_a она может оказаться меньше напряжения сети U. В этом случае ток якоря I_a изменит свой знак, т. е. будет протекать в обратном по сравнению с первоначальным направлении (рис. 10-1, *б*), но, поскольку $U = \text{const}$, направление тока $i_в$ в обмотке возбуждения и, стало быть, полярность основных полюсов останутся без изменения. Соответственно этому изменится знак электромагнитного момента M_a, т. е. если прежде машина работала генератором и, развивая тормозящий момент, преобразовывала подводимую к ней механическую мощность в электрическую, то теперь она работает электродвигателем и развивает вращающий момент M_a, преодолевая момент сопротивления на валу M_c и преобразовывая подводимую к ней электрическую мощность в механическую; но при этом она продолжает вращаться в прежнем направлении и сохраняет прежнюю полярность полюсов. Отсоединив первичный двигатель, получим нормальную схему двигателя параллельного возбуждения (рис. 10-1, *б*).

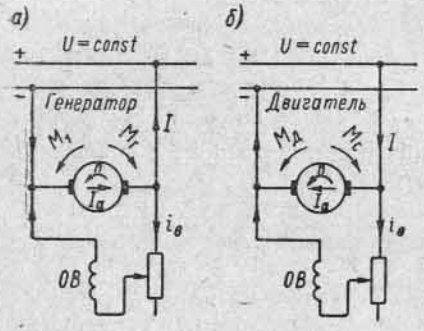


Рис. 10-1. Перевод машины параллельного возбуждения из режима работы генератором в режим работы двигателем

Если в формуле (8-4) поменять знаки у U и E_a и считать знак тока I_a в двигательном режиме положительным, то уравнение для тока примет вид $I_a = \dfrac{U - E_a}{R_a}$.

В этом случае E_a можно рассматривать как обратную э. д. с. по отношению к напряжению сети U.

Принцип обратимости электрической машины, сформулированный Э. Х. Ленцем еще в 1833 г. и показанный выше на примере машины параллельного возбуждения, распространяется как на машины постоянного тока других типов, так и на машины переменного тока.

10-2. Классификация двигателей постоянного тока

Так же как генераторы, двигатели постоянного тока классифицируются по способу включения обмотки возбуждения по отношению к якорю. В соответствии с этим имеем двигатели: а) параллельного возбуждения, б) последовательного возбуждения и в) смешанного возбуждения.

Все типы двигателей широко применяются и в соответствии с разнообразными требованиями, предъявляемыми к ним различными типами приводов, имеют весьма разнообразные характеристики. Но в основе работы двигателей всех типов лежит один и тот же энергетический процесс, характеризуемый уравнениями э. д. с. и моментов.

10-3. Энергетический процесс и энергетическая схема двигателей постоянного тока

Мы рассмотрим этот процесс на примере двигателя параллельного возбуждения с помощью энергетической схемы. (рис. 10-2), считая, что двигатель работает в установившемся режиме, т. е. при $n = \text{const}$. Если P_1 — полная электрическая мощность, подводимая к двигателю из сети, U — напряжение на зажимах двигателя, I_a — ток в якоре и $i_в$ — ток возбуждения, то

$$P_1 = U(I_a + i_в). \qquad (10\text{-}1)$$

Часть этой мощности тратится на покрытие потерь в цепи возбуждения $p_в = Ui_в$ и потерь в цепи якоря $p_{ма} + p_щ = I_a^2 R_{ам} + \Delta U_щ I_a = I_a^2 R_a$. Остальная часть мощности преобразовывается в электромагнитную мощность $P_a = E_a I_a$, которая, в свою очередь, преобразовывается в полную механическую мощность $P_{мх}$. Следовательно,

$$P_a = P_{мх} = E_a I_a = U(I_a + i_в) - U_в i_в - (p_{ма} + p_щ) = UI_a - I_a^2 R_a. \qquad (10\text{-}2)$$

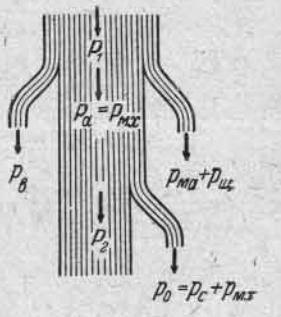


Рис. 10-2. Энергетическая схема двигателя параллельного возбуждения

Полезная механическая мощность P_2, отдаваемая двигателем, меньше мощности P_a на величину мощности p_0, необходимой для покрытия потерь в стали якоря p_c и механических потерь $p_{мх}$, т. е.,

$$P_2 = P_a - p_0 = P_{мх} - (p_c + p_{мх}). \qquad (10\text{-}3)$$

Так же происходит энергетический процесс и в двигателях других типов.

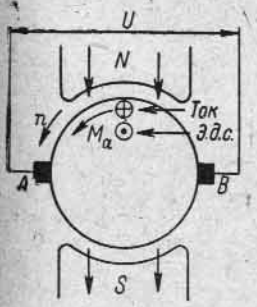


Рис. 10-3. Момент M_a и э. д. с. E_a двигателя

10-4. Уравнение э. д. с. двигателя

Предположим, что к зажимам A—B двигателя на рис. 10-3 подведено напряжение $U = \text{const}$. При заданной на рисунке полярности полюсов и направлении тока I_a в якоре (обмотка якоря показана только одним проводником) на валу двигателя создается вращающий электромагнитный момент M_a, направленный против вращения часовой стрелки. Будем считать, что под действием этого момента двигатель пришел во вращение в направлении момента M_a с некоторой постоянной скоростью n. *Применяя правило правой ладони, находим, что в проводнике (обмотке) якоря наводится* э. д. с. e_a, *направленная встречно относительно тока якоря и, стало быть, относительно подводимого напряжения U. Этот вывод носит общий характер, т. е. может быть сделан для любых условий работы машины в режиме двигателя.* На этом основании э. д. с. e_a, наводимая в обмотке якоря двигателя при его вращении, называется обратной э. д. с.

В общем случае, когда двигатель работает в переходном режиме, ток в якоре i_a, обратная э. д. с. e_a и скорость вращения могут изменяться. В этих условиях в цепи якоря возникает э. д. с. самоиндукции $-L_a\frac{di_a}{dt}$, где L_a — индуктивность цепи якоря. Учитывая направление э. д. с. e_a относительно напряжения U, имеем по второму закону Кирхгофа:

$$U+(-e_a)-L_a\frac{di_a}{dt}=i_aR_a$$

или

$$U=e_a+L_a\frac{di_a}{dt}+i_aR_a. \qquad (10\text{-}4)$$

Напряжение U можно рассматривать как действие сети в отношении двигателя. Правая часть уравнения (10-4) содержит три составляющие этого напряжения, каждая из которых находится во взаимным равновесии с соответствующим противодействием (реакцией) двигателя в отношении сети, а именно: составляющие e_a и $L_a\frac{di_a}{dt}$ уравновешены соответственно э. д. с. $(-e_a)$ и $\left(-L_a\frac{di_a}{dt}\right)$, а составляющая i_aR_a, называемая обычно падением напряжения, уравновешена некоторой условной «э. д. с. »$(-i_aR_a)$, обязанной своим возникновением противодействию, которое встречает ток i_a при протекании по сопротивлению R_a. С этой точки зрения уравнение (10-4) можно рассматривать как уравнение равновесия э. д. с. при любом режиме работы двигателя.

В частном случае, когда режим работы двигателя является установившимся и, следовательно, i_a и n = const, э. д. с. самоиндукции исчезает и уравнение (10-4) принимает вид:

$$U=E_a+I_aR_a, \qquad (10\text{-}5)$$

где E_a и I_a — э. д. с. и ток, соответствующие установившемуся режиму работы.

10-5. Уравнение моментов двигателя

В общем случае на валу двигателя действуют следующие моменты: а) электромагнитный вращающий момент M_a; б) статический момент сопротивления M_c, создаваемый статическими силами электрифицированного агрегата и приведенный к угловой скорости двигателя, и в) динамический момент M_J, который возникает при всяком изменении скорости двигателя (агрегата) и обусловливается моментом инерции J всех связанных с якорем двигателя вращающихся масс.

Электромагнитный момент двигателя, так же как электромагнитный момент генератора, создается в результате взаимодействия основного поля и тока в обмотке якоря и поэтому ничем, кроме знака, не

отличается от момента генератора. Соответственно выведенным ранее формулам (8-6) и (8-7) имеем:

$$M_a=\frac{1}{\pi}\left(N\frac{I_a}{2_a}\right)(p\Phi)=C_{\text{м}}I_a\Phi. \qquad (10\text{-}6)$$

В дальнейшем индекс a при символе M_a будем для простоты опускать.

Статический момент сопротивления определяется свойствами рабочей машины и зависит от характера производственного процесса. В ряде случаев статический момент остается во время работы практически постоянным, как, например, при подъеме груза краном. В других случаях он изменяется в зависимости, например, от скорости (вентиляторы, гребные установки), длины пути (например, при подъеме шахтной клети на большую высоту) и т. д.

Различают статические моменты: а) реактивные и б) потенциальные, или активные.

К реактивным моментам относятся статические моменты от трения, от резания, например, металла или дерева, от растяжения и скручивания неупругих тел, например пряжи или волокна. *Эти моменты всегда направлены встречно относительно вращающего момента двигателя, т. е. всегда препятствуют движению электрифицированного агрегата и, следовательно, являются тормозящими.* К числу этих моментов следует отнести момент M_0, создаваемый в самом двигателе всеми видами трения и потерями в стали якоря. Так как в двигателе, работающем вхолостую, имеет место только этот момент, то его называют моментом холостого хода двигателя.

К числу активных статических моментов относятся моменты, возникающие вследствие наличия массы, сжатия, растяжения и скручивания упругих тел. В противоположность реактивным, статические *активные моменты сохраняют свой знак при изменении направления вращения якоря*, т. е. при одном направлении вращения якоря они могут действовать встречно относительно вращающего момента двигателя M и, следовательно, являются тормозящими, а при другом направлении вращения — согласно с моментом M и, следовательно, могут рассматриваться, как движущие. Так, например, момент, создаваемый грузом подъемного механизма, сохраняет свой знак как при подъеме груза, так и при его опускании, но в первом случае он препятствует движению груза, а во втором способствует ему.

В дальнейшем мы прежде всего рассматриваем случаи, когда статический момент является тормозящим по отношению к вращающему моменту двигателя, а случаи, когда он является движущим, рассматриваются дополнительно.

Независимо от характера статического момента его можно представить в виде суммы двух моментов — момента холостого хода M_0, который, как было сказано выше, создается трением и потерями в стали собственно двигателя, и момента M_2, создаваемого всеми внешними относительно двигателя элементами агрегата. Таким образом,

$$M_c=M_0+M_2. \qquad (10\text{-}7)$$

Момент M_2 мы будем называть полезным тормозящим моментом, поскольку он соответствует мощности P_2, полезно развиваемой двигателем на валу.

Динамический момент двигателя выражается в общем случае в виде $M_J = \frac{d(J\omega)}{dt}$. Но в электромеханике главное значение имеет случай, когда $J = \text{const}$. При этом условии

$$M_J = J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (10\text{-}7а)$$

Смотря по тому, увеличивается или уменьшается скорость $\omega = 2\pi n$, динамический момент может быть положительным или отрицательным, т. е. создавать на валу двигателя положительный или отрицательный момент сопротивления.

Зависимость между вращающим моментом двигателя M и совокупностью моментов сопротивления на его валу $M_c + M_J$ вытекает из условия их взаимного равновесия, другими словами, *при любом режиме работы моменты* M *и* $M_c + M_J$ должны быть *равны по величине, но встречно направлены*, т. е.

$$M = C_м I_a \Phi = -(M_c + M_J). \qquad (10\text{-}8)$$

Обычно имеют в виду не моменты сопротивления, а составляющие вращающего момента, каждая из которых находится в равновесии с соответствующим моментом сопротивления. Тогда

$$M = C_м I_a \Phi = M_c + M_J. \qquad (10\text{-}9)$$

Из уравнения моментов двигателя непосредственно следует, что если почему-либо момент M превысит момент M_c, то на валу двигателя появится положительный динамический момент и скорость двигателя начнет возрастать. При $M < M_c$ скорость двигателя уменьшается.

При установившемся режиме работы $n = \text{const}$. В этом частном случае имеем:

$$M = C_м I_a \Phi = M_c = M_0 + M_2. \qquad (10\text{-}10)$$

Уравнение моментов (10-9) наряду с уравнением э. д. с. (10-5) имеет важное значение при анализе происходящих в электрических машинах процессах.

10-6. Характеристики двигателей

Свойства всех вообще двигателей, и в частности двигателей постоянного тока, определяются по совокупности следующих видов их характеристик: а) пусковых, б) рабочих и механических, в) тормозных, г) регулировочных.

Пусковые характеристики определяют собой пусковую операцию от момента пуска двигателя в ход до момента перехода к установившемуся режиму работы. К ним относятся: а) пусковой ток $I_п$, определяемый обычно отношением $I_п/I_н$; б) пусковой момент $M_п$, определяемый отношением $M_п/M_н$; в) время пуска $t_п$; г) экономичность операции, определяемая количеством затраченной при пуске энергии; д) стоимость и надежность пусковой аппаратуры.

Под рабочими характеристиками понимают зависимости n, M и $\eta = f(P_2)$ или $f(I_a)$ при $U = U_н = \text{const}$ и постоянных сопротивлениях в цепи якоря и возбуждения.

Для электропривода производственных механизмов весьма важное значение имеют механические характеристики, представляющие собой зависимость $n = f(M)$ при тех же, что и раньше, условиях постоянства напряжения и сопротивлений в цепях якоря и возбуждения. Сюда же следует отнести и тормозные характеристики.

Регулировочные характеристики определяют собой свойства двигателей при регулировании скорости их вращения. К ним относятся: а) пределы регулирования, определяемые отношением $n_{макс}/n_{мин}$; б) экономичность регулирования с точки зрения первоначальных затрат на оборудование и последующих эксплуатационных расходов; в) характер регулирования — плавный или ступенчатый; г) простота регулировочной аппаратуры и операций по регулированию скорости.

Как мы узнаем из дальнейшего, двигатели постоянного тока обладают многообразными и гибкими регулировочными характеристиками и именно поэтому являются незаменимыми в установках с широко регулируемой скоростью.

10-7. Способы пуска двигателей постоянного тока

Применяются следующие способы пуска двигателей:

1) прямое включение двигателя в сеть (безреостатный пуск);

2) пуск двигателя посредством реостата, включенного в цепь якоря (реостатный пуск);

3) пуск двигателя с помощью специального пускового агрегата.

В дальнейшем рассматриваются только основные пусковые характеристики главным образом в зависимости от способа возбуждения двигателя.

10-8. Безреостатный пуск двигателя

По сравнению с другими способами безреостатный пуск двигателя имеет преимущество, заключающееся в наибольшей простоте пусковой аппаратуры и пусковой операции. Но в этом случае приходится считаться со значительным броском тока в первый период пусковой операции. При этом: а) на коллекторе может возникнуть более или менее сильное искрение, а в предельном случае даже круговой огонь; б) работа защитной и измерительной аппаратуры в цепи якоря осложняется; в) питающая двигатель сеть должна быть соответственно рассчитана, так как в противном случае в ней происходит значительное падение напряжения; г) на валу двигателя возникает большой динамический момент, на который должен быть рассчитан передаточный механизм к рабочей машине, в противном случае последний может потерпеть аварию.

Мы рассмотрим самый простой случай безреостатного пуска двигателя параллельного возбуждения, включаемого в сеть без нагрузки ($M_2 = 0$ — см. рис. 10-4). При этом для упрощения анализа делаем следующие допущения: а) напряжение сети $U = \text{const}$; б) двигатель предварительно возбужден; в) реакция якоря не изменяет магнитного потока двигателя Ф, другими словами, пуск в ход происходит при $\Phi = \text{const}$; г) моментом холостого хода M_0 от потерь в двигателе мы можем пренебречь, соответственно чему $M_c = 0$. Если ω — угловая скорость вращения якоря, то $e_a = k_1\omega\Phi$, и уравнения э. д. с. и моментов [см. формулы (10-4) и (10-8)] могут быть написаны в виде

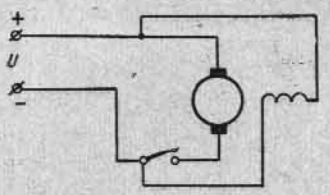


Рис. 10-4. Схема двигателя при безреостатном пуске

$$U = L_a\frac{di_a}{dt} + i_aR_a + k_1\omega\Phi \qquad (10\text{-}11)$$

и

$$M = k_1 i_a\Phi \approx M_J = J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (10\text{-}12)$$

Из последнего уравнения получаем:

$$\omega = \int k_1\frac{i_a\Phi}{J}dt = k_1\frac{\Phi}{J}\int i_a\,dt. \qquad (10\text{-}13)$$

Подставив это значение ω в уравнение э. д. с., находим:

$$U = L_a\frac{di_a}{dt} + i_aR_a + \frac{k_1^2\Phi^2}{J}\int i_a\,dt = L_a\frac{di_a}{dt} + i_aR_a + \frac{1}{C_a}\int i_a\,dt. \qquad (10\text{-}14)$$

Уравнение (10-14) соответствует уравнению включения цепи с параметрами R_a, L_a, C_a на постоянное напряжение U, причем в данном случае

$$C_a = \frac{J}{k_1^2\Phi^2} \qquad (10\text{-}15)$$

представляет собой эквивалентную «емкость» якоря, на зажимах которой действует э. д. с. e_a.

Дифференцируя уравнение (10-14) по времени, имеем:

$$L_a\frac{d^2i_a}{dt^2} + R_a\frac{di_a}{dt} + \frac{1}{C_a}i_a = 0. \qquad (10\text{-}16)$$

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$L_a\alpha^2 + R_a\alpha + \frac{1}{C_a} = 0. \qquad (10\text{-}17)$$

Корни его

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2},$$

где

$$\delta = \frac{R_a}{2L_a} = \frac{1}{2T_a} \quad \text{и} \quad \omega_0^2 = \frac{1}{L_aC_a}.$$

В том случае, когда $\delta > \omega_0$, корни характеристического уравнения вещественны, и соответственно получается апериодический режим

изменения величин i_a, e_a и n. То же получается в предельном случае, когда $\delta = \omega_0$. Если же $\delta < \omega_0$, то корни характеристического уравнения комплексные, и режим изменения величин i_a, e_a и n носит колебательный характер.

На рис. 10-5, *а* представлена осциллограмма безреостатного пуска двигателя постоянного тока типа ПН-85 завода «Электросила» при $U = 0{,}53\,U_н$ со следующими данными: $R_a = 0{,}17$ *ом*, $L_a = 0{,}0071$ *гн*, $n = 850$ *об/мин*, имеющего маховой момент $GD^2 = 60$ *н·м²*, где G — сила тяжести всех вращающихся частей, *н*; D — диаметр инерции якоря, *м*.

Аналогичная осциллограмма представлена на рис. 10-5, *б* для двигателя ПН-45 при $U \approx U_н$ со следующими данными: $R_a = 0{,}69$ *ом*,

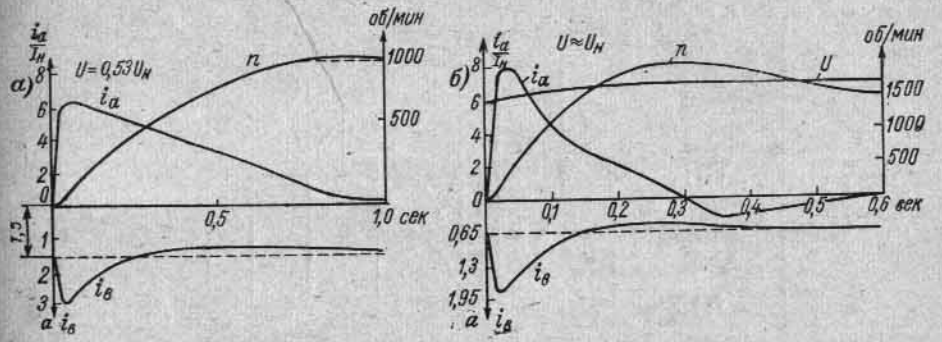


Рис. 10-5. Осциллограммы безреостатного пуска двигателя постоянного тока: *а* — при апериодическом режиме; *б* — при колебательном режиме

$L_a = 0{,}0131$ *гн*, $GD^2 = 4{,}05$ *н·м²*, $n = 1650$ *об/мин*. Мы видим, что в первом случае пуск носит апериодический характер, а во втором — колебательный.

В настоящее время считается возможным осуществлять безреостатный пуск двигателей мощностью до 6 *квт* при всплесках тока, превышающих номинальный в 6—8 раз. Если двигатель включается вхолостую, то время разгона до номинальной скорости $t_п = 0{,}1 \div 0{,}3$ *сек*; поэтому нагревание обмотки якоря невелико, всего порядка нескольких градусов. Расширение предела безреостатного пуска возможно путем применения быстродействующего автомата, который размыкает цепь якоря при достижении током некоторой предельной, заранее заданной величины, а затем снова включает ее при уменьшении тока. Таким образом, процесс разгона двигателя осуществляется путем подачи на зажимы якоря одного или нескольких импульсов.

10-9. Реостатный способ пуска. Пусковые реостаты

Чтобы уменьшить бросок тока при пуске двигателя в ход, в цепь якоря двигателя включают пусковой реостат. В зависимости от назначения и условий работы пусковые реостаты выполняются из раз-

личных материалов и имеют различное конструктивное оформление. Для пуска двигателей постоянного тока применяются практически только металлические реостаты — с воздушным и масляным охлаждением, двух- и трехзажимные, простые и комбинированные, с ручным и автоматическим или полуавтоматическим управлением и т. д.

Рассмотрим операцию реостатного пуска на примере двигателя параллельного возбуждения, в цепь якоря которого включен пусковой реостат $ПР$, состоящий из четырех секций (рис. 10-6). Реостат имеет шесть контактов, из которых первый является холостым, четыре — промежуточными и последний — рабочим. Перед пуском двигателя рубильник $Р$ должен быть разомкнут и рукоятка реостата отведена на холостой контакт.

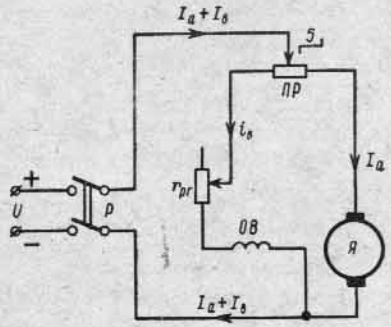


Рис. 10-6. Схема включения пускового реостата в цепь двигателя параллельного возбуждения

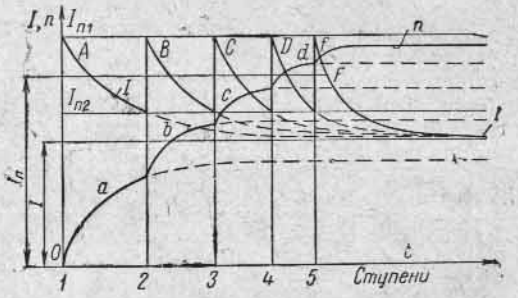


Рис. 10-7. Реостатный пуск двигателя

Чтобы пустить двигатель, замыкаем рубильник $Р$ и переводим рукоятку на первый контакт; двигатель возбуждается, а в цепи якоря происходит первый бросок тока, определяющий верхний предел пускового тока $I_{п1}$. Так как в первый момент пуска э. д. с. двигателя $E_a = C_e n\Phi = 0$, то

$$I_{п1} = \frac{U}{R_a + \Sigma R_п},$$

где $\sum R_п$ — сумма сопротивлений всех секций реостата.

Будем считать, что реакция якоря не влияет на магнитный поток двигателя, т. е. что пуск происходит при $\Phi = \text{const}$. Так как, кроме того, сопротивление пускового реостата относительно велико, то индуктивность цепи якоря имеет второстепенное значение; поэтому в уравнении э. д. с. [см. формулу (10-11)] будем пренебрегать членом $L_a \frac{di_a}{dt}$. Току $I_{п1}$ соответствует начальный пусковой момент $M_{п1} = C_м I_{п1}\Phi$.

Если этот момент больше статического момента M_c, то двигатель начнет вращаться с некоторым ускорением и разовьет обратную э. д. с., пропорциональную скорости вращения n (кривая a

на рис. 10-7). Соответственно этому будет уменьшаться по кривой A на том же рисунке пусковой ток и пропорциональный ему пусковой момент.

Когда пусковой ток уменьшится до значения $I_{п2}$, переводим рукоятку реостата на второй контакт, выводя тем самым сопротивление R_1 первой секции. При должном подборе последнего пусковой ток снова возрастает до $I_{п1}$, после чего скорость двигателя начнет возрастать по кривой b, а ток и момент — уменьшаться по кривой B. В дальнейшем процесс идет в том же порядке (кривые a—b—c—d—f и A—B—C—D—F на рис. 10-7) до тех пор, пока мы не выведем всего реостата, после чего двигатель будет работать в установившемся режиме при токе I и скорости вращения n.

Если бы мы длительное время оставили рукоятку пускового реостата на каком-нибудь промежуточном контакте, то при $M_c = \text{const}$ процессы изменения скорости и тока определялись бы штриховыми линиями, составляющими продолжение соответствующих сплошных линий.

Следует, однако, иметь в виду, что пусковые реостаты не предназначены для длительной работы в цепи якоря. Для регулирования скорости вращения двигателя в цепь якоря включаются специальные регулировочные реостаты.

Так как при прочих равных условиях пусковой момент пропорционален потоку Ф, то для облегчения пусковой операции ее обычно выполняют при выведенном регулировочном реостате в цепи возбуждения ($r_{рг} = 0$) и, следовательно, при наибольшем возможном значении тока возбуждения и соответственно потока Ф.

По тем же соображениям необходимо собрать схему цепи возбуждения так, чтобы ток в ней не зависел от тока в цепи якоря, в частности, от манипуляций с пусковым реостатом.

Верхний и нижний пределы пускового тока выбираются: верхний — из условий ограничения пускового тока и надежной коммутации, нижний — из условия создания на валу двигателя необходимого динамического момента. Обычно $I_{п1} = (1{,}75 \div 1{,}5)\ I_н$ и $I_{п2} = (1{,}3 \div 1{,}1)\ I_н$. Под пусковым током понимают его среднее значение $I_п = (1{,}5 \div 1{,}3)\ I_ц$. Число секций реостата в настоящее время сильно ограничивается, чаще всего 1—2 ступенями. При этом получается легкий пусковой реостат, но пусковая операция приобретает резко ступенчатый характер.

При отключении двигателя от сети необходимо, чтобы цепь возбуждения не размыкалась, так как запас электромагнитной энергии, которым обладает обмотка возбуждения, может повести к образованию дуги и вызвать резкое повышение напряжения в размыкаемой цепи. Чтобы избежать этого, в схеме рис. 10-6 предусмотрено, что при размыкании рубильника $Р$ цепь возбуждения оказывается замкнутой через пусковой реостат и якорь двигателя.

Пуск двигателей последовательного и смешанного возбуждения производится практически так же, как и двигателей параллельного возбуждения, но имеет некоторые особенности, рассмотренные ниже в § 10-15 и 10-18.

10-10. Пуск двигателей с помощью специального агрегата

В установках большой мощности пусковой реостат (ПР) становится громоздким и вызывает значительные потери энергии, особенно при частом пуске. Поэтому в ряде установок прибегают к способам безреостатного пуска путем изменения подводимого к двигателю при пуске напряжения. К таким способам относятся пуск с помощью вольтодобавочной машины и пуск по схеме генератор—двигатель. Сюда же следует отнести пуск двигателей, работающих от аккумуляторной батареи, путем деления ее напряжения на несколько частей, а также пуск посредством последовательного соединения двух или нескольких двигателей, как, например, в тяговых установках. Особенно широко применяется система генератор — двигатель. Она рассматривается ниже, так как предназначается не только для пуска двигателя, но и для регулирования скорости его вращения.

10-11. Рабочие характеристики двигателей

А. Рабочие характеристики двигателей параллельного возбуждения: n, M, $\eta = f(I_a)$ при $U = U_н = \text{const}$ и $i_в = \text{const}$. Схема двигателя дана на рис. 10-8. Здесь: $П$ — плавкие предохранители или автомат, $R_{рг}$ — регулировочный реостат в цепи якоря, $r_{рг}$ — регулировочный реостат в цепи возбуждения.

При снятии рабочих характеристик реостат $R_{рг}$ выведен (положение *1* на рис. 10-8). В этом случае напряжение сети U непосредственно подается на зажимы двигателя. Мы будем считать, что $U = U_н$.

Реостат $r_{рг}$ в цепи возбуждения должен быть отрегулирован так, чтобы двигатель развивал номинальную мощность $P_н$ при номинальных значениях напряжения $U_н$, тока $I_н$ и скорости вращения $n_н$. В этом положении *реостат $r_{рг}$ должен оставаться все время без изменения*, так чтобы было $i_в = \text{const}$.

Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения показаны на рис. 10-9. Условимся выражать ток I_a в долях от номинального тока $I_н$, приняв $I_н = 1$. Для объяснения рабочих характеристик воспользуемся уравнениями э. д. с. и моментов при установившемся режиме работы [см. формулы (10-5) и (10-10)].

Скоростная (внешняя) характеристика: $n = f(I_a)$ при $U = U_н = \text{const}$ и $i_в = \text{const}$. Согласно уравнению э. д. с., имеем:

$$U = E_a + I_a R_a = C_e n \Phi + I_a R_a,$$

откуда

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}. \qquad (10\text{-}18)$$

Так как по условию $U = U_н = \text{const}$ и $i_в = \text{const}$, то на скорость вращения двигателя параллельного возбуждения влияют незначительно только два фактора, а именно падение напряжения $I_a R_a$ и реакция якоря. При увеличении тока нагрузки I_a падение напряжения увеличивается, соответственно чему скорость двигателя уменьшается. Наоборот, при щетках, установленных на нейтрали, реакция

якоря размагничивает двигатель и, следовательно, стремится увеличить его скорость. Таким образом, указанные факторы действуют в отношении скорости вращения двигателя встречно, и вид скоростной характеристики определяется результирующим действием этих обоих факторов.

На рис. 10-9 кривые *1*, *2* и *3* изображают скоростные характеристики двигателя параллельного возбуждения в трех случаях: а) когда преобладает падение напряжения $I_a R_a$ (кривая *1*); б) когда указанные выше факторы практически уравновешены (кривая *2*) и в) когда преобладает действие реакции якоря (кривая *3*). Во всех случаях следует иметь в виду, что с увеличением нагрузки размагничивающее действие реакции якоря растет не пропорционально току I_a, а в большей степени. Поэтому все скоростные характеристики имеют выпуклость в сторону оси абсцисс, хотя обычно эта выпуклость бывает весьма незначительной.

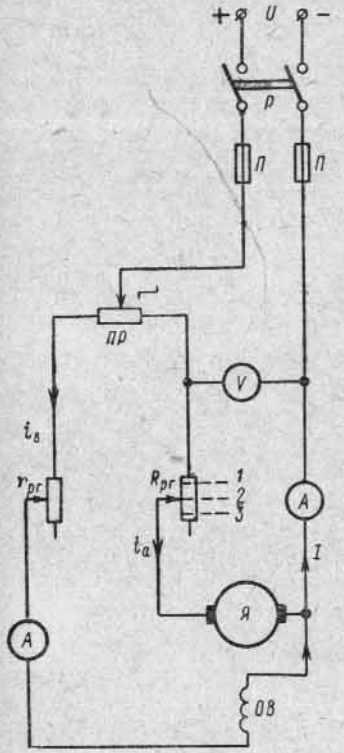


Рис. 10-8. Схема двигателя параллельного возбуждения

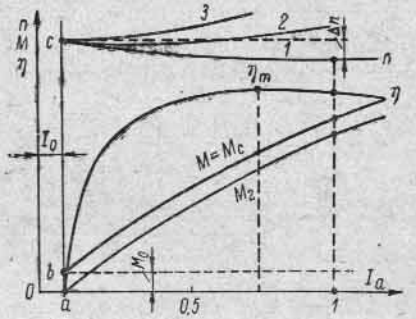


Рис. 10-9. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Обычной формой скоростной характеристики двигателя параллельного возбуждения является так называемая п а д а ю щ а я с к о р о с т н а я х а р а к т е р и с т и к а (кривая *1* на рис. 10-9). Согласно ГОСТ 183—66,

> **номинальным изменением скорости вращения двигателя параллельного возбуждения $\Delta n_н$ при номинальном напряжении на его зажимах называется изменение ее при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, выраженное в процентах от номинальной скорости $n_н$.**

Если n_0 — скорость вращения при холостом ходе, то

$$\Delta n_н = \frac{n_0 - n_н}{n_н} \cdot 100\%. \qquad (10\text{-}19)$$

Обычно $\Delta n_н = 2 \div 8\%$, причем меньшая цифра относится к двигателям большей мощности.

Вид скоростной характеристики связан с вопросом об устойчивости работы двигателя параллельного возбуждения в зависимости от свойств электрифицированного агрегата. Подробнее об этом — см. § 10-12.

Слабая зависимость скорости вращения двигателя параллельного возбуждения от нагрузки составляет одно из самых характерных свойств этого двигателя. Такую скоростную характеристику часто называют ж е с т к о й.

Моментная характеристика: $M = f(I_a)$ при $U = U_н = \text{const}$ и $i_в = \text{const}$. Согласно уравнению моментов, при установившемся режиме работы имеем:

$$M = C_м I_a \Phi = M_0 + M_2 = M_с.$$

При холостом ходе $M = M_0 = C_м I_0 \Phi = ab$ (рис. 10-9). Если бы поток возбуждения Ф оставался постоянным соответственно $i_в = \text{const}$, то моментная характеристика $M = f(I_a)$ представляла бы прямую, выходящую из точки b. В действительности поток Ф при увеличении тока I_a несколько уменьшается в результате размагничивающего действия поперечной реакции якоря. Поэтому моментная характеристика растет несколько медленнее, чем ток I_a. Характеристика полезного момента $M_2 = f(I_a)$ должна идти ниже характеристики $M = f(I_a)$ на величину момента холостого хода M_0. Так как при снятии рабочих характеристик двигателя параллельного возбуждения скорость его вращения и его поток изменяются очень незначительно, то можно считать, что

$$M_0 = \frac{p_0}{2\pi n_0} = \frac{p_{мх} + p_с}{2\pi n_0} \approx \text{const}$$

и что, следовательно, характеристика полезного момента M_2 идет из точки a на оси абсцисс ($M_2 = 0$) параллельно характеристике момента $M = f(I_a)$.

К. п. д. двигателя: $\eta = f(I_a)$ при $U = U_н = \text{const}$ и $i_в = \text{const}$. Согласно формуле (7-33), имеем:

$$\eta = \left(1 - \frac{\Sigma p}{P_1}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{\Sigma p}{U(I_a + i_в)}\right) \cdot 100 =$$

$$= \left(1 - \frac{p_0 + p_в + I_a^2 R_{ам} + \Delta U_щ I_a + p_д}{U(I_a + i_в)}\right) \cdot 100\%. \qquad (10\text{-}20)$$

Напомним, что в этой формуле: p_0 — потери холостого хода, т. е. потери механические и потери в стали; $p_в = U_в i_в$ — потери в цепи возбуждения; $I_a^2 R_{ам}$ — потери в обмотках, составляющих цепь

якоря; $\Delta U_щ I_a$ — потери в щеточном контакте; $p_д$ — добавочные потери, составляющие, согласно сказанному в § 7-6, 1 — 0,5% от подводимой к двигателю мощности при номинальном значении тока I_a.

Так как в рассматриваемых условиях $n \approx \text{const}$, $i_в = \text{const}$, $\Phi \approx \text{const}$, то можно считать, что $p_0 + p_в = \text{const}$; сопротивление $R_{ам}$ приводится к температуре 75° С; следовательно, $I_a^2 R_{ам} \sim I_a^2$; также пропорционально I_a^2 изменяются добавочные потери $p_д$; для угольных щеток $\Delta U_щ \approx 2$ *в*; следовательно, $\Delta U_щ I_a \sim I_a$.

Пренебрегая током $i_в$ в знаменателе формулы (10-20), возьмем первую производную $\frac{d\eta}{dI_a}$ и приравняем ее нулю (см. § 7-8); тогда условие максимума для к. п. д. двигателя параллельного возбуждения напишется в виде:

$$p_0 + p_в = I_a^2 R_{ам\,[75°]}, \qquad (10\text{-}21)$$

т. е. *к. п. д. двигателя достигает своего наибольшего значения* η_m *при такой нагрузке, когда постоянные потери равны переменным потерям, зависящим от квадрата тока* I_a.

Распределяя соответствующим образом потери, мы можем получить наибольший к. п. д. при заданной нагрузке. На рис. 10-9 значение η_m получается при $P_2 = 0{,}75\, P_н$. Кривая к. п. д. имеет типичный вид: она очень быстро растет в пределах от $I_a = I_0$ до $I_a = 0{,}25\, I_н$; достигает при $I_a = 0{,}5\, I_н$ значения, близкого к наибольшему, а затем в пределах изменения нагрузки от $I_a = 0{,}5\, I_н$ до $I_a = I_н$ остается почти постоянной. Обычно в двигателях малой мощности $\eta = 75 \div 85\%$, в двигателях средней и большой мощности $\eta = 85 \div 94\%$.

Б. Рабочие характеристики двигателей последовательного возбуждения: n, M и $\eta = f(I_a)$ при $U = U_н = \text{const}$. Схема двигателя изображена на рис. 10-10. Обозначения те же, что и на рис. 10-8.

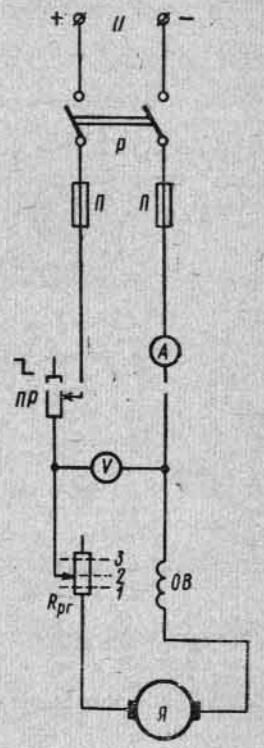


Рис. 10-10. Схема двигателя последовательного возбуждения

Скоростная характеристика: $n = f(I_a)$ при $U = U_н = \text{const}$. Так как ток возбуждения двигателя последовательного возбуждения равен току якоря I_a и изменяется одновременно с ним, то магнитный поток Ф этого двигателя, в противоположность потоку двигателя параллельного возбуждения, зависит от нагрузки, и это составляет его характерную особенность.

Из уравнения равновесия э. д. с. (10-5) имеем ту же, что и для двигателя параллельного возбуждения, формулу для скорости вращения:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}, \qquad (10\text{-}22)$$

При работе двигателя последовательного возбуждения главное значение имеет изменение основного потока двигателя, тогда как падение напряжения $I_a R_a$ и реакция якоря являются факторами второго порядка, причем падение напряжения стремится уменьшить скорость вращения, а реакция якоря — увеличить ее (при нормальном положении щеток).

При малых и средних нагрузках магнитную цепь двигателя можно считать ненасыщенной; в этом случае $\Phi \sim I_a$ и, следовательно,

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e' I_a} = \frac{U}{C_e' I_a} - \frac{R_a}{C_e'}, \qquad (10\text{-}23)$$

т. е. *скоростная характеристика ненасыщенного двигателя последовательного возбуждения имеет гиперболический характер* (штриховая линия на рис. 10-11; ток $I_н = 1$). По мере увеличения тока двигатель насыщается все сильнее, и скорость двигателя начинает изменяться в меньшей степени по сравнению с ее изменением по гиперболической зависимости (сплошная кривая на рис. 10-11). Следует обратить особое внимание на то, что при значительном уменьшении нагрузки двигатель начинает развивать все большую скорость или, как говорят, начинает идти в разнос. При холостом ходе $\Phi \approx 0$ и, как это видно из формулы (10-23), скорость двигателя приобретает значения, безусловно, опасные по своим механическим последствиям (разрыв бандажей, порча обмотки якоря и т. д.). Поэтому *двигатель последовательного возбуждения нужно ставить в такие условия работы, при которых ни пуск в ход без нагрузки, ни холостой ход при работе были бы невозможны.*

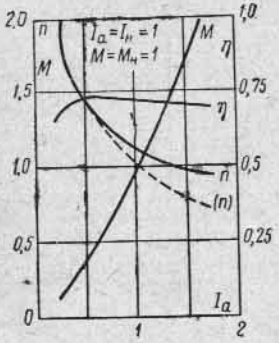


Рис. 10-11. Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

Согласно ГОСТ 183—66, двигатели последовательного возбуждения должны выдерживать без вредных последствий повышение скорости вращения на 20% сверх наибольшей, указанной на заводском щитке, но не больше чем на 50% сверх номинальной.

Так как скорость вращения двигателя последовательного возбуждения изменяется в весьма широких пределах, то, согласно тому же стандарту, под номинальным изменением скорости этого двигателя условились понимать изменение скорости вращения при переходе от номинальной нагрузки к одной четверти номинальной нагрузки при $U = U_н = \text{const}$. Изменение скорости вращения выражается в процентах от номинальной скорости. Таким образом, для двигателя последовательного возбуждения имеем:

$$\Delta n = \frac{n_{[1/4 P_н]} - n_н}{n_н} \cdot 100\%. \qquad (10\text{-}24)$$

Резко выраженная зависимость скорости вращения двигателя последовательного возбуждения от нагрузки составляет его отличительное свойство. Такую скоростную характеристику часто называют мягкой.

Моментная характеристика $M = f(I_a)$ при $U = U_н = \text{const}$. Так как $M = C_м I_a \Phi$, то при слабом насыщении стали $\Phi \sim I_a$ и $M \sim I_a^2$, т. е. моментная характеристика двигателя последовательного возбуждения представляет собой в этих условиях параболу. По мере увеличения тока I_a двигатель насыщается, а кривая момента по сравнению с параболой растет все медленнее (рис. 10-11).

Свойство двигателя последовательного возбуждения развивать больший момент, чем пропорциональный току, имеет важное значение, особенно при тяжелых условиях пуска и при перегрузках. При этом мощность двигателя растет в меньшей степени, чем его момент, так как с увеличением последнего скорость двигателя уменьшается. В двигателе же параллельного возбуждения, у которого $n \approx \text{const}$, мощность и момент растут почти пропорционально.

К. п. д. двигателя. С изменением нагрузки двигателя последовательного возбуждения изменяются все виды его потерь. Но, как показывает расчет, сумма механических потерь и потерь в стали мало изменяется в зависимости от нагрузки. Это объясняется главным образом тем, что с увеличением тока I_a индукции растут, тогда как скорость вращения уменьшается. Поэтому мы можем, так же как в двигателе параллельного возбуждения, разделить потери, имеющиеся в двигателе последовательного возбуждения, на постоянные и переменные (см. § 10-11, п. А). Соответственно мы можем сделать в отношении наибольшего значения к. п. д. тот же, что и ранее, вывод, а именно, что оно получается при нагрузке, когда $p_0 = I_a^2 R_{ам\,[75°]}$.

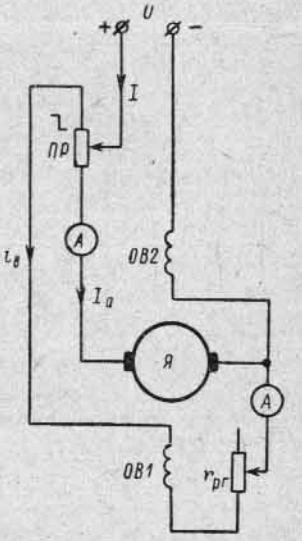


Рис. 10-12. Упрощенная схема двигателя смешанного возбуждения

В. Рабочие характеристики двигателей смешанного возбуждения. Схема двигателя приведена на рис. 10-12. Последовательная обмотка возбуждения может быть включена по отношению к параллельной обмотке как согласно, так и встречно.

При согласном включении обмоток возбуждения их н. с. складываются, вследствие чего поток Φ_1, создаваемый параллельной обмоткой возбуждения, усиливается на величину Φ_2. Поэтому выражение (10-18) для скорости вращения двигателя приобретает вид:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e (\Phi_1 + \Phi_2)}. \qquad (10\text{-}25)$$

При увеличении тока якоря I_a результирующий поток двигателя начинает увеличиваться, но в меньшей степени, чем в двигателе по-

следовательного возбуждения. Поэтому в зависимости от соотношения потоков Φ_1 и Φ_2 скоростные характеристики двигателя смешанного возбуждения могут иметь вид кривых *2* или *3* на рис. 10-13, занимающих промежуточное положение между скоростными характеристиками *1* и *4* двигателей параллельного и последовательного возбуждения. Такое же промежуточное положение занимают и моментные характеристики (кривые *2'* и *3'* на рис. 10-13).

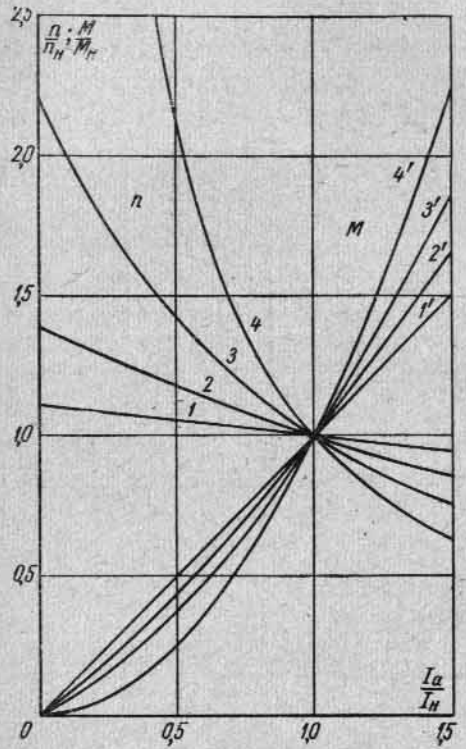


Рис. 10-13. Скоростные и моментные характеристики двигателей смешанного возбуждения

При резко падающей скоростной характеристике (кривая *3* на рис. 10-13) параллельная обмотка возбуждения ограничивает чрезмерное повышение скорости при сбросе нагрузки, так как в этом случае остается поток Φ_1, определяющий собой скорость вращения при холостом ходе n_0.

В высокоиспользованных двигателях параллельного возбуждения без компенсационной обмотки, из-за размагничивающего действия н. с. поперечной реакции якоря, с возрастанием нагрузки скорость вращения может увеличиваться, как показано на рис. 10-9 (кривая *3*). При некоторых условиях (см. § 10-12) это может приводить к неустойчивой работе двигателя. Для получения падающей скоростной характеристики (кривая *1* на рис. 10-9) такие двигатели часто снабжаются легкой последовательной (стабилизирующей) обмоткой возбуждения, включенной согласно с основной обмоткой. Н. с. последовательной обмотки приблизительно уравновешивает н. с. размагничивания F_ρ (см. § 4-3, п. Б).

При встречном включении обмоток возбуждения имеем:

$$n = \frac{U - I_a R_{\Sigma}}{C_e (\Phi_1 - \Phi_2)}. \qquad (10\text{-}26)$$

Обычно с увеличением нагрузки скорость вращения двигателя параллельного возбуждения (особенно при наличии компенсационной обмотки) несколько падает (кривая *1* на рис. 10-9). Подбирая число витков последовательной обмотки, можно получить в двигателе смешанного возбуждения почти полное постоянство скорости n при изменении нагрузки (кривая *2* на рис. 10-9).

При пуске в ход двигателя смешанного возбуждения со встречным включением обмоток возбуждения поток последовательной обмотки может заметно ослабить результирующий поток двигателя и этим осложнить пусковую операцию. Чтобы избежать этого, последовательную обмотку таких двигателей иногда замыкают на себя на все время пуска.

10-12. Механические характеристики двигателей постоянного тока: $n = f(M)$

А. Общие замечания. Главными частями электрифицированного агрегата являются исполнительный механизм и электродвигатель, сообщающий механизму тот или иной вид движения. Для их согласованной работы необходима определенная взаимозависимость между механическими характеристиками двигателя и механическими характеристиками исполнительного механизма как в установившемся режиме работы, так и в переходных. Соотношение между этими характеристиками определяет устойчивость работы агрегата.

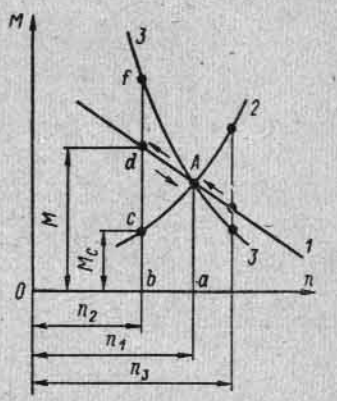


Рис. 10-14. Условие устойчивости работы двигателя

Б. Условие устойчивости работы электрифицированного агрегата. Предположим, что вращающий момент двигателя M и момент сопротивления M_c, создаваемый исполнительным механизмом на валу двигателя, заданы кривыми *1* и *2* на рис. 10-14 и пересекаются в точке A. Для удобства мы в данном случае строим механические характеристики в форме зависимостей $M = f(n)$, а не $n = f(M)$, как это делают обычно. Если скорость вращения n изменится, например уменьшится от значения $n_1 = Oa$ до значения $n_2 = Ob$, то на валу двигателя возникнет положительный динамический момент $M_J = M - M_c = bd - bc = cd$, под действием которого скорость двигателя начнет расти, пока не достигнет своего прежнего значения n_1. В обратном случае, если скорость возрастает до значения n_3, то при $M_c > M$ возникает отрицательный динамический момент, и скорость начинает уменьшаться пока не достигнет значения n_1. Следовательно, в заданных условиях работы электроагрегата точка A является точкой его устойчивой работы. В общем случае устойчивая работа электроагрегата обеспечивается при условии, когда

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_c}{dn}. \qquad (10\text{-}27)$$

Теперь предположим, что зависимость $M_c = f(n)$ имеет вид кривой *3* на рис. 10-14. В этом случае уменьшение скорости повлечет за собой появление на валу отрицательного динамического момента $M_J = df$, под действием которого скорость двигателя еще более

уменьшится, что вызовет дальнейший рост отрицательного момента M_J и т. д. Следовательно, в этих условиях работа двигателя является неустойчивой. В общем случае неустойчивая работа электроагрегата имеет место при условии, когда

$$\frac{dM}{dn} > \frac{dM_c}{dn}. \qquad (10\text{-}28)$$

В. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения: $n = f(M)$ при $U = U_н = \text{const}$, $i_в = \text{const}$, $\Sigma R_a = \text{const}$. В общем случае в цепь якоря двигателя может быть включено добавочное регулировочное сопротивление $R_{рг}$ (см. рис. 10-8), тогда уравнение э. д. с. двигателя примет вид:

$$U = E_a + I_a(R_a + R_{рг}) = C_e n\Phi + I_a(R_a + R_{рг}), \qquad (10\text{-}29)$$

откуда

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_{рг})}{C_e\Phi} \qquad (10\text{-}30)$$

или, так как из уравнения моментов $I_a = M/(C_м\Phi)$, то

$$n = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{M(R_a + R_{рг})}{C_e C_м \Phi^2} = n_0 - \Delta n. \qquad (10\text{-}31)$$

Здесь $n_0 = U/(C_e\Phi)$ — скорость вращения двигателя при холостом ходе, если пренебречь очень небольшим падением напряжения I_0R_a; Δn — уменьшение скорости соответственно моменту M и сопротивлению цепи якоря $R_a + R_{рг}$.

Будем считать, что при $i_в = \text{const}$ поток $\Phi = \text{const}$. В этом случае механические характеристики двигателя параллельного возбуждения представляют собой прямые линии, наклон которых по отношению к оси абсцисс определяется отношением $\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{I_a(R_a + R_{рг})}{U}$; на рис. 10-15 показаны четыре механические характеристики соответственно сопротивлениям $R_{рг} = 0$ (кривая *1*); $2{,}5\,R_a$ (кривая *2*), $5R_a$ (кривая *3*) и $10R_a$ (кривая *4*). Механическая характеристика при $R_{рг} = 0$ называется естественной; так как $M = C_м I_a \Phi$, то при $\Phi = \text{const}$ механическая характеристика представляет собой по существу скоростную характеристику, показанную на рис. 10-9 без учета реакции якоря. Устойчивость работы двигателя параллельного возбуждения зависит от формы его скоростной характеристики. На рис. 10-16, *а* и *б* показаны падающие скоростные (механические) характеристики $n = f(I_a) = f(M)$ при $M_c = \text{const}$ и при $M_c \sim n^2$. В обоих случаях $\frac{dM}{dn} < \frac{dM_c}{dn}$, т. е. работа двигателя является устойчивой. Наоборот, если скорость двигателя n растет с увеличением тока I_a или соответственно момента M_a, то устойчивая работа двигателя возможна только в специальных случаях (рис. 10-16, *г*), тогда как, например, при $M_c = \text{const}$ (рис. 10-16, *а*) она невозможна; физически это объясняется тем, что если, например, почему либо возрастет ток I_a, то это вызовет увеличение скорости n, которое, в свою очередь, повлечет за собой увеличение тока I_a и т. д.

Из сказанного следует, что

двигатели параллельного возбуждения должны обычно иметь падающую скоростную и механическую характеристики,

так чтобы обеспечить устойчивую работу во всех случаях. Для этого (см. § 10-11, п. В) двигатель снабжают легкой, т. е. состоящей из небольшого числа витков, последовательной обмоткой возбуждения, включаемой согласно с параллельной обмоткой возбуждения и называемой стабилизирующей. Так именно выполняются двигатели параллельного возбуждения серии ПН завода «Электросила», за исключением двух габаритов — ПН-400 и ПН-550 (см. табл. 11-1).

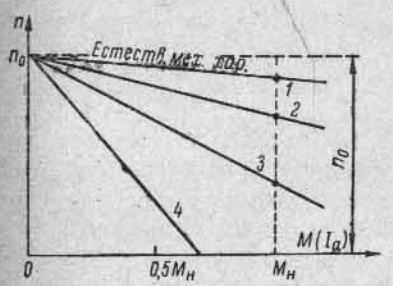


Рис. 10-15. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

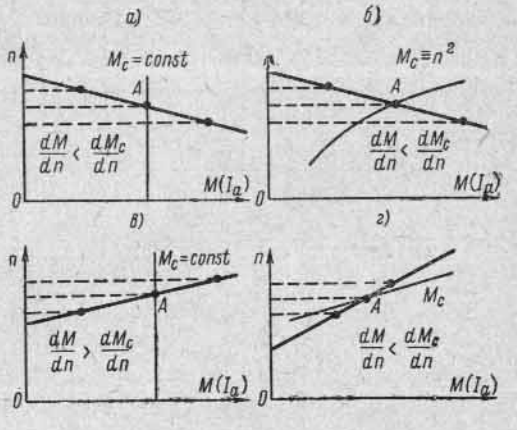


Рис. 10-16. Условия устойчивости работы двигателя параллельного возбуждения при различных механических характеристиках двигателя и исполнительного механизма

Г. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения: $n = f(M)$ при $U = U_н = \text{const}$ и $R_{рг} = \text{const}$. Так как с изменением нагрузки насыщение стали двигателя последовательного возбуждения изменяется в широких пределах, то его механическая характеристика может быть выражена аналитически в простой форме только в частном случае, когда машина не насыщена и, следовательно, $\Phi \sim I_a$. В этом случае $M = C'_м I_a^2$, откуда $I_a = C''_м \sqrt{M}$ а так как

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_{рг})}{C_e\Phi},$$

то

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_{рг})}{C'_e I_a} = C''_e \frac{U}{\sqrt{M}} - C, \qquad (10\text{-}32)$$

т. е.

механическая характеристика ненасыщенного двигателя последовательного возбуждения имеет гиперболический характер.

На рис. 10-17 изображены механические характеристики двигателя последовательного возбуждения, снятые при различных сопротивлениях $R_{рг}$, введенных в цепь якоря. Кривая *1*, снятая при $R_{рг} = 0$, называется естественной механической характеристикой. В своей нижней части, где двигатель уже насыщен, кривые заметно отличаются от гиперболы.

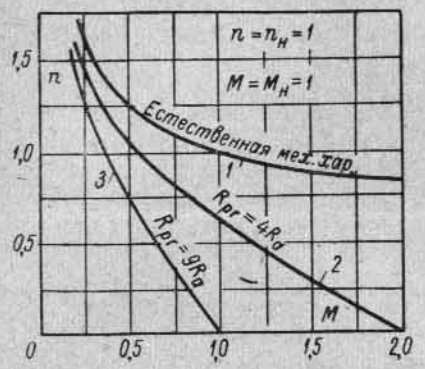


Рис. 10-17. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

Так как двигатель последовательного возбуждения имеет резко падающую механическую характеристику, то практически он работает всегда устойчиво.

10-13. Тормозные характеристики двигателей постоянного тока

А. Виды торможения. В ряде установок режимы электрического торможения двигателей имеют существенное значение. Торможение возможно: а) с возвратом энергии в сеть, или рекуперативное; б) по способу противовключения и в) динамическое.

Б. Рекуперативное торможение. Для двигателя параллельного возбуждения рекуперативное торможение имеет место тогда, когда машина, работающая в режиме двигателя, приводится во вращение исполнительным механизмом со скоростью, превышающей скорость при холостом ходе n_0. В этом случае э. д. с. $E_a = C_e n \Phi$ становится больше напряжения сети и, следовательно, ток $I_a = \frac{U - E_a}{R_a}$ изменяет знак на обратный; соответственно изменяется и знак развиваемого машиной момента M, т. е. машина начинает работать в режиме генератора параллельно с сетью. Части механических характеристик *1* и *2*, относящихся к режиму рекуперативного торможения, составляют продолжения соответствующих двигательных характеристик и располагаются во втором квадранте (рис. 10-18).

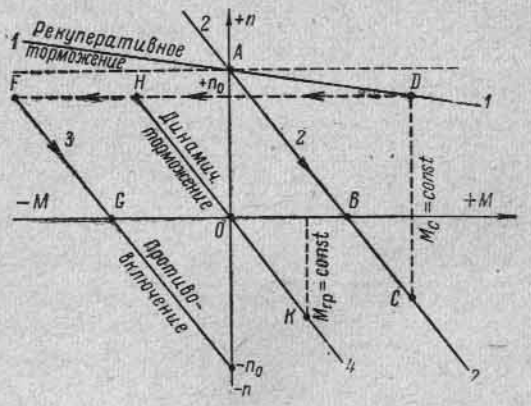


Рис. 10-18. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения в режимах торможения

Для двигателя последовательного возбуждения дело обстоит несколько сложнее, так как сам по себе двигатель не может перейти из двигательного режима в режим рекуперативного торможения путем простого повышения скорости; при увеличении последней уменьшается поток Ф, и обратная э. д. с. E_a может приблизиться к напряжению сети U, но не превзойти его. Поэтому рекуперативное торможение машины последовательного возбуждения осуществляется путем перевода ее на параллельное возбуждение и соответствующую этому возбуждению работу (см. выше). Рекуперативное торможение двигателей последовательного возбуждения широко применяется на электротранспорте.

В. Торможение по способу противовключения. Такой режим осуществляется двумя способами: а) когда исполнительный механизм приводит машину во вращение в сторону, противоположную той, в какую действует развиваемый машиной момент, и б) при переключении направления вращения двигателя на противоположное путем изменения направления тока в якоре двигателя.

Первый случай имеет место, например, при включении в цепь якоря двигателя, поднимающего груз, достаточно большого сопротивления $R_{рг}$. Рассмотрим сначала процесс торможения в двигателе параллельного возбуждения, считая, что момент $M_c = \text{const}$. При включении сопротивления $R_{рг}$ двигатель переходит с естественной механической характеристики *1* (рис. 10-18) на механическую характеристику *2*, соответствующую сопротивлению $R_{рг}$. Если в момент включения этого сопротивления ток I_a ограничивается в такой степени, что вращающий момент двигателя $M = C_м I_a \Phi$ становится меньше статического момента M_c, на валу двигателя появляется отрицательный динамический момент M_j [см. формулу (10-9)] и скорость вращения двигателя начинает замедляться. При этом э. д. с. E_a будет уменьшаться, а ток $I_a = \frac{U - E_a}{\Sigma R_a}$ будет возрастать, соответственно чему будет возрастать и момент M. Такой процесс параллельного уменьшения скорости n и увеличения момента M будет происходить до тех пор, пока M не станет равным M_c; в этом случае $M_j = 0$, и дальнейшее изменение скорости прекращается. При достаточно больших значениях $R_{рг}$ и M_c двигатель, замедляясь, может остановиться (точка B характеристики *2* на рис. 10-18), а затем начать вращаться в противоположную сторону. Установившаяся скорость спуска груза определяется точкой C, в которой характеристика *2* пересекается с прямой $M_c = \text{const}$. В рассматриваемом режиме к двигателю подводится мощность из сети $P_{эл} = UI_a$ и с вала механизма $P_{мх} = E_a I_a$, причем сумма $P_{эл} + P_{мх} = UI_a + E_a I_a = I_a^2 (R_a + R_{рг})$, т. е. целиком расходуется в сопротивлениях цепи якоря.

Аналогичный процесс происходит и при торможении двигателя последовательного возбуждения. При изменении направления вращения якоря машина может перейти в генераторный режим с самовозбуждением. Но при тех сопротивлениях $R_{рг}$, которые вводятся в цепь якоря для ограничения тока, возможность самовозбуждения машины практически исключена.

Второй случай торможения противовключением имеет место тогда, когда мы хотим быстро остановить, например, тележку крана. Для этого мы изменяем полярность зажимов якоря и, следовательно, направление тока I_a. По-прежнему будем считать, что $M_c = \text{const}$ и $i_в = \text{const}$. В первые после переключения моменты времени якорь будет продолжать вращаться в том же направлении, что и до переключения, используя кинетическую энергию движущихся частей привода. В этих условиях знак э. д. с. E_a остается без изменения, а знак напряжения сети U изменяется по отношению к E_a на обратный.

Следовательно,

$$I_a = \frac{-U - E_a}{R_a + R_{рг}} = -\frac{U + E_a}{R_a + R_{рг}},$$

где $R_{рг}$ — добавочное сопротивление, введенное в цепь якоря для ограничения тока I_a. Таким образом, ток I_a изменяет свой знак на обратный, и на валу двигателя появляется тормозящий момент $-M = C_м (-I_a) \Phi$.

В первый после переключения момент времени работа двигателя определяется точкой F (рис. 10-18), соответствующей моменту $-M$ и скорости n, которую двигатель имел до переключения. Под действием тормозящего момента $-M$ двигатель начнет замедляться, и соответственно этому будут уменьшаться э. д. с. E_a, ток I_a и момент M. Двигатель переходит на работу по характеристике *3* и при заданном должным образом сопротивлении $R_{рг}$ может остановиться (точка G характеристики *3* на рис. 10-18), а затем начать вращаться в направлении момента $-M$, т. е. в сторону, противоположную относительно первоначальной. Если это нежелательно, то двигатель отключают от сети в момент, когда $n = 0$.

Аналогичный процесс происходит и при торможении двигателя последовательного возбуждения.

Г. Динамическое торможение. При динамическом торможении двигателя параллельного возбуждения якорь двигателя отключают от сети и замыкают на нагрузочное сопротивление $R_{нг}$, а ток в цепи возбуждения оставляют без изменения. Машина начинает работать в режиме генератора независимого возбуждения, используя запас кинетической энергии агрегата. Так как в данном случае $U = 0$, то, согласно формуле (10-31), уравнение механической характеристики машины имеет вид:

$$n = \frac{M (R_a + R_{нг})}{C_e C_м \Phi^2}.$$

Это уравнение соответствует прямой, проходящей через начало координатной системы из второго квадранта в четвертый. Процесс торможения происходит следующим образом. Предположим, что машина работала в режиме двигателя, определяемом точкой D на характеристике *1* (рис. 10-18). В первый момент времени после перехода машины в режим динамического торможения скорость вращения машины практически не изменяется и соответственно не изменяется

э. д. с. $E_a = C_e n \Phi$. Но ток I_a изменяется по направлению, поскольку в двигательном режиме $I_a = \frac{U - E_a}{R_a}$, а в генераторном $I_a = \frac{-E_a}{R_a + R_{нг}}$. Следовательно, на валу машины появляется тормозящий момент $-M$, и работа машины определяется точкой H (рис. 10-18), отвечающей этому моменту и начальной скорости n.

В дальнейшем скорость вращения уменьшается по характеристике *4*, может стать равной нулю, а затем машина может начать вращаться в обратном направлении ($-n$) под действием, например, опускающегося груза. Установившаяся скорость опускания груза определяется точкой K, в которой характеристика *4* пересекается с прямой момента $M_{гр}$, создаваемого грузом, причем $M_{гр} = \text{const}$.

Динамическое торможение двигателя последовательного возбуждения может осуществляться так же, как двигателя параллельного возбуждения, т. е. при независимом возбуждении. Но этот режим неэкономичен вследствие большого расхода энергии на возбуждение.

Торможение при самовозбуждении машины последовательного возбуждения имеет тот недостаток, что при малых скоростях машина вообще не возбуждается, а после достижения известной скорости процесс самовозбуждения идет очень бурно и сопровождается возникновением на валу машины значительных по величине тормозящих моментов, что может вредно отразиться на работающем агрегате.

10-14. Регулировочные характеристики двигателей постоянного тока

В отношении регулирования скорости вращения двигатели постоянного тока имеют ряд весьма ценных преимуществ, делающих их в ряде случаев незаменимыми.

Здесь мы будем иметь в виду главным образом пределы регулирования скорости и экономичность регулировочной операции, касаясь других вопросов (время пуска, пусковая аппаратура и т. д.) только попутно.

Соответственно формуле (10-29) имеем:

$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_{рг})}{C_e \Phi}. \qquad (10\text{-}33)$$

Из этой формулы следует, что скорость вращения двигателей постоянного тока можно регулировать:

1) изменением напряжения сети U;

2) изменением падения напряжения в цепи якоря $I_a (R_a + R_{рг})$;

3) изменением потока возбуждения Φ.

Способы *2* и *3* возможны в обычных установках с постоянным напряжением сети, способ 1 — только в специальных установках, допускающих регулирование U.

10-15. Регулирование скорости вращения посредством реостата в цепи якоря

А. Двигатель параллельного возбуждения. Схема двигателя изображена на рис. 10-8. Реостат $R_{рг}$ в цепи якоря должен быть подобран так, чтобы регулирование скорости можно было производить в желаемых пределах. Будем считать, что при регулировании напряжение сети и ток возбуждения остаются постоянными, т. е. $U = \text{const}$ и $i_в = \text{const}$. Пусть, кроме того, статический момент $M_с = M_0 + M_2$ не зависит от скорости вращения двигателя, т. е. $M_с = \text{const}$. В установившемся режиме работы до регулирования имеем [см. формулу (10-5)]:

$$I_{a1} = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{U - C_e n\Phi}{R_a}.$$

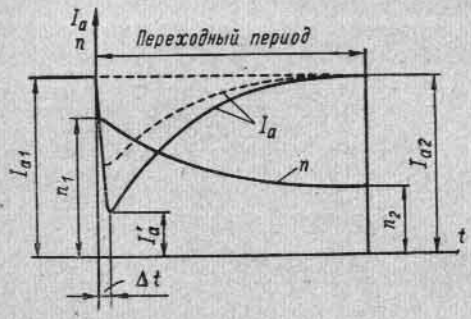


Рис. 10-19. Регулирование скорости двигателя параллельного возбуждения реостатом в цепи якоря

Теперь введем в цепь якоря сопротивление $R_{рг}$, переведя подвижный контакт регулировочного реостата из положения *1* в положение *2* или *3*. Предположим, что механическая инерция вращающихся частей двигателя и исполнительного механизма относительно настолько велика, что мы можем пренебречь изменением скорости вращения двигателя n в ближайший вслед за введением реостата момент времени Δt. Тогда ток в цепи якоря уменьшается до значения

$$I'_a = \frac{U - C_e n\Phi}{R_a + R_{рг}} = I_{a1}\frac{R_a}{R_a + R_{рг}}.$$

Такое уменьшение тока якоря влечет за собой уменьшение вращающего момента двигателя $M = C_м I_a \Phi$ пропорционально отношению I'_a/I_{a1}, если пренебречь реакцией якоря и считать, что при $r_в = \text{const}$ поток $\Phi \approx \text{const}$. Следовательно, на валу двигателя возникает отрицательный динамический момент $M_j = M - M_с$ [см. формулу (10-9)], под действием которого скорость двигателя начинает уменьшаться. Но уменьшение скорости вызывает пропорциональное уменьшение обратной э. д. с. $E_a = C_e n\Phi = C'_e n$ и соответственно увеличение тока I_a пропорционально разности $U - C'_e n$. Этот процесс уменьшения n и обратной э. д. с. E_a и параллельного с этим увеличения тока I_a будет идти до тех пор, пока ток I_a и, стало быть, вращающий момент M не достигнут своих первоначальных значений ($I_{a2} = I_{a1}$ и $M_2 = M_1$ — см. рис. 10-19). Так как при этом $M_j = 0$, то двигатель начинает работать в новом установившемся режиме при $n_2 < n_1$, причем

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{U - I_{a1}(R_a + R_{рг})}{U - I_{a1}R_a}.$$

Из сказанного следует, что а) подводимая к двигателю из сети мощность $P_1 = UI_a$ остается без изменения; б) полезная мощность двигателя $P_2 = M_2 2\pi n$ уменьшается пропорционально n, соответственно чему в той же степени уменьшается и к. п. д. установки $\eta = P_2/P_1$; в) условия охлаждения двигателя ухудшаются, так как потери в меди двигателя остаются без изменения, а количество вентилирующего двигатель воздуха уменьшается примерно пропорционально скорости n; г) условия коммутации несколько улучшаются вследствие уменьшения э. д. с. e_r [см. формулу (5-35)].

Если система двигателя обладает относительно малой инерцией, то весь процесс идет в таком же порядке, как и выше, но бросок тока I'_a после введения сопротивления $R_{рг}$ будет меньше (штриховая линия на рис. 10-19), так как одновременно с уменьшением тока I_a происходит некоторое уменьшение скорости n.

Б. Двигатель последовательного возбуждения. Процесс регулирования скорости этого двигателя посредством реостата в цепи якоря осложняется тем, что одновременно с изменением тока I_a изменяется и ток возбуждения. Чтобы выяснить характер процесса, достаточно рассмотреть два предельных случая: а) когда магнитная система двигателя весьма сильно насыщена и б) когда она не насыщена. В первом случае условия регулирования скорости двигателя последовательного возбуждения те же, что и у рассмотренного выше двигателя параллельного возбуждения, так как можно считать, что в предельно насыщенном двигателе последовательного возбуждения $\Phi \approx \text{const}$. Во втором случае $\Phi \sim I_a$. Ориентируясь, как и раньше, на систему с достаточно большой механической инерцией, можно написать уравнение э. д. с. для отрезка времени Δt, непосредственно следующего за введением реостата, в виде

$$U = C'_e n I'_a + I'_a (R_a + R_{рг}),$$

откуда

$$I'_a = \frac{U}{C'_e n + (R_a + R_{рг})}.$$

До введения реостата мы имели:

$$I_{a1} = \frac{U}{C'_e n + R'_a}.$$

Следовательно,

$$I'_a = I_{a1}\frac{C'_e n + R_a}{C'_e n + (R_a + R_{рг})}.$$

Так как $C'_e n$ превышает R_a примерно в 10 и более раз, то в ненасыщенном двигателе последовательного возбуждения бросок тока при регулировании скорости выражен значительно слабее, чем в насыщенном двигателе. В дальнейшем процесс регулирования идет, как в двигателе параллельного возбуждения, т. е. при $M_с = \text{const}$,

$$I_{a2} = I_{a1} \quad \text{и} \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{U - I_{a1}(R_a + R_{рг})}{U - I_{a1}R_a}.$$

Оценка этого способа регулирования скорости та же, что и выше.

Если момент сопротивления, создаваемый приводом на валу двигателя, зависит от скорости n (например, для вентилятора $M_c \sim n^2$), то процесс регулирования скорости идет в основном так же, как и при постоянном моменте, но в этом случае ток I_{a2}, устанавливающийся после введения сопротивления $R_{рг}$, не достигает своего прежнего значения I_{a1} соответственно меньшему моменту на валу двигателя; равным образом и скорость вращения уменьшается в меньшей степени, чем при $M_c = \text{const}$, соответственно меньшему падению напряжения $I_a (R_a + R_{рг})$.

10-16. Регулирование скорости двигателя изменением возбуждения

А. Двигатель параллельного возбуждения. Будем, как и раньше, считать, что $U = \text{const}$ и $M_c = \text{const}$. Сопротивление в цепи якоря $R_{рг} = 0$.

Предположим, что, введя реостат $r_{рг}$ (см. рис. 10-8), мы уменьшили ток возбуждения от значения $i_{в1}$ до значения $i_{в2}$, а поток Ф — от значения Φ_1 до значения Φ_2. Будем, как и раньше, считать, что в ближайший после введения реостата момент времени изменением скорости вращения n можно пренебречь. Если I_{a1} и I'_a — токи якоря до и после введения реостата, то

$$I_{a1} = \frac{U - E_a}{R_a} = \frac{U - C_e n_1 \Phi_1}{R_a} \quad \text{и} \quad I'_a = \frac{U - C_e n_1 \Phi_2}{R_a},$$

откуда

$$\frac{I_a}{I_{a1}} = \frac{U - C_e n_1 \Phi_2}{U - C_e n_1 \Phi_1}.$$

Из этой формулы следует, что если, как обычно, $E_a \approx (0{,}90 \div 0{,}96)\, U$, то данному изменению потока Ф соответствует во много раз большее изменение тока якоря I_a. Пусть, например, $\Phi_2 = 0{,}8\ \Phi_1$ и $E_a = 0{,}92U$, тогда

$$\frac{I'_a}{I_{a1}} = \frac{1 - 0{,}8 \cdot 0{,}92}{1 - 0{,}92} = 3{,}3,$$

т. е. при уменьшении потока Ф всего на 20% ток I_a увеличивается в первый момент более чем в три раза. При больших относительных значениях E_a броски тока I_a в начальный момент времени могут быть еще больше.

Соответственно значительно большему увеличению тока I_a сравнительно с уменьшением потока Ф вращающий момент двигателя увеличивается в отношении $\frac{C_м I'_a \Phi_2}{C_м I_{a1} \Phi_1}$; так как, согласно условию, статический момент сопротивления $M_c = \text{const}$, то на валу двигателя появляется положительный динамический момент M_j, под действием которого скорость двигателя начинает возрастать. Пропорционально

этому увеличению скорости растет обратная э. д. с. двигателя E_a, а ток I_a уменьшается. Такой процесс увеличения скорости и параллельно с этим уменьшения тока I_a продолжается до тех пор, пока вращающий момент M не станет равен моменту сопротивления M_c; в этих условиях $M_j = 0$, и двигатель переходит на работу в новом установившемся режиме, определяемом новым значением тока I_{a2} и новым значением скорости n_2. Согласно формулам (10-10) и (10-5) имеем:

$$I_{a2} = \frac{M}{C_м \Phi_2} \quad \text{и} \quad n = \frac{U - I_{a2} R_a}{C_e \Phi_2}.$$

Изменения тока I_a и скорости n при $U = \text{const}$ и $M_c = \text{const}$ показаны графически на рис. 10-20. Подводимая к двигателю мощность $P_1 = U (I_a + i_в)$ растет практически пропорционально току I_a, мощность $P_2 = M_2 \cdot 2\pi n$ растет пропорционально скорости; при таком одновременном увеличении подводимой и отдаваемой мощностей к. п. д. двигателя мало изменяется. Таким образом, данный способ позволяет плавно и экономично регулировать скорость вращения двигателя параллельного возбуждения. Но наряду с этим: а) условия коммутации заметно осложняются как вследствие большей скорости двигателя, так и из-за увеличения тока I_a и, следовательно, линейной нагрузки A; б) несколько ухудшаются условия охлаждения якоря, так как потери в меди обмотки якоря увеличиваются в большей степени, чем количество вентилирующего воздуха; в) уменьшается степень устойчивости работы двигателя, так как основное поле ослабляется, а реакция якоря увеличивается. Поэтому двигатели параллельного возбуждения, предназначенные для работы в режиме переменной скорости, например 1 : 2 или 1 : 3, должны быть специально рассчитаны в механическом, коммутационном и тепловом отношении.

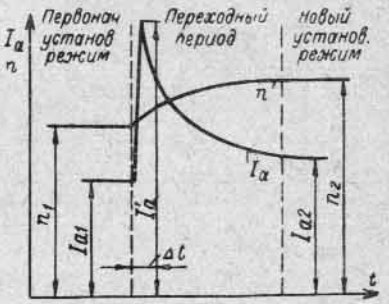


Рис. 10-20. Регулирование скорости двигателя параллельного возбуждения реостатом в цепи возбуждения

При сильно ослабленном магнитном поле, особенно если щетки в машинах с добавочными полюсами установлены с некоторым сдвигом против направления вращения якоря, т. е. на размагничивание, могут возникнуть «качания», т. е. периодические колебания скорости вращения около некоторого ее среднего значения. При этом особенно важное значение имеет размагничивающее действие реакции якоря.

При случайном увеличении скорости вращения n двигателя, работающего при ослабленном поле с характеристикой $n = f(I_a)$ типа *2* или *3* на рис. 10-9, ток I_a может начать увеличиваться, что повлечет за собой дальнейшее уменьшение потока Ф и, следовательно, возрастание скорости n. Двигатель будет самопроизвольно разгоняться.

При некоторых условиях значительное увеличение падения напряжения в цепи якоря $I_a r_a$ и уменьшение вращающего момента, развиваемого двигателем $M = C_м I_a \Phi < M_с$, приведут к падению скорости и уменьшению тока I_a. Двигатель будет затормаживаться.

Таким образом может возникнуть процесс самопроизвольного периодического изменения скорости — «качания» двигателя.

Математический анализ этого явления показывает, что в зависимости от параметров двигателя возможны следующие режимы изменения его скорости: а) апериодический затухающий, б) периодический затухающий, в) периодический установившийся с частотой колебаний

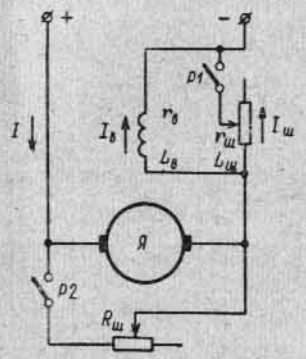


Рис. 10-21. Схема для регулирования скорости двигателя последовательного возбуждения

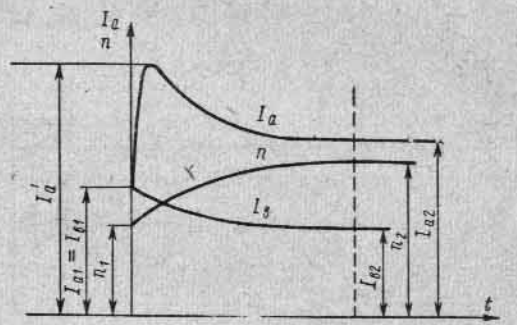


Рис. 10-22. Регулирование скорости двигателя последовательного возбуждения шунтированием обмотки возбуждения

$f = 10 \div 50$ периодов в минуту и г) периодический или апериодический возрастающий.

Чтобы устранить колебания скорости, магнитная система двигателей, в которых такие колебания предположительно возможны (например, двигатели с широким регулированием скорости путем ослабления основного поля), должна быть рассчитана надлежащим образом.

Б. Двигатель последовательного возбуждения. Существуют два основных способа регулирования скорости двигателя последовательного возбуждения изменением потока возбуждения Ф: а) шунтирование или секционирование обмотки возбуждения и б) шунтирование обмотки якоря (рис. 10-21).

Регулирование скорости шунтированием обмотки возбуждения. Предположим, что $U = \text{const}$, $M_с = \text{const}$ и что задан ток I_a при работе нешунтированного двигателя, т. е. при разомкнутом рубильнике (автомате) *Р1*. При замыкании рубильника *Р1* режим работы двигателя резко изменяется, но так как обмотка возбуждения обладает значительной электромагнитной инерцией, то потокосцепление этой обмотки и, стало быть, создаваемый ею магнитный поток Φ_1 и ток возбуждения стремятся остаться без изменения. Поэтому в ближайший после шунтирования момент времени ток в обмотке якоря увеличивается на величину тока в шунте $I_{ш1}$ и составляет $I'_{a1} = I_{в1} + I_{ш1} = I_{a1} + I_{ш1}$. Следовательно, $M' = C_м \Phi_1 \quad (I_{a1} + I_{ш1}) = C_м \Phi_1 I'_1 > M_с$, и на валу двигателя появляется положительный динамический момент $M_д = M' - M_с$, под действием которого двигатель начинает развивать большую скорость.

Если пренебречь небольшим падением напряжения в цепи якоря, то уравнение э. д. с. напишется в виде $U = C_e n \Phi$; отсюда видно, что при увеличении n поток Ф будет уменьшаться и, следовательно, будет уменьшаться ток $I_в$; это повлечет за собой уменьшение тока в шунте $I_ш$ (закон разветвленных цепей) и тока в якоре $I_a = I_в + I_ш$ (рис. 10-22). Этот процесс параллельного изменения скорости n и токов $I_в$ и I_a продолжается до тех пор, пока ток в якоре и поток возбуждения не приобретут таких новых значений I_{a2} и Φ_2, при которых $M = C_м I_{a2} \Phi_2 = C_м I_{a1} \Phi_1 = M_с$. При этом $M_д = 0$, и двигатель начинает работать в новом установившемся режиме со скоростью $n_2 \approx n_1 \dfrac{\Phi_1}{\Phi_2}$ (рис. 10-22). Соответственно току I_{a2} увеличивается подводимая к двигателю мощность $P_1 = U I_{a2}$, полезная мощность $P_2 = M_2 2\pi n$ тоже увеличивается, причем к. п. д. двигателя почти не изменяется, а при некоторых соотношениях между различными видами потерь может даже возрасти; в остальном оценка этого способа регулирования двигателя последовательного возбуждения та же, что и в соответствующем случае для двигателя параллельного возбуждения (см. § 10-16, п. А).

Рассматриваемый способ регулирования скорости широко применяется в электротяге. Коэффициент $k_{о.п} = I_в / I_a$ называется коэффициентом ослабления поля. Обычно шунтирующее сопротивление выполняется регулируемым, так чтобы было $k_{о.п} = 75\%$, 61,5% и 50%, но в ряде случаев поле ослабляют еще сильнее. На рис. 10-23 приведены характеристики тягового (трамвайного) двигателя ДТИ-60 завода «Динамо» имени С. М. Кирова мощностью 60 *квт* (часовая), 550 *в*, 800 *об/мин*; жирными линиями изображены кривые при $U = 550$ *в* без ослабления поля, соответственно тонкими линиями — кривые при $U = 550$ *в* с коэффициентом ослабления поля $k_{о.п} = 50\%$ и штриховыми линиями — кривые при 0,5 $U = 275$ *в* без ослабления поля.

При работе тягового двигателя на линии приходится считаться с возможностью отрыва токоприемника от контактного провода, когда двигатель некоторое время работает без тока, и последующем включением его в сеть. Если обмотка возбуждения шунтирована только активным сопротивлением, то из-за ее значительной индуктивности ток пойдет в первый момент после восстановления контакта с сетью только по шунтирующему сопротивлению. Двигатель не разовьет обратной э. д. с., и ток включения может превысить допустимые пределы. Чтобы избежать этого, делают шунтирующее сопротивление индуктивным с таким расчетом, чтобы распределение тока между обмоткой возбуждения и шунтом в переходном процессе приближалось к распределению тока при установившемся режиме.

Регулирование скорости шунтированием обмотки якоря. При шунтировании обмотки якоря (см. рис. 10-21) рубильник *Р1* разомкнут, рубильник *Р2* замкнут. Ход рассуждения тот же, что и выше. Разница заключается лишь в том, что в данном случае в ближайший после шунтирования момент времени ток возбуждения остается без изменения, а ток в якоре уменьшается на величину тока, ответвившегося в шунтирующее сопротивление; вследствие этого появляется отрицательный момент ускорения, и скорость вращения двигателя начинает уменьшаться.

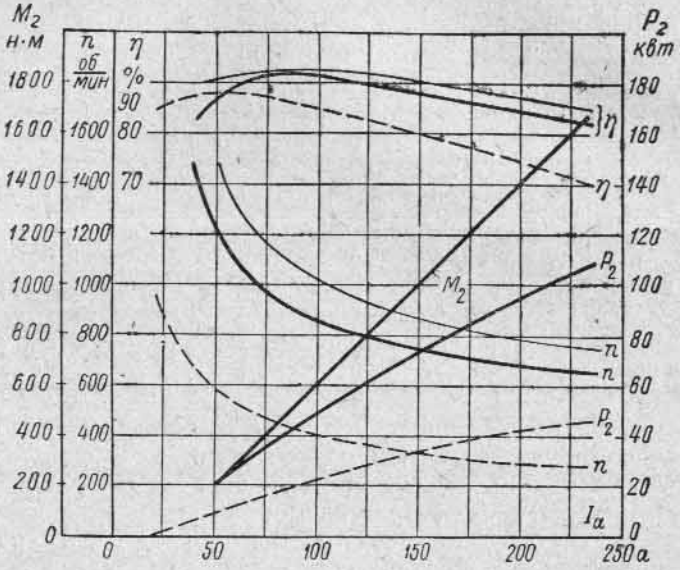


Рис. 10-23. Характеристики тягового двигателя ДТИ-60 при $U = 550$ *в* (без ослабления поля); $U = 550$ *в* с $k_{о.п} = 50\%$ и $U = 275$ *в* (без ослабления поля)

По окончании процесса ток в якоре будет меньше первоначального, а ток в обмотке возбуждения и, следовательно, ток, текущий из сети, увеличивается. Соответственно этому возрастает потребляемая двигателем мощность P_1, тогда как его полезная мощность $P_2 = M_2\, 2\pi n$ уменьшается. Отсюда следует, что данный способ регулирования скорости двигателя последовательного возбуждения весьма неэкономичен. Поэтому он применяется только там, где стоимость электроэнергии не является существенным фактором и где, как, например, в литейных цехах, требуется на короткое время сильно уменьшить скорость двигателя. В ряде установок скорость по этому способу регулируется в пределах 1:5 и выше.

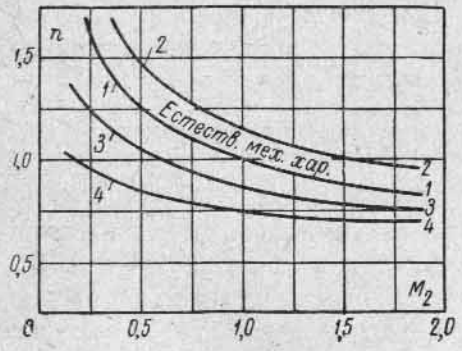


Рис. 10-24. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при различных способах регулирования скорости

На рис. 10-24 сопоставлены построенные в относительных единицах ($M_н = 1$ и $n_н = 1$) механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при различных способах регулирования скорости: кривая *1* — естественная механическая характеристика, кривая *2* — характеристика при шунтированной на 50% обмотке возбуждения, кривые *3* и *4* — характеристики при шунтированной двумя разными сопротивлениями обмотке якоря.

10-17. Регулирование скорости посредством изменения напряжения сети

В тех случаях, когда двигатель предназначен для работы в условиях широко изменяемой скорости, наиболее целесообразным в отношении использования двигателя и надежности его работы является способ изменения его скорости с помощью изменения напряжения на зажимах при независимом возбуждении, позволяющий иметь полную величину потока Ф при всех скоростях. В том случае, когда напряжение на зажимах двигателя можно регулировать плавно от нулевого значения до наибольшего, возможна не только широкая, экономичная и плавная регулировка скорости двигателя, но и безреостатный пуск его в ход без потерь в пусковом реостате.

Наиболее типичными системами подобного рода являются: а) система Леонарда, или система генератор—двигатель (сокращенно ГД), и б) система Леонарда—Ильгнера, или система генератор—двигатель с маховиком (сокращенно ГДМ).

Одна из возможных принципиальных схем системы ГД показана на рис. 10-25. Здесь *АД* — асинхронный двигатель трехфазного тока, сочлененный на одном валу с генератором постоянного тока *ГПТ* и образующий совместно с последним систему, предназначенную для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока; *ДПТ* — исполнительный двигатель постоянного тока; *В* — возбудитель, питающий цепи возбуждения генератора и двигателя постоянного тока.

В общем случае генератор постоянного тока может питать несколько двигателей постоянного тока, если они работают в одинаковых условиях. Вместо асинхронного двигателя часто, в особенности при больших и средних мощностях, применяют синхронные двигатели, вращающиеся со строго постоянной скоростью. Для возбуждения иногда применяют отдельные возбудительные агрегаты, состоящие из небольшого асинхронного двигателя и возбудителя.

При пуске в ход мы уменьшаем при помощи реостата $r_г$ ток возбуждения генератора и, следовательно, подводимое к двигателю напряжение так, чтобы должным образом ограничить пусковой ток двигателя и в то же время позволить ему прийти во вращение с некоторым

ускорением. Тем самым отпадает надобность в пусковом реостате, снижаются потери энергии в период пуска и облегчается управление операцией, поскольку она производится с помощью реостата $r_г$ вместо громоздкого пускового реостата.

Регулирование скорости вращения по системе ГД ведется при заданном значении тока I_a, например $I_a = I_н = \text{const}$. При этом изменение скорости от нуля до некоторого низшего предела производится при постоянном потоке $Ф_д$ двигателя постоянного тока путем

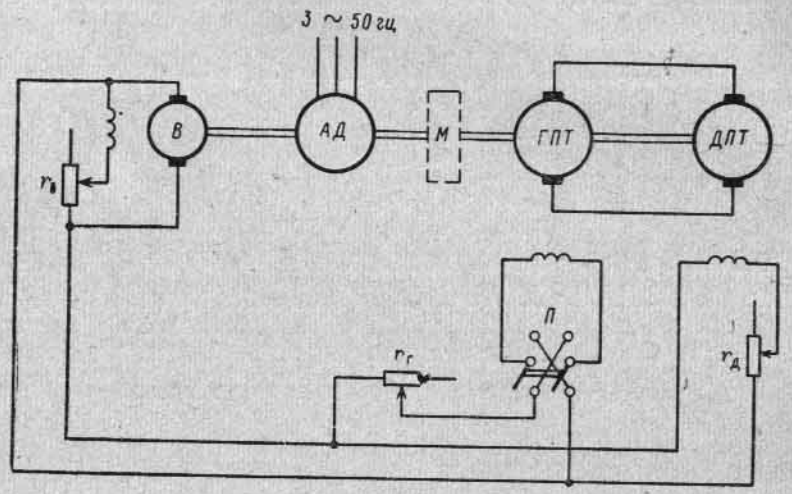


Рис. 10-25. Принципиальная схема системы генератор — двигатель

повышения напряжения генератора $U_г$. В этих условиях развиваемый двигателем момент $M = C_м I_a Ф_д = \text{const}$, а мощность $P_д = M 2\pi n \sim n$ или, так как

$$n = \frac{U_г - I_a R_a}{C_e Ф_д} \approx C U_г,$$

то $P_д \sim U_г$, т. е. мощность двигателя пропорциональна напряжению $U_г$ на зажимах генератора. Дальнейшее увеличение скорости ведется при постоянном напряжении генератора $U_г = \text{const}$ путем уменьшения потока двигателя $Ф_д$. В этих условиях мощность двигателя $P_д = U_г I_a = \text{const}$, а момент $M = P_д/n$.

Таким образом, на первом этапе регулирование скорости осуществляется при постоянном моменте, на втором — при постоянной мощности. Для иллюстрации на рис. 10-26 приведены кривые *1* и *2* соответственно момента M и мощности P реверсивного двигателя мощностью 5200 *квт*. До $n = 50$ *об/мин* регулирование ведется при постоянном моменте, а с 50 до 120 *об/мин* — при постоянной мощности. Кривые *3* и *4* дают соответственно предельные, или, иначе, в ы к л ю ч а ю щ и е, значения момента и мощности.

В последнее время в мощных прокатных установках (5—10 тыс. *квт*) с большим числом реверсов в единицу времени (12—20 в минуту) получила широкое распространение так называемая к в а д р а т и ч н а я с и с т е м а ГД, в которой генератор и двигатель постоянного тока имеют каждый свой особый возбудитель, причем управление установкой производится изменением тока в цепи возбуждения возбудителей. Это весьма упрощает и облегчает управление, поскольку мощности возбудителей не превышают 2—3% от мощности главных машин. В настоящее время в качестве возбудителей системы ГД получили широкое применение специальные машины постоянного тока, так называемые электромашинные усилители, автоматизирующие работу установки и этим повышающие ее производительность (см. § 11-3, п. Г).

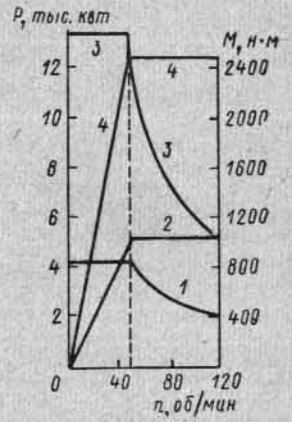


Рис. 10-26. Характеристики реверсивного прокатного двигателя, питаемого по системе ГД

Система ГД позволяет получить быстрый пуск и реверсирование исполнительного двигателя без потерь в реостатах главной цепи. Для осуществления реверса достаточно изменить на обратное направление тока возбуждения генератора постоянного тока при помощи переключателя $П$ (см. рис. 10-25).

Торможение двигателя также производится путем регулирования напряжения генератора. При этом, если, быстро уменьшив возбуждение генератора, сделать его э. д. с. меньше э. д. с. двигателя, то последний переходит в генераторный режим и возвращает энергию торможения обратно в сеть через генератор, который в этих условиях работает двигателем, заставляя работать генератором приводной двигатель переменного тока.

Если при работе системы ГД получаются резкие пики тока, то на вал приводного двигателя насаживают маховик, запасающий энергию в период увеличения скорости двигателя и отдающий ее при уменьшении скорости (на рис. 10-25 маховик M показан штриховой линией). В этой системе (ГДМ) применяется в качестве приводного только асинхронный двигатель, так как синхронный двигатель вращается с постоянной скоростью и, следовательно, не позволяет использовать энергию маховика.

Система ГДМ дает возможность выравнивать нагрузки и сильно сглаживать пики тока в питающей сети переменного тока. Благодаря маховику мощность асинхронного двигателя часто можно выбирать меньше мощности двигателя постоянного тока. Так, для привода стандартного блюминга устанавливается реверсивный двигатель постоянного тока мощностью 5300 *квт*, тогда как мощность асинхронного двигателя составляет всего 3700 *квт*.

Системы ГД и ГДМ находят широкое применение в промышленности для привода прокатных станов, бумажных машин, рулевых приводов, крановых двигателей и т. п.

Глава одиннадцатая

ОСНОВНЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

11-1. Предварительные замечания

На центральных электростанциях генерирование электроэнергии производится в форме трехфазного тока промышленной частоты, но некоторые виды производства могут работать только на постоянном токе (например, выплавка алюминия, некоторые отрасли химической промышленности и т. д.), а в других случаях (прокатные установки и др.) постоянный ток имеет ряд преимуществ перед переменным. Соответственно чрезвычайному многообразию требований разного рода потребителей созданы машины постоянного тока в самом широком диапазоне мощностей — от нескольких ватт до тысяч киловатт, напряжений — от нескольких вольт до тысяч вольт, скоростей вращения, с самыми разнообразными рабочими характеристиками. Охватить в данной книге всю эту область машин постоянного тока не представляется возможным. Поэтому здесь мы опишем только машины специального исполнения, представляющие наибольший интерес с теоретической или производственной точки зрения.

11-2. Основные типы машин постоянного тока

А. Машины нормального типа. Машины постоянного тока нормального типа малой и средней мощности выполняются в настоящее время в сериях ПН и П.

В табл. 11-1 приведены основные данные машин постоянного тока серии ПН при напряжении 220 *в*, еще используемой в СССР.

В настоящее время в СССР спроектирована и выпускается новая серия нормальных машин постоянного тока П, призванная заменить серию ПН. Основные технические данные машин постоянного тока серии П (13—17 габаритов) указаны в табл. 11-2. В табл. 11-3 приведены некоторые данные двигателей серии П (9-11 габаритов) с глубоким регулированием скорости вращения ослаблением поля (1 : 4 и 1 : 8). По сравнению с машинами серии ПН машины новой единой серии П имеют лучшее использование активных материалов на 1 *квт* мощности.

Б. Тяговые генераторы и двигатели. Для преобразования переменного тока в постоянный на тяговых подстанциях устанавливаются, как правило, ртутные выпрямители. Но в некоторых особых случаях предпочтительнее установка машинных агрегатов. В этом отношении типичными можно считать агрегаты, установленные на подстанциях перевальных участков Закавказской и Кизеловской электрифицированных железных дорог и состоящие каждый из синхронного двигателя и двух последовательно соединенных генераторов смешанного возбуждения на 1000 *квт*, 1500 *в*, 667 *а*.

Тяговые электродвигатели применяются для приведения в движение подвижного состава на самых различных видах транспорта:

на городских, пригородных и магистральных электрических железных дорогах, на водном, внутризаводском, рудничном транспорте и т. д. В соответствии с этим тяговые двигатели постоянного тока выполняются на различные мощности и напряжения: от 1,5 — 5 *квт* при 80—110 *в* для аккумуляторных тележек и шахтных аккумуляторных электровозов и до 500—2000 *квт* при 750—1650 *в* для магистральных электровозов и имеют различные регулировочные и тормозные характеристики.

Различают длительный и часовой режимы работы тяговых электродвигателей.

Согласно ГОСТ 2582—66, номинальной длительной мощностью тяговой машины называется наибольшая развиваемая двигателем на валу или получаемая на зажимах генератора мощность P_{∞}, при которой машина может работать длительно в условиях нормально действующей вентиляции и при закрытых смотровых коллекторных люках. При этом допустимые превышения температуры (перегревы) всех частей машины не должны выходить за пределы, установленные стандартом.

Соответственно часовой мощностью тяговой машины называется мощность $P_{ч}$, развиваемая машиной в течение 1 часа при тех же, что и выше, условиях вентиляции и при том же требовании в отношении перегревов.

Длительной и часовой мощности двигателя соответствуют длительные и часовые значения тока и скорости вращения: I_{∞}, $I_{ч}$, n_{∞} и $n_{ч}$. В современных хорошо вентилируемых двигателях, например для магистральных электровозов, отношения $P_{\infty} : P_{ч} = 0{,}85 \div 0{,}90$ и $n_{\infty} : n_{ч} = 1{,}05 \div 1{,}1$.

По сравнению с машинами стационарного типа условия работы тяговых электродвигателей значительно тяжелее, так как габариты двигателя ограничены диаметром ведущих колес и шириной колеи; работа двигателя протекает в условиях частого пуска в ход при значительных ускорениях подвижного состава и сопровождается резкими изменениями напряжения на зажимах двигателя, тока и скорости вращения; равным образом возможны динамические воздействия на двигатель, вызывающие, в частности, вибрации щеток и щеткодержателей и этим нарушающие их нормальную работу, и т. д.

Таким образом, работа тягового двигателя носит напряженный характер в коммутационном, механическом и тепловом отношении. В целях усовершенствования тягового двигателя в последнее время был проведен ряд мероприятий — увеличение н. с. добавочных полюсов по отношению к н. с. реакции якоря до 140—160% (вместо 115—130% в машинах стационарного типа), выполнение добавочных полюсов из листовой стали, введение немагнитной прокладки между сердечником полюса и ярмом, применение щеток повышенного качества и специальных конструкций щеткодержателей, улучшение технологии изготовления коллекторов и т. д.

Обычным типом тягового электродвигателя является двигатель последовательного возбуждения. Его рабочие характеристики — см.

Форма паза и тип обмотки	Тип машины	Мощность, *квт* / Номинальная скорость вращения, *об/мин* / Номинальный ток — Двигатель						Генератор				2p	D_a, *мм*	l_a, *мм*	Z	$h_з$, *мм*	$b_з$, *мм*	K	$D_к$, *мм*	$l_к$, *мм*	$\delta/\delta_д$, *мм*	Сопротивления главных полюсов, якоря, добавочных полюсов и последовательной обмотки при номинальной нагрузке в режиме двигателя и генератора, *ом* — $R_ш$, R_a	$R_д$, $R_п$	Масса, *кг*	Маховой момент GD^2, *н·м²*
Пазы овальные, полузакрытые, обмотка проволочная, всыпная	ПН-5	1,0 / 2800 / 5,85	0,75 / 2000 / 4,4	0,52 / 1450 / 3,3	0,3 / 960 / 2,1	—	—	95 / 2830 / 4,35	0,67 / 2300 / 2,9	0,37 / 1420 / 1,61	—	2	98	90	14	18,5	4 / 9,3/12,6	56	64	46	0,6 / 1,0	0,52* / 1450** / 910/8,6	0,67* / 2300** / 1,79/0,224	44	0,3
	ПН-10	2,4 / 2850 / 13,3	1,6 / 2000 / 9	1,0 / 1420 / 6,1	0,65 / 980 / 4,25	—	—	2,2 / 2860 / 9,6	1,35 / 2000 / 5,88	0,85 / 1430 / 8,7	—	2	118	110	18	23,2	3,5 / 8,8/12,2	72	80	45	0,8 / 1,0	1,0 / 1420 / 726/2,74	0,85 / 2000 / 0,7/0,22	65	0,8
	ПН-17,5	3,7 / 2850 / 20	2,7 / 2100 / 15	1,75 / 1450 / 10	1,0 / 1000 / 5,75	—	—	3,1 / 2860 / 13,5	2,1 / 2100 / 9,2	1,3 / 1430 / 5,65	—	2	130	118	20	24,2	3,5 / 6,8/10,2	80	80	45	0,8 / 1,5	1,75 / 1450 / 578/1,25	2,1 / 2100 / 0,44/0,45	80	1,3
	ПН-28,5			2,8 / 1600 / 15,6					3,4 / 2150 / 14,8			4	160	65	29	26,2	3,5 / 6,8 / 10,2	87	125	50	1,0 / 2,5	2,8 / 1500 / 374/0,0745	3,4 / 2150 / 0,036	96	2,3
	ПН-45	7,0 / 2500 / 37,5	6,6 / 2200 / 35	4,2 / 1500 / 22,6	2,5 / 1000 / 14,1	—	—	—	5,4 / 2100 / 23,4	3,3 / 1440 / 14,4	—	4		100								4,4 / 1500 / 298/0,4	5,4 / 2100 / 0,19/0,43	107	2,8
	ПН-68			6,5 / 1550 / 35					8,0 / 2100 / 34,8			4	185	95	31	28,2	4 / 8,2 / 10,2	87	125	50 / 62	1,0 / 3,0	6,5 / 1550 / 250/0,257	8,0 / 2100 / 0,107/0,012	138	5
	ПН-85	—	—	9,0 / 1500 / 48	5,6 / 1000 / 30	—	—	—	11,3 / 1900 / 49	6,8 / 1460 / 29,5	—	4		160								9,0 / 1500 / 228/0,144	11,3 / 1900 / 0,074/0,15	175	6,4
Пазы прямоугольные, открытые, обмотка стержневая	ПН-100				10 / 1100 / 53					13,5 / 1460 / 58		4	245	80	35	36,2	8,5	138	170	85	1,5 / 3,0	10 / 1090 / 136/0,25	13,3 / 1460 / 0,105/0,0091	290	16
	ПН-145	—	—	21,0 / 1550 / 110	13,5 / 1050 / 73	8,5 / 780 / 46,5	—	—	25 / 2000 / 25	16,5 / 1460 / 16,2	11 / 980 / 11	4		120								13,5 / 1050 / 149,6/0,116	16,2 / 1460 / 0,055/0,0056	330	20
	ПН-205	—	—	—	21 / 980 / 110	—	—	—	—	27 / 1460 / 104	—	4	295	100	33	36,2	10,8	199	200	115	2,0 / 4,0	20,5 / 970 / 92/0,096	24 / 1300 / 0,033/0,0056	480	40

Форма паза и тип обмотки	Тип машины	Мощность, *квт* / Номинальная скорость вращения, *об/мин* / Номинальный ток — Двигатель						Генератор				$2p$	D_a, *мм*	l_a, *мм*	Z	$h_з$, *мм*	$b_з$, *мм*	K	$D_к$, *мм*	$l_к$, *мм*	$\delta/\delta_д$, *мм*	Сопротивления главных полюсов, якоря, добавочных полюсов и последовательной обмотки при номинальной нагрузке в режиме двигателя и генератора, *ом*		Масса, *кг*	Маховой момент GD^2, *н·м²*
																						$R_ш$, R_a	$R_д$, $R_п$		
Пазы прямоугольные, открытые, обмотка стержневая	ПН-290	—	—	46,5 1500 238	29 1000 152	19 770 103	—	—	—	40 1470 143	23 970 100	4	—	140	—	—	—	—	—	—	—	29 1000 57/0,048	33 1300 0,0215/0,0016	530	48
	ПН-400	—	—	92 1480 460	43 950 225 60 980 305	30 600 160	—	—	—	65 1470 336 85 1470 313	48 970 209	4 4	340	140 190	42	42	9	167 125	250	150	3,0 5,0	42 950 43,2/0,073 60 950 41,7/0,0188	55 1470 0,011 72 1470 0,0071	830 935	101 118
	ПН-750 ПН-1000	—	—	130 1170 665	75 900 300 105 960 525	70 750 358	55 630 282	—	—	—	63 970 322 80 970 660	4 4	410	150 200	—	—	—	—	300	—	—	—	—	1250 1450	244 280
	ПН-1320 ПН-1750	—	—	200 1150 1000	130 980 655 165 970 820	115 750 575	80 550 405	—	—	—	100 975 518 130 975 660	4 4	475	165 220	—	—	—	—	350	—	—	—	—	1810 2080	533 593

Примечание. Цифра в типе машины указывает приблизительную номинальную мощность в режиме двигателя для двигателей с полузакрытыми овальными пазами и проволочной всыпной обмоткой при номинальной скорости вращения около 1450—1500 *об/мин* (типы ПН-5—ПН-85) и для двигателей с открытыми прямоугольными пазами и стержневой обмоткой — около 1000 *об/мин* (типы ПН-100 — ПН-1750). Номинальная мощность из номинальной мощности двигателя с теми же данными при повышенной на 30—50% скорости вращения. * — мощность в двигательном и генераторном режимах; ** — скорость вращения в тех же режимах.

Таблица 11-2

Тип машины	Двигатель: $U_н$, *в*	$n_н$, *об/мин*	$P_н$, *квт*	$I_н$, *а*	η, %	$n_{макс}$, *об/мин*	G, *н*	GD^2, *н·м²*	Генератор: $U_н$, *в*	$n_н$, *об/мин*	$P_н$, *квт*	$I_н$, *а*	$i_в$, *а*	η, %	G, *н*	$R_а$, *ом*	$R_п$, *ом*	$R_д$, *ом*	Двигатель $R_ш$, *ом*	$2p$
П-131-4к	220	400	75	382	89,3	1500	23000	600	460	1000	200	435	8,4	93,2	23300	0,0234	0,0103	0,0036	17,3	4
П-142-6к	220	300	125	640	88,6	1500	37300	1 480	460	1000	400	870	7,6	93,5	37300	0,00895	0,00665	0,0012	14,6	4
П-151-9к	220	300	200	1020	89,1	1000	56550	4 100	460	1000	600	1300	10,8	93,4	47100	0,00508	0,00378	0,000835	12,0	6
П-152-9к	220	300	250	1270	89,8	1000	62300	4 500	460	1000	750	1630	15,1	94,5	52650	0,00552	0,00404	0,000985	9,34	6
П-171-9к	330	300	400	1340	90,5	1000	80100	10 900	660	1000	1100	1670	16,7	93,7	69150	0,00466	0,0028	0,000753	6,02	6

Примечания. 1. Обмотка независимого возбуждения $U_в = 220$ *в*. 2. Сопротивления в таблице даны при 20° С.

Таблица 11-3

Тип машины	$U_н$, *в*	n, *об/мин*	$P_н$, *квт*	I, *а*	η, %	$R_п$, *ом*	$R_в$, *ом*	$R_д$, *ом*	$R_ш$, *ом*
П-91	110	250/2000	4	54/84	67,5/43,5	0,00082	0,208	0,0815	44
	220	500/2000	11	61/70	82/71,5	0,00328			
П-92	110	250/2000	6	70/102	78/53,5	0,000975	0,1335	0,0592	48,3
	220	500/2000	13	70/77	84,5/76,5	0,0039			
П-101	110	250/2000	9	110/148	74/55,5	0,000847	0,0878	0,035	37,8
	220	500/2000	16	84/94	86,5/77,5	0,00339			
П-102	110	250/2000	13	150/192	78,5/61,5	0,000972	0,0565	0,023	32,9
	220	500/2000	29	150/160	88/82,5	0,00289			
П-111	110	200/1600	13	153/196	77/60,5	0,000792	0,0594	0,0262	28
	220	400/1600	31	169/173	86,5/81,5	0,00317			
П-112	110	200/1600	16	188/232	77,5/62,5	0,00070	0,0508	1,0199	24
	220	400/1600	36	188/200	87/81,5	0,0028			

Примечания. 1. Машины при $U = 110$ *в* имеют защищенное исполнение с принудительной вентиляцией, при $U = 220$ *в* — защищенное исполнение с самовентиляцией. 2. Сопротивления в таблице даны при 20° С.

рис. 10-23. Но уже с 30-х годов текущего столетия стали применяться двигатели смешанного возбуждения с преобладающим последовательным возбуждением. Они позволяют легче, чем двигатели последовательного возбуждения, осуществить рекуперативное торможение состава, но несколько тяжелее и дороже последних.

Интересное изобретение специальной вольтодобавочной машины для безреостатного управления электропоездами было сделано К. И. Шенфером в 1929—1931 гг. Краткое описание этой машины дается ниже в § 11-6.

В. Машины пониженного и низкого напряжения. К числу этих машин относятся: а) генераторы для питания электролизных установок

на мощности 160—550 *квт*, 75—80 *в*, 2140—6500 *а*; б) сварочные генераторы для сварки электродугой при рабочем напряжении 25—50 *в* и различных значениях сварочного тока. Описание одного из таких генераторов, выполняемого в СССР на заводе «Электрик», приводится в § 11-6; в) генераторы для гальванопластики и гальванических покрытий на мощности 3—30 *квт*, 6—12 *в*, 250—5000 *а*; они выполняются с двумя коллекторами, которые можно соединять параллельно (для напряжения 6 *в*) или последовательно (12 *в*); г) малогабаритные машины мощностью 30—500 *вт* на напряжения 24—30 *в*, устанавливаемые на легковых и грузовых автомашинах, тракторах, самолетах и т. д.[1]

К малогабаритным двигателям следует отнести универсальные двигатели мощностью 5—55 *вт*, применяемые для самых различных целей в промышленности и в установках домашнего быта (пылесосы, мясорубки и т. п.). Двигатели имеют двухполюсное исполнение и могут работать как от сети постоянного тока на 110 *в*, так и от сети переменного тока на 127 *в*. На якоре двигателя уложена обычная обмотка якоря машины постоянного тока, присоединенная к коллектору. Магнитная система двигателя собирается из листовой электротехнической стали. На статоре уложены две обмотки возбуждения, включенные последовательно, с якорем; одна используется при питании от сети постоянного тока, другая — от сети переменного тока. Таким образом, универсальный двигатель представляет собой машину с последовательным возбуждением, соответственно чему скорость вращения этого двигателя резко уменьшается с увеличением нагрузки.

Г. Машины постоянного тока высокого напряжения. Эти машины применяются для радиоустановок в качестве генераторов. В настоящее время построен ряд таких машин мощностью от 3 до 150 *квт* на напряжения от 7,5 до 30 *кв*. Самый большой генератор этого рода выполнен на 150 *квт*, 15 *кв*, 850 *об/мин*. Генераторы высокого напряжения имеют чаще всего обычную конструкцию полюсной системы, один или два коллектора (по обе стороны якоря) и соответственно одну или две обмотки якоря, большое число пазов, скошенных на зубцовый шаг (чтобы по возможности ограничить пульсации напряжения на щетках), утолщенную изоляцию между коллекторными пластинами (до 1,5 — 2,5 *мм* ввиду того, что разность потенциалов между соседними делениями коллектора достигает в таких машинах 250 *в* и выше), специальные приспособления для защиты от кругового огня и т. д. Генераторы высокого напряжения большой мощности имеют специальную конструкцию — распределенную обмотку возбуждения, магнитные клинья в пазах и т. п. Все генераторы высокого напряжения имеют независимое возбуждение.

---

[1] Для примера приводим следующие данные одной из таких машин: двигатель параллельного возбуждения мощностью 250 *вт*, 27 *в* ± 10%, 15 *а*, 5000 *об/мин*; наружный диаметр $D_н = 97$ *мм*, $D_а = 55{,}4$ *мм*; полная длина двигателя $l_д = 161$ *мм*, $l_а = 30$ *мм*, $2p = 4$; добавочных полюсов нет, $\delta = 0{,}25$ *мм*, обмотка якоря волновая, $Z = 19$, $S = 57$, $\omega_с = 3$, $B_\delta = 0{,}48$ *вб/м²*, $A = 123$ *а/см*, $i_в = 0{,}6$ *а*; $D_к = 36$ *мм*, $l_к = 17$ *мм*, $K = 57$; $\eta = 67{,}5\%$, $G = 30$ *н*.

Д. Двигатели и генераторы предельной мощности. На предельные для машины постоянного тока мощности и средние напряжения выполняются прокатные двигатели. На меньшие мощности и те же напряжения выполняются генераторы для прокатных установок. Достаточно типичной в этом отношении является прокатная установка, выполненная заводом «Электросила» и состоящая из прокатного двигателя на 8840 *квт*, 900 *в*, 65 *об/мин* и двух генераторов по 5200 *квт*, 900 *в*, 375 *об/мин* каждый, входящих в преобразовательную установку двигателя. Предельные мощности — нормальные и повышенные — компенсированных машин постоянного тока и допускаемые в них линейные нагрузки даны на рис. 11-1 в зависимости от диаметра якоря D_a. Здесь необходимо заметить, что в схемах современных электроприводов нашли широкое применение техническая электроника, техника слабых токов, техника высокой частоты и т. д. Это делает изучение и конструирование машины большой мощности неотделимым от рабочей схемы.

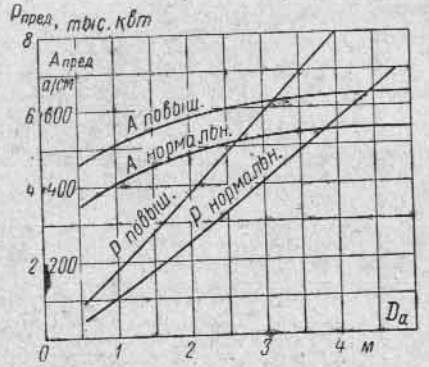


Рис. 11-1. $P_{пред}$ и $A_{пред} = f(D_a)$ компенсированных машин постоянного тока

На мощности того же порядка, но меньшие напряжения и соответственно весьма значительные токи изготовляются генераторы для электрохимической промышленности. Так, на одном из наших алюминиевых комбинатов были установлены генераторы на 4550 *квт*, 350 *в*, 13 000 *а*, 300 *об/мин*, а на другом — 10 агрегатов на 10 000 *квт*, состоящих из четырех генераторов постоянного тока по 2500 *квт* каждый. В настоящее время такие генераторы с успехом заменяются ртутными выпрямителями.

11-3. Прокатные двигатели постоянного тока [40, 47, 149—151, 165—167]

Прокатные двигатели, устанавливаемые на главных приводах станов горячей прокатки — блюмингах и слябингах, являются предельными по мощности машинами постоянного тока. Работа этих двигателей происходит в очень тяжелых эксплуатационных условиях — при частых реверсах и с большими перегрузками.

При широко внедряемом автоматическом регулировании процесса прокатки возникает стремление к ускорению процесса.

В связи с этим основными требованиями, предъявляемыми к прокатным двигателям, являются повышенная механическая прочность и уменьшенный для сокращения времени реверса маховой момент GD^2, а также высокая надежность в работе. В блюмингах США благодаря уменьшению махового момента время реверса доходит до 1,4 — 1,5 *сек*.

Отечественные прокатные двигатели последних исполнений в большинстве своем реверсивные одно- и двухъякорные.

Стремление к уменьшению махового момента влечет за собой выполнение мощных прокатных двигателей многоякорными. Хотя при этом усложняется конструкция двигателя и увеличивается его общая длина, но значительно уменьшается диаметр якорей. В практике отечественного и зарубежного электромашиностроения прокатные двигатели выполняются с числом якорей до четырех (США).

Ряд авторов указывает на целесообразность увеличения числа полюсов ради снижения махового момента и тем самым времени реверса, несмотря на то, что с этим связан рост стоимости машины.

Стремление к снижению махового момента в реверсивных прокатных двигателях привело к широкому использованию двойного привода (twin-drive) в США, Англии и многоякорных двигателей в США и Европе.

Проведенные сравнения показывают большую целесообразность применения двойного привода, а не двухъякорных двигателей.

При очень больших мощностях электроприводов для прокатных станов в США используется сочетание двойного привода и двухъякорных машин. Нижний предел целесообразности применения двойного привода ограничен механическими соображениями: его применение имеет смысл при отключающем моменте $M_{откл} \geqslant 400 \cdot 10^4$ *н·м* и номинальном моменте $M_н \approx (65 \times 2) \cdot 10^4$ *н·м*.

Номинальная скорость вращения мощных электродвигателей станов горячей прокатки мала: 40—100 *об/мин*, поэтому окружные скорости на якоре и коллекторе невелики, несмотря на большие значения диаметров.

Прокатные двигатели могут питаться от генератора постоянного тока или через выпрямительный блок от сети переменного тока. В современных схемах наиболее распространено питание прокатных двигателей пульсирующим током через статические выпрямители. Для снижения пульсаций в схему включаются сглаживающие реакторы. Ввиду того что выпрямительный блок включен по трехфазной схеме, коэффициент пульсации $k_{пул} \approx 1{,}1$, т. е. значительно ниже для прокатных двигателей, чем для тяговых двигателей. Так как прокатные двигатели питаются в основном пульсирующим током, конструкция их имеет ряд специфических особенностей — сердечники полюсов и станина выполняются шихтованными.

Существенным достоинством питания через выпрямители является возможность выбора для двигателя оптимального значения напряжения, которое лежит в пределах 600—1000 *в*.

В СССР прокатные двигатели мощностью 2500—5500 *квт* рассчитаны на напряжение 660 — 930 *в* (табл. 11-4). Фирмы США и Японии для прокатных двигателей мощностью до 5150 *квт* выбирают напряжение, равное или меньшее 800 *в* (табл. 11-5). Некоторые европейские фирмы: «Броун—Бовери», «АСЕА», «Сименс—Шуккерт» — используют для двигателей мощностью 3300 — 4500 *квт* напряжение 1100 — 1300 *в*; однако преимущества, получаемые от уменьшения тока якоря, по-видимому, не компенсируют недостатков, возникающих

Таблица 11-4

Мощность $P_н$, *квт*	Напряжение $U_н$, *в*	Ток $I_н$, *а*	Скорость вращения $n_{макс}/n_н$, *об/мин*	К. п. д. η, %	Вращающий момент $M_н$, *н·м*	Число полюсов $2p$	Маховой момент GD^2, *н·м²*
4000	930	4660	40/80	92,5	975	18	2950
4000	930	4630	50/100	92,9	780	18	2600
5500	930	6300	69/115	94	780	14	1750
2600	930	3060	40/80	91,5	633	14	1400
4000	930	4530	200/440	94,8	195	14	740
2500	660	4275	23/44	88,7	106	14	3200
3400	900	4150	—	91,15	975	20	4550

при отказе от оптимального значения напряжения, а именно снижения использования и уменьшения надежности работы двигателя.

Для установления технического уровня прокатных машин применяется ряд коэффициентов использования, критериев напряженности и оценки конструкции. Некоторые из критериев и коэффициентов те же, что и для тяговых двигателей (см. § 11-5), принадлежащих, как и прокатные двигатели, к классу регулируемых машин.

Для сопоставления использования двигателей, выполненных разными фирмами, выбраны широко применяемые в практике электромашиностроения коэффициенты $P_н\, n_{макс}$ и $P_н\, n_{макс}\, k_v$ (табл. 11-5). Как правило, коэффициент регулирования $k_v = n_{макс}/n_н$ равен примерно двум как для отечественных, так и для зарубежных прокатных двигателей.

Таблица 11-5

Фирма и страна	Мощность $P_н$, *квт*	Напряжение $U_н$, *в*	Номинальный момент $M_н$, *н·м*	Масса двигателя G, *кг*	Маховой момент $GD^2 \cdot 10^{-1}$, *н·м²*	$n_{макс}/n_н$, *об/мин*	$\frac{G}{M_н}$	$P_н n_{макс}$	$P_н n_{макс} k_v$
«Инглиш Электрик» (EE), Великобритания	3000	1000	—	—	—	—	—	0,36	0,72
То же	3570	—	645	—	—	140/54	—	0,5	1,3
»	7740	—	1680	—	—	80/45	—	0,62	1,1
«Сименс — Шуккерт» (SSW), ФРГ	3370	1200	730	160	157	100/45	2,2	0,405	0,9
То же	4120	1200	890	180	220	—	2,02	0,412	0,915
«АЕГ» (AEG), ФРГ	4630	950	1000	—	270	100/45	—	0,463	1,34
«Дженерал Электрик» (GE), США	4420	600	344	—	—	250/125	—	1,105	2,21
«Вестингауз» (Westinghouse, США	3680	700	348	—	—	200/100	—	0,736	1,472
То же	4420	800	1075	—	—	80/40	—	0,354	0,708
»	5890	700	328	—	—	450/175	—	2,65	6,8
«Инланд Стейт К°» (Inland State C[ie])	4420	750	1075	—	—	80/40	—	0,354	0,708
То же	5150	700	1000	—	—	120/50	—	0,617	1,48
«Броун—Бовери» (BBC), Швейцария	3080	—	1000	—	—	60/30	—	0,175	0,35
То же	3780	1100	915	—	280	100/40	—	0,378	0,945
СССР	4500	1000	730	148	180	100/60	2,03	0,45	0,75
«АСЕА» (ASEA), Швеция	1840	1200	51,5	—	—	700/350	—	1,29	2,58
То же	3000	900	730	137	128,5	100/40	1,88	0,337	0,842
»	3330	1000	578	172	—	150/56	2,24	0,5	1,34
»	3980	1130	860	—	180	90/45	—	0,358	0,716
Япония	3350	2×460	653	—	—	120/50	—	0,402	0,964

В современных высокоиспользованных прокатных двигателях предельно допустимы следующие значения нагрузок и критериев:

Магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ	1,0 *тл*
Максимальная индукция в зубцах якоря $B_{z\,макс}$	$\leqslant$ 2,4 *тл*
Линейная нагрузка на якоре A	500—600 *а/см*
Фактор нагрева Aja	$\leqslant$ 3000
Реактивная э. д. с. e_r	8—9 *в*
Полюсное деление на якоре τ	50—70 *см*

В литературе [150, 151, 167] имеются указания, что для двигателей большой мощности специальной конструкции может быть допущена величина реактивной э. д. с. до 12 *в*, а максимальное значение среднего напряжения между соседними коллекторными пластинами — до 20 *в*.

С целью улучшения коммутации в мощных прокатных двигателях американские фирмы применяют щеткодержатели с автоматически регулируемым постоянным нажатием на коллектор. Применение независимой вентиляции с замкнутым циклом способствует повышению использования двигателей.

Для характеристики крупных одноякорных прокатных двигателей укажем, что при мощности порядка 10500 — 11000 *квт* и коэффициенте регулирования $k_v = 1{,}4$ вращающий момент равен $(145 \div 150) \cdot 10^4$ *н·м*., диаметр и длина якоря соответственно равны 370—380 *см* и 160—170 *см*.

Надо подчеркнуть, что выбор двигателя для прокатных станов не может базироваться исключительно на величине требуемого номинального момента, нужно также учитывать возможность возникновения недопустимых величин перегревов.

В Европе мощные прокатные двигатели в основном изготовляются фирмами «Броун—Бовери», «Сименс—Шуккерт», «АЕГ» и «АСЕА», в США — фирмами «Дженерал Электрик» и «Вестингауз». Большое число мощных прокатных установок появилось за последние годы в Японии.

11-4. Машины постоянного тока с гладким якорем

К машинам постоянного тока в связи с интенсивным развитием различных отраслей промышленности предъявляются все более жесткие требования. Основными из них являются: быстродействие, максимальная точность регулирования скорости, высокая коммутационная надежность.

Повышение быстродействия осуществляется при уменьшении постоянной времени обмотки якоря $T = L/R$ путем снижения ее индуктивности и уменьшения динамического тормозного момента, пропорционального маховому моменту якоря. Уменьшения махового момента

можно добиться за счет снижения диаметра якоря и увеличения его длины, но с удлинением якоря индуктивность его обмотки возрастает, вследствие чего ухудшается коммутация. Устранить это противоречие в машинах обычного исполнения затруднительно.

Поставленную задачу можно успешно решить, применяя гладкий якорь, расположение обмотки которого снаружи стального сердечника приводит к значительному увеличению длины магнитных силовых линий потоков рассеяния коммутируемых секций. При уменьшении потоков рассеяния и, следовательно, индуктивности снижается величина реактивной э. д. с., характеризующей в основном коммутационную надежность машины. Благодаря большему запасу по коммутации возможен переход к новым размерам якоря с меньшим маховым моментом.

Ввиду отсутствия зубцовых пульсаций, в двигателе с гладким якорем практически отсутствуют пульсации главного магнитного потока. Это свойство особенно важно при эксплуатации электродвигателей на малых скоростях. Якорь может быть остановлен в любом положении, что очень ценно при использовании машин с гладким якорем в сервомеханизмах.

Целесообразность применения гладкого якоря обусловлена в машинах малой мощности улучшением их характеристик, а в крупных машинах постоянного тока — обеспечением достаточной коммутационной надежности и улучшением потенциальных условий на коллекторе.

Первые гладкие якоря были изготовлены по предложению Гефнера—Альтенека в 1872 г., однако из-за трудностей, связанных с необходимостью надежного закрепления обмотки на гладком сердечнике, от этой конструкции вынуждены были отказаться. В последнее время благодаря появлению новых материалов (лаки, компаунды, пластмассы) с высокими электроизоляционными и механическими свойствами появилась возможность вновь вернуться к проблеме изготовления беспазовых машин.

В нашей стране изготовлены опытные и промышленные образцы крупных машин постоянного тока с гладким якорем. На Рижском электромашиностроительном заводе был создан опытный двигатель с гладким якорем мощностью 200 *квт*. Испытания показали, что индуктивность якорной обмотки уменьшается примерно на 30—40%, а зона безыскровой работы в некомпенсированном двигателе расширяется в 2—3 раза по сравнению с машиной обычного исполнения, имеющей компенсационную обмотку. Улучшаются потенциальные условия на коллекторе из-за увеличенного воздушного зазора, свойственного машинам с гладким якорем; значительно уменьшается искажающее влияние поля реакции якоря на основное поле.

На Новочеркасском электровозостроительном заводе разработаны и изготовлены тяговые двигатели с гладкими якорями мощностью 810 и 790 *квт*. На Харьковском заводе «Электротяжмаш» создан опытный образец крупной машины постоянного тока с гладким якорем, служащий прототипом машин предельной мощности.

Для конструкции электрических машин с гладкими якорями характерна в первую очередь специфичность крепления обмотки на сердечнике. В настоящее время существуют два основных направления в области конструирования обмоток гладких якорей:

1) крепление обмотки непосредственно на изолированном сердечнике;

2) крепление обмотки в пластмассовом слое, расположенном на сердечнике.

При первом способе крепления на изолированный сердечник впритык укладываются пропитанные эпоксидной смолой секции якорной обмотки, которые закрепляются с помощью бандажной стеклоленты. Эта конструкция не позволяет осуществить радиальную систему вентиляции, и поэтому ее применяют лишь в относительно коротких машинах.

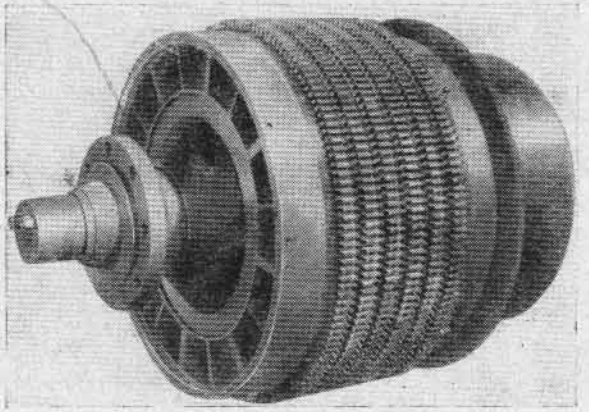


Рис. 11-2. Гладкий якорь с пластмассовыми сегментами до укладки обмотки

При втором способе крепления на гладкой поверхности сердечника якоря, который может быть разделен на пакеты, устанавливаются пластмассовые сегменты, в пазы которых укладывается обмотка. Благодаря возможности осуществления радиальной системы вентиляции целесообразно применение этой конструкции при создании крупных и предельных по мощности машин. Сердечник якоря крупной машины описываемой конструкции с закрепленными изоляционными сегментами до укладки обмотки и якорь с уложенной и закрепленной бандажами обмоткой показаны соответственно на рис. 11-2 и 11-3.

Проводники обмотки гладкого якоря, лишенные экранирующего действия стальных зубцов, все время пересекают полный магнитный поток. В тот момент, когда проводники находятся в неоднородном магнитном поле, т. е. в боковом потоке главных или добавочных полюсов, в них наводятся значительные по величине вихревые токи, обусловливающие добавочные потери. Эти потери могут оказаться соизмеримыми с основными потерями в меди, а в некоторых случаях даже превзойти их, если не принять мер по их уменьшению.

Эффективным способом уменьшения добавочных потерь, вызываемых нормальными составляющими полей главных и добавочных полюсов, является разделение проводников по ширине, а вызываемых тангенциальными составляющими — разделение проводников по высоте либо изменение конфигурации поля в зазоре, для чего главные полюсы должны иметь на краях скос полюсных башмаков.

Ввиду большого воздушного зазора в машинах с гладкими якорями в ряде случаев существенно (в два и более раза) увеличивается н. с. главных полюсов по сравнению с аналогичной н. с. в машинах с зубчатыми якорями. К одной из главных проблем, возникающих при изготовлении машин с гладкими якорями, относится создание

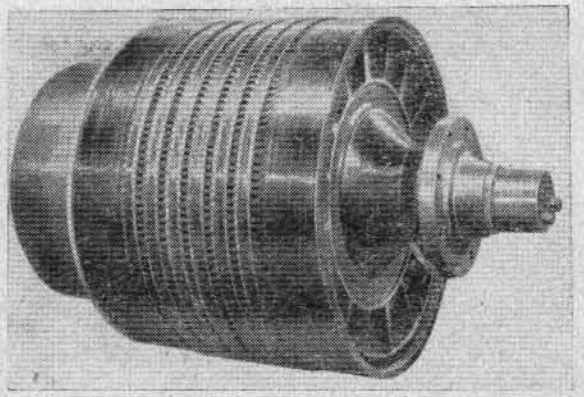


Рис. 11-3. Гладкий якорь с пластмассовыми сегментами и уложенной и закрепленной бандажами обмоткой

обмотки возбуждения, обеспечивающей большую н. с. при ограниченных габаритах. Достоинством увеличенного воздушного зазора является то, что в несколько раз уменьшается размагничивающее действие реакции якоря на поле главных полюсов. Это свойство машин с гладкими якорями особенно важно при работе с ослабленным полем.

Проведенные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы позволили прийти к следующим выводам:

1) возможно создание уже в настоящее время тягового двигателя с гладким якорем мощностью 900—1000 *квт*;

2) при отсутствии компенсационной обмотки в тяговых двигателях могут быть обеспечены допустимые потенциальные условия на коллекторе при номинальной мощности и максимальной скорости в стационарных и переходных режимах;

3) масса двигателя с гладким и зубчатым якорем примерно одинакова;

4) перегрев обмотки гладкого якоря не выше, чем перегрев обмотки зубчатого якоря, при одинаковых нагрузках.

Наиболее целесообразной областью применения двигателей с гладкими якорями являются приводы, работающие с широким регулированием скорости и нагрузки, как, например, прокатные станы, подъемно-транспортные устройства.

Используя современную технологию и новые изоляционные материалы, можно выполнить двигатели с гладкими якорями, вполне сопоставимые по своим технико-экономическим показателям с машинами обычного исполнения.

11-5. Тяговые двигатели пульсирующего тока [16, 20, 152, 155—159, 162, 164]

Особенностью этого типа двигателей является то, что они питаются от сети переменного тока через выпрямительный блок. В связи с этим пульсации напряжения и тока получаются значительно большими, чем в двигателях постоянного тока нормальной конструкции.

Выпрямленное напряжение, кроме постоянной составляющей, содержит высшие гармонические, среди которых особое значение приобретает вторая гармоническая. В основном ею и определяется пульсирующий характер тока двигателя.

Величина пульсаций оценивается коэффициентом пульсаций (рис. 11-4)

$$k_{пул} = \frac{I_{макс} - I_{мин}}{I_{макс} + I_{мин}},$$

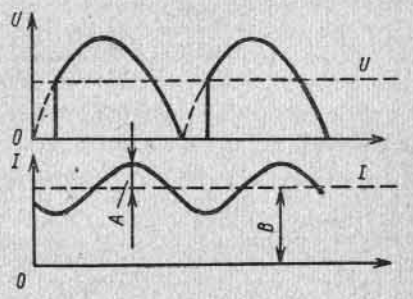


Рис. 11-4. Определение коэффициента пульсаций напряжения и тока

где $I_{макс}$ — максимальное значение тока; $I_{мин}$ — минимальное значение тока.

При условии выполнения двигателей пульсирующего тока специальной конструкции и включения в сеть через дополнительную аппаратуру — сглаживающий реактор (рис. 11-5) — можно допустить величину коэффициента пульсаций до 30%.

Двигатели пульсирующего тока должны выполняться с шихтованными добавочными полюсами и ярмом, между добавочными полюсами и ярмом предусматривается дополнительный зазор. Назначение дополнительного зазора заключается в том, чтобы поток добавочных полюсов совпадал по фазе с током якоря и соответствовал ему. При этом улучшаются условия протекания процесса коммутации в секциях якоря.

Для снижения пульсаций напряжения последовательно с двигателем пульсирующего тока в сеть включается сглаживающий реактор с высоким значением индуктивности. Благодаря этому ограничивается пульсация главного потока; величина трансформаторной э. д. с. $E_{тр} = 4{,}44\, f\Phi w$, индуктируемой этим потоком в коммутируемой секции,

становится ничтожно малой. Уменьшение э. д. с. $E_{тр}$ благоприятно влияет на протекание процесса коммутации.

При высоком значении индуктивности сглаживающего реактора можно упростить конструкцию двигателя пульсирующего тока и выполнять его ярмо из массивной стали, т. е. как для машин постоянного тока.

Однако несмотря на указанные выше меры, улучшающие условия работы двигателей пульсирующего тока, последние вследствие наличия высших гармонических имеют ухудшенную коммутацию и повышенный нагрев по сравнению с двигателями постоянного тока. Ухудшение коммутации может быть на 1—1½ класса шкалы ГОСТ 183—66. Увеличенный нагрев возникает не только в активных, но и в конструктивных частях двигателя.

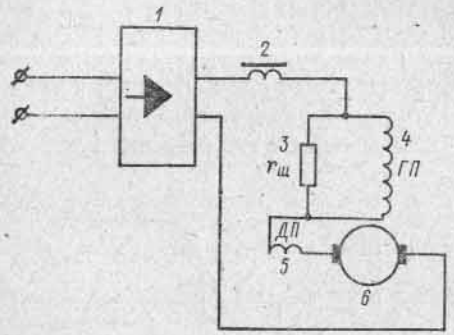


Рис. 11-5. Схема включения тягового двигателя пульсирующего тока в сеть

1 — выпрямительный блок; *2* — сглаживающий реактор; *3* — активное сопротивление, шунтирующее обмотку главных полюсов; *4* — обмотка главных полюсов *ГП*, *5* — обмотка добавочных полюсов *ДП*; *6* — якорь тягового двигателя

Еще одним существенным недостатком двигателя пульсирующего тока являются более напряженные потенциальные условия на коллекторе, которые способствуют возникновению перебросов искр с одной пластины на другую и кругового огня на коллекторе.

Уменьшение недостатков двигателей пульсирующего тока возможно лишь за счет увеличения габаритов сглаживающего реактора, усложнения конструкции и утяжеления самого двигателя. Однако для большинства установок увеличение массы и габаритов оказывается недопустимым, а потому приходится искать оптимальный вариант, т. е. при максимально допустимом $k_{пул}$ с технико-экономической точки зрения.

В настоящее время наибольшее применение двигатели пульсирующего тока находят при электрификации железных дорог на наиболее прогрессивной системе электрической тяги — на однофазном токе повышенного напряжения промышленной частоты. Эта система тяги принята в качестве основной для СССР, Франции, Великобритании, Японии, Индии и ряда других стран.

В СССР при электрификации железных дорог на переменном токе напряжение в контактном проводе равно 25 *кв* при частоте 50 *гц*.

На электроподвижном составе железных дорог, т. е. на электровозах и мотор-вагонных секциях, устанавливается понижающий трансформатор с регулированием напряжения и выпрямительный блок, состоящий из кремниевых диодов. Тяговые двигатели получают питание из контактной сети через выпрямительный блок.

Как правило, тяговые двигатели пульсирующего тока выполняются с последовательным возбуждением (рис. 11-5). Обмотка главных полюсов шунтируется постоянно включенным активным сопротивлением, через которое проходит переменная составляющая тока; благодаря этому резко снижаются пульсации тока возбуждения и потока главных полюсов. Значение коэффициента шунтирования по постоянному току $k_{ш.п.} = i_в/I_a$ обычно лежит в пределах 0,85 — 0,95.

Пуск тяговых двигателей осуществляется за счет постепенного увеличения напряжения на трансформаторе.

Тяговые двигатели должны удовлетворять следующим основным требованиям: а) соответствовать заданным характеристикам электроподвижного состава железных дорог; б) иметь высокое использование, т. е. малые габариты и массу, при высокой надежности работы во всех режимах.

Основные данные тяговых двигателей задаются для часового и длительного режимов. В современных тяговых двигателях ток в часовом режиме всего на 4—5% больше, чем в длительном режиме. Большое значение имеют режим пуска и, особенно, режим работы при максимальной скорости, поскольку увеличение скоростей движения является первоочередной задачей для железных дорог во всем мире.

Кроме значений мощности, напряжения, вращающего момента, работа тягового двигателя может быть оценена рядом коэффициентов, характеризующих режим максимальной скорости $v_{макс}$: коэффициентом регулирования скорости $k_v = v_{макс}/v_н$ и коэффициентом использования мощности $k_p = P_v/P_н$, где P_v — мощность в режиме максимальной скорости.

Использование тягового двигателя может быть оценено следующими коэффициентами: $g_p = G/P_\infty$; $g_M = G/M_\infty$; $\varepsilon = G/M_\infty^{3/4}$; $\xi = \frac{P_\infty}{G}\frac{n_{макс}}{n_\infty} = \frac{P_\infty}{G}k_v$ — коэффициентом Болдвина. Здесь G — масса тягового двигателя.

Высокое использование тягового двигателя лимитируется главным образом коммутационной и потенциальной напряженностью, т. е. допустимыми значениями реактивной э. д. с. e_r, индуктированной в коммутируемой секции, напряжением между соседними коллекторными пластинами и градиентом потенциала на коллекторе.

Среднее значение реактивной э. д. с.

$$e_r = 2lv\omega A\Sigma\lambda. \qquad (11\text{-}1)$$

Ограничение e_r достигается за счет: выбора конфигурации пазов якоря (уменьшение отношения высоты паза к его ширине), что приводит к снижению величины $\Sigma\lambda$; уменьшения длины якоря и выполнения секций якоря из одного витка ($\omega = 1$). Иногда уменьшение e_r осуществляется за счет уменьшения индуктивности в обмотке якоря путем применения пазовых глушителей (демпферов) (см. § 5-10).

Для тяговых двигателей пульсирующего тока, имеющих высокую коммутационную напряженность, предельное среднее значение реактивной э. д. с. e_r в самом тяжелом режиме не должно превышать 9—10 *в*. Этот режим соответствует выходу двигателя на тяговую ха-

рактеристику при максимальном ослаблении поля полюсов, номинальном напряжении и токе якоря, отвечающих длительному режиму (рис. 11-6). Регулирование скорости тягового двигателя пульсирующего тока (также и постоянного тока) осуществляется за счет шунтирования обмотки возбуждения. У двигателей пульсирующего тока ослабление поля доходит до 50%. Регулирование скорости за счет ослабления поля позволяет облегчить условия работы трансформатора и уменьшить его размеры.

О потенциальных условиях на коллекторе тягового двигателя лучше всего можно судить по величине среднего градиента потенциала

$$\varepsilon_{к.\,ср} = U_{к.\,ср}/t_к, \quad (11\text{-}2)$$

где $t_к = \pi D_к/K$ — коллекторное деление; $U_{к.\,ср} = U_н \cdot 2p/K$; $D_к$ — диаметр коллектора; K — число коллекторных пластин.

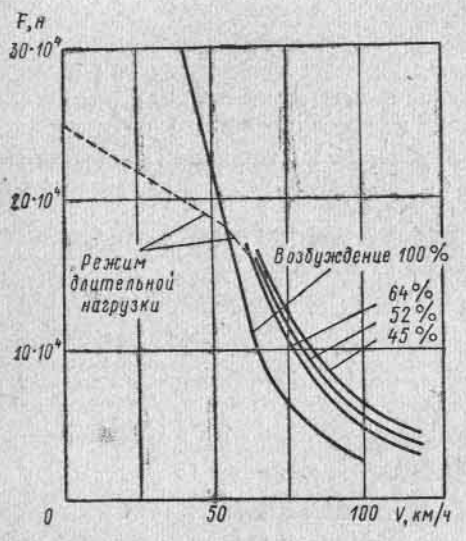


Рис. 11-6. Тяговые характеристики двигателя пульсирующего тока

При отсутствии компенсационной обмотки средний градиент потенциала не должен превышать 30 *в/см*.

Существенно улучшаются потенциальные условия при применении компенсационной обмотки, шихтованной станины и расслоенных щеток. В двигателе пульсирующего тока с компенсационной обмоткой допустима величина $\varepsilon_{к.\,ср} \leqslant 45 в/см$, поэтому высокоиспользованные тяговые двигатели выполняются в настоящее время всеми фирмами в основном с компенсационной обмоткой.

Весьма ценным свойством тяговых двигателей пульсирующего тока является свободный выбор номинального напряжения — это благоприятно сказывается на улучшении использования двигателя.

Оптимальное значение напряжения для электровозных двигателей зависит от мощности двигателя, весьма распространенным значениям мощности 850—900 *квт* соответствует напряжение 900—950 *в*. Важен также правильный выбор числа полюсов двигателя; так, при числе полюсов $2p = 6$ из-за меньшего сечения станины масса двигателя снижается.

Шестиполюсное исполнение тяговых двигателей возможно при номинальном напряжении не менее 900—1000 *в*. Поскольку тяговые двигатели должны иметь высокое использование и малые габариты, электромагнитные и механические нагрузки выбираются предельными для этого класса машин.

Ниже приводятся соответствующие значения основных параметров:

Линейная нагрузка A	550—650 *а/см*
Индукция в зазоре B_δ	0,9—1,0 *тл*
Фактор нагрева AJa	2500—4000
Максимальная скорость на окружности якоря $v_{а\,макс}$	60—70 *м/сек*
Максимальная скорость на коллекторе $v_{к.\,макс}$	54—56 *м/сек*

При этом технико-экономические показатели и машинная постоянная для длительного режима работы равны: $g_p = 3{,}5 \div 3{,}6$; $g_M = 2{,}7$; $\varepsilon = 17{,}5 \div 18$; $\xi = 0{,}51 \div 0{,}53$; $C_A = (14 \div 15) \cdot 10^4$.

Для повышения надежности работы тяговых двигателей существенное значение имеет то, что двигатель включается в сеть через трансформатор, т. е. лучше защищен от перенапряжений в сети.

За последние годы во Франции широкое распространение получила конструкция локомотивов с передачей от одного тягового двигателя на две или три оси; таким образом выполняются электровозы и тепловозы с электропередачей. Мощность тягового двигателя при этом увеличивается до 1500—2000 *квт*.

Другим направлением в развитии современного тягового электромашиностроения является выполнение так называемых многосистемных локомотивов, т. е. предназначенных для работы при различных системах тяги. Такие электровозы способствуют увеличению скорости движения, поскольку сокращается время остановок поезда.

В ряде стран имеется по две системы тяги, более всего распространены четыре системы электрической тяги:

1. Однофазный ток повышенного напряжения (20—25 *кв*), промышленной частоты (50 или 60 *гц*).
2. Однофазный ток повышенного напряжения (11—15 *кв*), пониженной частоты ($16^2/_3$ или 25 *гц*).
3. Постоянный ток с напряжением 3 *кв* в контактной сети.
4. Постоянный ток с напряжением 1,5 *кв* в контактной сети.

В СССР железные дороги электрифицированы на системах тяги по пп. 1 и 3. В связи с этим на Новочеркасском электровозостроительном заводе, кроме электровозов переменного и постоянного тока, строятся электровозы двойного тока. Французскими и швейцарскими фирмами выполняются трех- и даже четырехсистемные электровозы, которые могут вести составы через ряд стран европейского континента, имеющих различные системы тяги. Отличительной особенностью таких электровозов является то, что тяговые двигатели обязательно выполняются на напряжение 1,5 *кв* (чтобы удовлетворить требованиям систем тяги на постоянном токе). Почти всегда от одного тягового двигателя большой мощности осуществляется передача на две или три оси тележки локомотива.

В табл. 11-6 и 11-7 приведены данные современных тяговых двигателей, изготовляемых зарубежными передовыми фирмами для одно- и многосистемных электровозов.

Таблица 11-6

Показатель	Тип двигателя							
	ТАО-649	GB-317/23a	MG-710A	ТО-136[8]	ТАО-646	AL-446 iP	SW-435	GE-752
Фирма-изготовитель . .	«Альстом» (Alsthom)	«Сименс—Шуккерт» (Siemens Schuckert)	«Альстом»	«Альстом»	«Альстом»	Завод им. Ленина	«Шнейдер Вестингауз» (Schneider Westinghouse)	«Дженерал Электрик» (GE)
Страна, где эксплуатируется электровоз . .	СССР	СССР	Индия	Франция	Франция	СССР	Франция	США
Число полюсов $2p$ . . .	6	6	4	6	8	6	6	4
Режим длительной нагрузки:								
Мощность P_∞, *квт* . .	760	725	535	905	1290	—	618	594
Напряжение U_∞, *в* . .	750	1110	1250	920	1100	—	675	600
Ток I_∞, *а*	1080	685	460	1040	1250	—	1000	1080
Скорость вращения n_∞, *об/мин*	910	870	1020	1080	765	—	870	765
Вращающий момент M_∞, *н·м*	8150	8120	5110	8100	16 300	—	6900	7570
К. п. д. η, %	93,8	94,65	93	94,6	93,3	—	91,5	91
Часовой режим:								
Мощность $P_ч$, *квт* . .	790	825	557	970	1330	750	662	—
Ток $I_ч$, *а*	1135	785	478	1120	1285	1080	1080	—
Скорость вращения $n_ч$, *об/мин*	890	845	1000	1060	760	900	850	—
Вращающий момент, $M_ч$, н·м	928	954	930	946	938	—	908	—

316

Продолжение

Показатель	Тип двигателя							
	ТАО-649	GB-317/23a	MG-710A	ТО-136[8]	ТАО-646	AL-446 iP	SW-435	GE-752
Режим пуска:								
Пусковой ток $I_п$, *а* . .	1500	—	700	1900	1933	—	1370	—
Пусковой момент $M_п$, *н·м*	12 460	13 150	9050	17 100	27 300	—	9300	—
Режим максимальной скорости:								
Скорость вращения $n_{макс}$, *об/мин*	1970	1810	2200	2030	1350	1800	2200	2280
Мощность P_v, *квт* . .	454	560	347	—	—	—	—	167
Коэффициенты, характеризующие использование двигателя:								
Масса двигателя G, *кг*	3270	—	2750	3760	4550	—	3030	3550
Машинная постоянная Арнольда $C=\frac{D_a^2 l_a n_\infty}{U_\infty I_\infty}$	16,8	16,7	16,4	14,8	13,3	—	15,0	11,15
Относительная масса $g_p = G/P_\infty$, *кг/квт* . .	5,07	—	5,13	4,17	3,52	—	4,9	5,55
Постоянная Болдвина $\xi=\frac{P_\infty}{G}\frac{n_{макс}}{n_\infty}$	0,415	—	0,42	0,45	0,5	—	0,518	0,538
Коэффициент регулирования $k_v = n_{макс}/n_\infty$	2,18	2,01	2,16	1,86	1,86	2,0	2,55	2,98
Коэффициент использования мощности $k_p = P_v/P_\infty$	0,6	0,77	0,65	—	—	—	—	0,274

317

Таблица 11-7

Показатель	Тип двигателя							
	ТАО-649	GB-317/23a	MG-710A	ТО-136	ТАО-646	AL-446 4P	SW-435	GE-752
Диаметр якоря D_a, *мм*	620	620	500	620	930	710	534	496
Длина якоря l_a, *мм*	390	380	370	340	280	350	407	384
Число пазов Z	87	99	71	57	116	87	51	62
Максимальная скорость на якоре $v_{a\,макс}$, *м/сек*	54,9	58,8	57,6	65,9	68,2	67,0	63,0	58,7
Диаметр коллектора $D_к$, *мм*	462	540	395	520	672	570	438	426
Число коллекторных пластин K	261	396	212	342	464	261	306	186
Максимальная скорость на коллекторе $v_{к.\,макс}$, *м/сек*	40,9	51,15	45,6	55,3	50	53,7	51,7	50,3
Наличие компенсационной обмотки	Нет	Есть	Нет	Есть	Нет	Нет	Нет	Нет
Внешний диаметр статора D_c, *мм*	965	842	770	1025	—	—	875	810
Индукция в зазоре B_δ, *тл*	1,11	—	0,81	0,98	—	1,1	1,03	1,095
Индукция в зубцах якоря $B_{z_1/3}$, *тл*	2,12	—	2,155	2,15	—	—	2,22	2,46
Линейная нагрузка $A\cdot10^{-2}$, *а/м*	506	535	624	656	510	422	658	645
Плотность тока в обмотке якоря j_a, *а/мм²*	6,83	5,7	4,86	6,85	—	6,1	6,7	6,1
Фактор нагрева Aja	3300	3050	3030	4500	—	2570	4410	4570
Реактивная э. д. с. по Цорну e_r, *в*	7,2	7,35	—	8,01	—	3,93	6,53	—
Среднее межламельное напряжение $U_{к.\,ср}$, *в*	17,2	16,65	—	16,2	19	17,3	13,2	—

11-6. Специальные машины постоянного тока [121—124]

А. Униполярная машина. Идея униполярной, или бесколлекторной машины постоянного тока поясняется на рис. 11-7. Можно себе представить, что диск, вращающийся в магнитном поле магнита N—S, состоит из ряда секторов, один из которых показан на рисунке штриховой линией. Каждый такой сектор можно рассматривать как проводник, вершина которого находится на оси диска, а основание — на его периферии. Применяя правило правой ладони, находим, что в этом проводнике наводится э. д. с., имеющая все время одно направление — в нашем случае от оси диска к его периферии. То же можно повторить и относительно любого другого проводника, который при вращении диска придет на смену данному. Между щетками, установленными на валу и на периферии диска, появится постоянная по направлению разность потенциалов и возникнет постоянный ток, если замкнуть щетки на какую-нибудь внешнюю цепь.

Эта основная идея получила известное развитие в первом десятилетии текущего столетия в связи с попытками обойти коммутационные затруднения, становившиеся все более острыми по мере роста требований, предъявляемых к машине постоянного тока.

При конструировании униполярных генераторов большие затруднения возникают в связи с необходимостью снятия посредством скользящего контакта весьма больших токов при низких рабочих напряжениях. Эта задача решается сейчас путем применения контакта из жидкого металла (сода и поташ), циркулирующего между неподвижной и вращающейся частями токосъемного аппарата. В США построен униполярный генератор мощностью 10 000 *квт*, 67 *в*, 150 000 *а*, 3600 *об/мин*.

В СССР была разработана в 1939 г. униполярная машина системы инженера Б. В. Костина, давшая при испытании генератора мощностью 7,5 *квт*, 3 *в*, 2500 *а*, 4000 *об/мин* достаточно благоприятные результаты.

В настоящее время униполярная индукция используется также в разрабатываемых магнитогидродинамических (МГД) генераторах. В этих генераторах вместо движущегося проводника, в котором постоянным по направлению полем индуктируется э. д. с., используется поток раскаленных ионизированных газов — так называемая плазма.

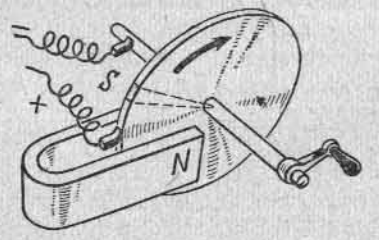


Рис. 11-7. Принцип униполярной машины

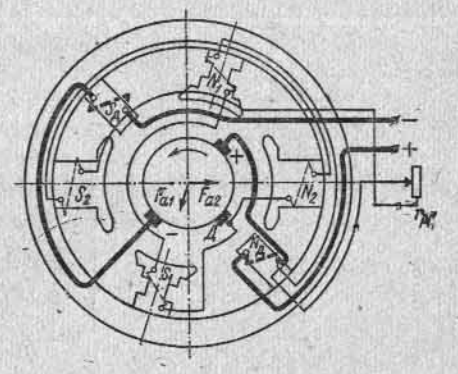


Рис. 11-8. Сварочный генератор завода «Электрик»

Б. Сварочный генератор завода «Электрик». Сварочные генераторы должны удовлетворять следующим основным требованиям: а) выдерживать режим короткого замыкания, которое имеет место при работе сварщика в момент замыкания электродов накоротко (например, в момент зажигания дуги); б) обеспечивать более или менее постоянную величину тока при переменном сопротивлении дуги (переменная длина дуги). Выполнение поставленных условий достигается тем, что внешняя характеристика сварочного генератора имеет сильно падающий характер. Для получения указанной характеристики используются сварочные генераторы различных типов. В СССР заводом «Электрик» освоено массовое производство сварочных генераторов с так называемой третьей щеткой.

Принципиальная схема модернизированного сварочного генератора типа ПС-300М показана на рис. 11-8. Номинальные данные генератора: $U_н = 35$ *в*, $n = 1450$ *об/мин*, $I = 260$ *а* при продолжительности работы ПР = 100% и $I = 340$ *а* при ПР = 65% (здесь за 100% принимается полное время работы, включая паузы). Якорь генера-

тора выполняется обычным образом. Магнитная система состоит из четырех основных полюсов и двух добавочных. Основные полюсы N_1—S_1, несколько смещенные относительно вертикали и имеющие вырезы для увеличения их магнитного насыщения, называются главными, полюсы N_2 — S_2, расположенные по горизонтали, называются поперечными. Обмотки возбуждения главных и поперечных полюсов включаются каждая параллельно между положительной щеткой и дополнительной щеткой $Д$ таким образом, чтобы два рядом стоящих основных полюса — один главный и один поперечный — имели одну полярность.

Следовательно, машина является как бы двухполюсной, в которой каждый полюс расщеплен на две части. Регулирование тока возбуждения производится только в цепи обмотки возбуждения поперечных полюсов посредством реостата $r_{рг}$. При нагрузке возникает н. с. реакции якоря, которая может быть разложена по осям главных и поперечных полюсов на составляющие: F_{a1}, намагничивающую главные полюсы, и F_{a2}, размагничивающую поперечные полюсы. Намагничивающее действие н. с. F_{a1} мало сказывается на главных полюсах, так как они благодаря имеющимся в них вырезам сильно насыщены. Поэтому напряжение, приложенное к обмотке возбуждения и обусловленное преимущественно главными полюсами, мало изменяется с изменением нагрузки. Наоборот, при увеличении нагрузочного тока I н. с. F_{a2} сильно размагничивает поперечные полюсы. Этим достигается необходимая для сварки падающая форма внешней характеристики рассматриваемого генератора (рис. 11-9). Пределы регулирования сварочного тока 80—400 $а$.

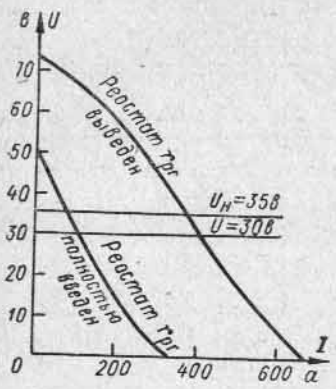


Рис. 11-9. Внешние характеристики сварочного генератора завода «Электрик»

В. Возбудители для синхронных турбогенераторов. Синхронные машины, и в частности синхронные турбогенераторы, возбуждаются постоянным током. Источником питания является возбудитель, который представляет собой генератор постоянного тока, имеющий ряд специальных характеристик. Якорь возбудителя располагают чаще всего на выступающем конце вала вращающейся части (ротора) турбогенератора, но в единицах очень большой мощности возбудитель выполняется в виде отдельной машины, сопрягаемой с ротором турбогенератора посредством муфты. В обоих случаях возбудитель является высокоскоростной машиной, поскольку выполняемые в СССР турбогенераторы вращаются со скоростью 3000 *об/мин*. Такая машина, чувствительная к вибрациям, работает в тяжелых коммутационных условиях и нуждается в усиленной вентиляции. Возбудитель улучшенной конструкции с номинальными данными 300 *квт*, 400 *в*, 750 *а*, 3000 *об/мин* был разработан на заводе «Электросила» для турбогенератора мощностью 100 000 *квт* с водородным охлаждением. Возбудитель представляет собой четырехполюсную машину в закрытом исполнении и имеет добавочные полюсы и компенсационную обмотку. На якоре возбудителя уложена простая петлевая обмотка с уравнителями. Крепление лобовых частей обмотки осуществляется с помощью массивных бронзовых бандажей. Коллектор имеет значительную длину и крепится с помощью колец.

Возбудитель имеет независимое возбуждение от особого подвозбудителя мощностью 1,5/6 *квт*, 115 *в*, 13/52 *а*, причем верхние цифры соответствуют длительной работе возбудителя, нижние — переходным режимам его работы.

Вентиляция возбудителя, включая подвозбудитель, осуществляется по замкнутому циклу, для чего в фундаментной плите предусмотрены две камеры с воздухоохладителями.

Для устранения передачи вибраций возбудитель выполнен в виде отдельной машины на стояковых подшипниках скольжения и соединен с ротором турбогенератора с помощью эластичной муфты.

Продольный и поперечный разрезы описанного возбудителя показаны на рис. 11-10а и 11-10б. Основные расчетные данные возбудителя: $D_а = 440$ *мм*, $l_а = 310$ *мм*, $D_к = 300$ *мм*, $l_к = 380$ *мм*, размеры фундаментной плиты 2550 × 1200 *мм*, полная высота возбудителя, включая высоту плиты, 1480 *мм*.

Г. Электромашинный усилитель (ЭМУ) [136—144]. Электромашинный усилитель принадлежит к числу машин, в которых используется поперечная реакция якоря. В настоящее время ЭМУ широко применяется в самых различных системах электрифицированных приводов с непрерывным управлением. Такой усилитель выполняет роль автоматического непрерывно действующего регулятора одной или нескольких величин, определяющих работу электропривода: напряжения, тока, скорости вращения и т. д.

Принципиальная схема ЭМУ изображена на рис. 11-11. На коллектор обычного якоря машины постоянного тока наложены две пары щеток: щетки по продольной оси *Я1—Я2* и щетки по поперечной оси *Я3—Я4*, замкнутые накоротко. На статоре расположены: а) две или в общем случае несколько обмоток управления *У*, одна из которых служит для создания потока возбуждения $Ф_1$, а другая (или другие) включается в цепь, откуда мы хотим получить сигнал, воздействующий на работу усилителя; б) компенсационная обмотка *КО*, которая должна по возможности полно компенсировать н. с. якоря по продольной оси, создаваемую током I_3; в) обмотка добавочных полюсов по продольной оси (по поперечной оси добавочных полюсов обычно не ставят); г) последовательная обмотка *ПО*, которую часто включают в короткозамкнутый контур и которая действует по поперечной оси.

Из конструктивных соображений статору ЭМУ придают специальную форму, как это для примера показано на рис. 11-12.

Принцип работы ЭМУ состоит в следующем. Подведем к обмотке *У1* небольшую мощность $P_1 = U_1 I_1$ и создадим поток $Ф_1$. При вращении якоря в этом потоке в цепи короткозамкнутых щеток *Я3—Я4* возникает небольшая э. д. с. E_2, которая тем не менее создает значи-

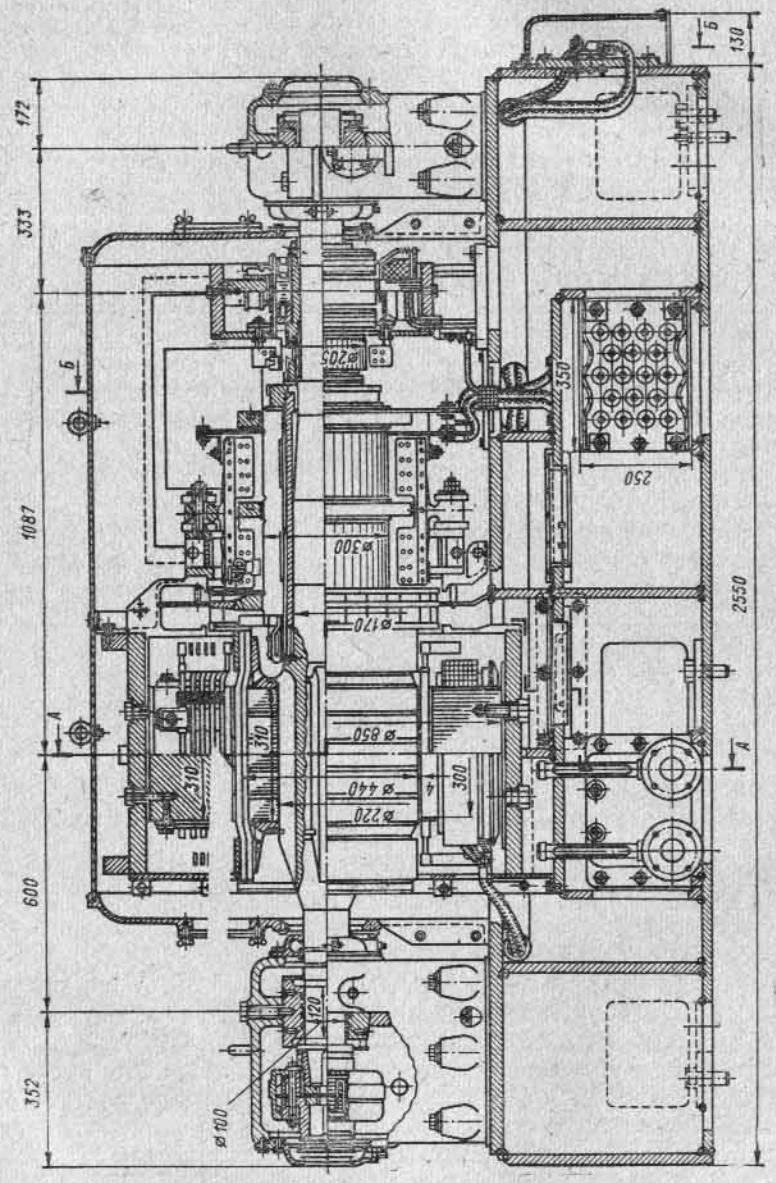


Рис. 11-10а. Продольный разрез возбудителя турбогенератора

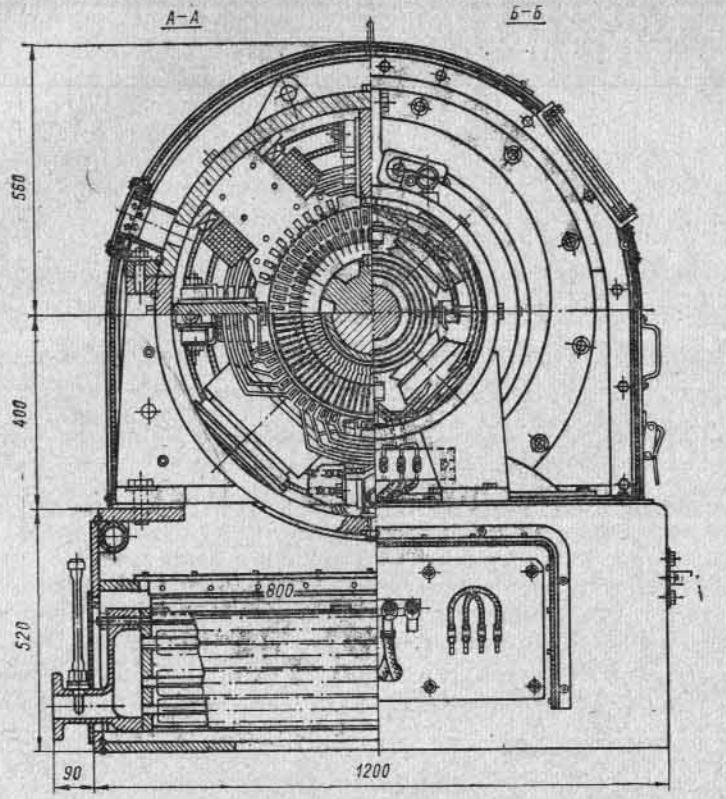


Рис. 11-10б. Поперечный разрез возбудителя турбогенератора

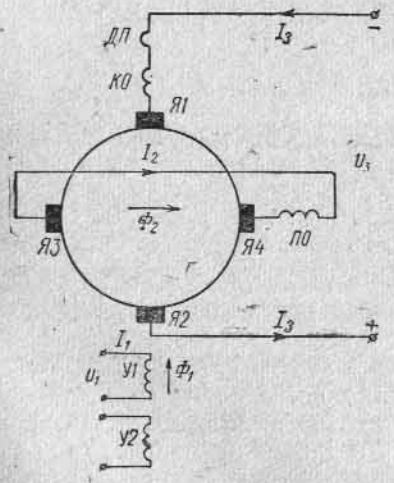


Рис. 11-11. Схема электромашинного усилителя

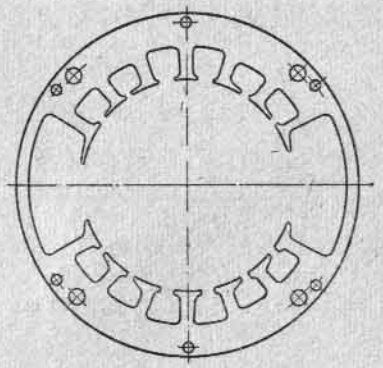


Рис. 11-12. Лист стали статора электромашинного усилителя

тельный ток I_2, так как сопротивление этого контура весьма невелико. При определенных условиях ток I_2 создает относительно большой поток Φ_2, соответственно чему в цепи щеток *Я1—Я2* возникает значительная э. д. с. E_3 и может протекать значительный по величине ток I_3. Так как создаваемая им н. с. компенсируется н. с. обмотки *КО*, то результирующий поток возбуждения остается равным потоку Φ_1 и, следовательно, не зависит от тока I_3 и, стало быть, от отдаваемой генератором мощности.

Для обеспечения наибольшей эффективности работы ЭМУ он должен обладать следующими качествами: а) высоким коэффициентом усиления k_y, б) малыми постоянными времени и в) достаточной устойчивостью работы.

Коэффициент усиления. Из сказанного выше следует, что усиление мощности происходит в две ступени: первая усиливает мощность $P_1 = U_1 I_1$ до мощности $P_2 = E_2 I_2$, а вторая — мощность $P_2 = E_2 I_2$ до мощности $P_3 = U_3 I_3$. Отношение

$$k_y = \frac{P_3}{P_1} = \frac{P_2}{P_1}\,\frac{P_3}{P_2} = k_{y1} k_{y2} \qquad (11\text{-}3)$$

называется коэффициентом усиления ЭМУ по мощности.

Пусть Λ_1 и Λ_2 — магнитные проводимости по продольной и поперечной осям. Тогда поток возбуждения по продольной оси $\Phi_1 \sim I_1\Lambda_1$, э. д. с. $E_2 \sim n\Phi_1 \sim nI_1\Lambda_1$, ток $I_2 = E_2/R_{a2}$; при $R_{a2} = \text{const}$ ток $I_2 \sim E_2 \sim nI_1\Lambda_1$, поток $\Phi_2 \sim I_2\Lambda_2 \sim nI_1\Lambda_1\Lambda_2$ и, следовательно, $E_3 \sim n\Phi_2 \sim n^2 I_1\Lambda_1\Lambda_2$. Если R — сопротивление той внешней цепи, на которую работает усилитель, то

$$I_3 = \frac{E_3}{R_{a3} + R} = \frac{n^2 I_1\Lambda_1\Lambda_2}{R_{a3} + R};$$

тогда мощность, отдаваемая усилителем во внешнюю цепь, будет

$$P_3 = I_3^2 R \sim \frac{R}{(R_{a3} + R)^2}\,(n^2 I_1\Lambda_1\Lambda_2)^2.$$

Так как $U_1 = I_1 R_1$, где R_1 — сопротивление обмотки возбуждения, то, согласно формуле (11-3), имеем:

$$k_y = \frac{R}{(R_{a3} + R)^2 R_1}\,(n^2\Lambda_1\Lambda_2)^2. \qquad (11\text{-}4)$$

Этот вывод сделан без учета коммутационной реакции якоря. В усилителях без добавочных полюсов по поперечной оси н. с. коммутационной реакции якоря $F_{kм}$ может в несколько раз превысить н. с. возбуждения F_1 и соответственно сильно повлиять на работу усилителя. Этим ЭМУ отличается от машин постоянного тока обычного типа, в которых н. с. $F_{kм}$ чаще всего играет второстепенную роль. На рис. 11-13 штриховыми линиями *1* и *3* показаны кривые $I_2 = f(n)$ и $E_3 = f(n)$ без учета коммутационной реакции якоря и сплошными линиями *2* и *4* — с учетом последней. Таким образом, коэффициент усиления зависит от скорости вращения в значительно меньшей степени, чем это следует из формулы (11-4). С другой стороны, коэффициент k_y тем больше, чем больше проводимости Λ_1 и Λ_2; для обеспечения надлежащих значений этих величин в усилителе допускают значительно меньшие индукции, чем в обычных машинах постоянного тока, и делают минимальные воздушные зазоры по обеим осям машины. Ясно также, что коэффициент k_y зависит от сопротивления внешней цепи R. Как при разомкнутой внешней цепи, т. е. при $R = \infty$, так и при коротком замыкании усилителя, т. е. при $R = 0$, коэффициент усиления $k_y = 0$.

Обычно коэффициент усиления $k_y \leqslant 10\,000$, причем k_{y1} всегда значительно меньше k_{y2}; так, например, при $k_y = 8000$ коэффициенты $k_{y1} \approx 40$ и $k_{y2} \approx 200$. В специальных случаях коэффициент k_y может достигать значений порядка 100 000.

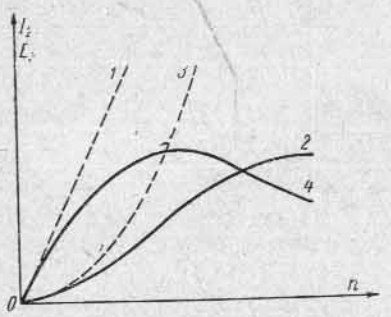


Рис. 11-13. Кривые $I_2 = f(n)$ и $E_3 = f(n)$: штриховые линии — без учета коммутационной реакции якоря; сплошные — с учетом последней

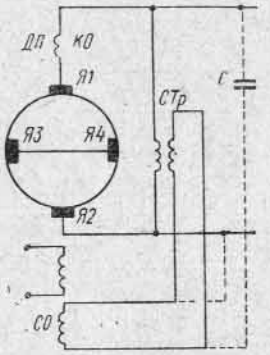


Рис. 11-14. Стабилизирующие связи электромашинного усилителя
ДП — добавочные полюсы; *КО* — компенсационная обмотка

Постоянные времени ЭМУ. При холостом ходе усилителя мы имеем две постоянные времени, а именно для контура возбуждения $T_1 = L_1/R_1$ и для контура в поперечной оси $T_2 = L_2/R_2$; здесь L_1 и L_2 — индуктивности соответствующих контуров. Если же усилитель работает под нагрузкой, то нужно учесть еще постоянную времени рабочей цепи $T_3 = L_3/R_3$. В ряде схем с электромашинным усилителем «отзывчивость» последнего, т. е. быстрота его реакции на поданный сигнал, имеет первостепенное значение. Для этого нужно, чтобы при заданных значениях R_1 и R_2 индуктивности L_1 и L_2 были возможно меньше. Как известно, $L = w\Phi_{(i=1a)}$, но $\Phi_{(i=1a)} = w\Lambda$, где Λ — магнитная проводимость на пути потока $\Phi_{(i=1a)}$. Таким образом,

$$L_1 = w_1^2\Lambda_1 \quad \text{и} \quad L_2 = w_2^2\Lambda_2.$$

Следовательно, меньшие значения L_1 и L_2 получаются при меньших значениях Λ_1 и Λ_2. Сопоставляя этот вывод с тем, что было ска-

зано выше о коэффициенте усиления, видим, что, *увеличивая k_y за счет увеличения Λ_1 и Λ_2, мы одновременно увеличиваем постоянные времени усилителя, т. е. уменьшаем его отзывчивость; и наоборот, большая отзывчивость усилителя соответствует его меньшей способности усиления*. Можно показать, что наибольшая отзывчивость ЭМУ получается при $T_1 = T_2$. Обычно $T_1 = 0{,}05 \div 0{,}2$ *сек*.

Устойчивость работы ЭМУ. Анализ показывает, что переходный режим ЭМУ всегда носит колебательный характер. При этом в случае неполной компенсации колебательный процесс затухает; в случае же перекомпенсации возникает устойчивый колебательный процесс, который может нарушить нормальную работу ЭМУ.

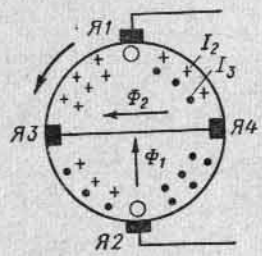


Рис. 11-15. Распределение токов в обмотке якоря ЭМУ

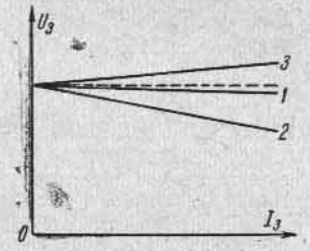


Рис. 11-16. Внешние характеристики ЭМУ: $U_3 = f(I_3)$ при $n = \text{const}$ и $I_1 = \text{const}$

Чтобы избежать самовозбуждения, ЭМУ снабжают специальной так называемой стабилизирующей обмоткой, располагаемой по продольной оси и приключаемой к зажимам усилителя через конденсатор или стабилизирующий трансформатор *СТр* (рис. 11-14). Если на рабочих зажимах *Я1—Я2* напряжение $U_3 = \text{const}$, то ток в стабилизирующую обмотку не может пройти, но при изменении U_3 конденсатор *С* или соответственно вторичная обмотка стабилизирующего трансформатора начинают питать стабилизирующую обмотку *СО*. При этом н. с. стабилизирующей обмотки способствует увеличению напряжения U_3 при уменьшении последнего и, наоборот, стремится уменьшить U_3 при его увеличении. Такая связь между напряжением U_3 и действием стабилизирующей обмотки называется обратной, причем в данном случае эта связь осуществляется по первой производной напряжения U_3.

В случае недокомпенсации устойчивость работы ЭМУ зависит от соотношения между постоянными времени T_1, T_2 и T_3. Анализ показывает, что устойчивость работы тем меньше, чем эти величины ближе друг к другу, и наоборот.

При работе ЭМУ под нагрузкой по обмотке якоря протекают токи I_2 и I_3, распределяющиеся так, как это показано на рис. 11-15. Считая, что $2a = 2$, видим, что в первом и третьем квадрантах результирующий

ток равен $\frac{1}{2}(I_2 - I_3)$, а во втором и четвертом квадрантах $\frac{1}{2}(I_2 + I_3)$. Следовательно, ток, определяющий потери в обмотке якоря, составляет

$$I_a = \sqrt{\left[\frac{1}{2}(I_2 - I_3)\right]^2 \cdot 2 + \left[\frac{1}{2}(I_2 + I_3)\right]^2 \cdot 2} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2}. \quad (11\text{-}5)$$

Вид внешней характеристики ЭМУ $U_3 = f(I_3)$ при $n = \text{const}$ и $I_1 = \text{const}$ в сильной мере зависит от степени компенсации якоря. На рис. 11-16 кривые *1*, *2* и *3* изображают внешние характеристики ЭМУ соответственно при полной компенсации, недокомпенсации и перекомпенсации. Обычно степень компенсации устанавливают так, чтобы получить внешнюю характеристику, соответствующую кривым *1* или *2*, так как работа с перекомпенсацией по кривой *3* носит неустойчивый характер.

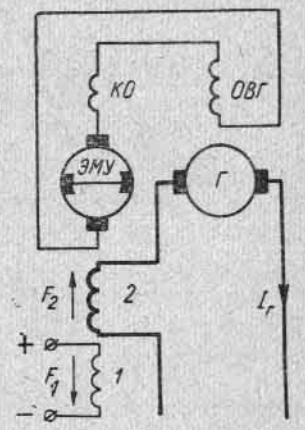


Рис. 11-17. Схема генератора постоянного тока с усилителем

ОВГ — обмотка возбуждения генератора

Как мы уже говорили выше, ЭМУ применяется в самых различных схемах электропривода для самых различных целей. На рис. 11-17 приведена схема, позволяющая поддерживать постоянный по величине ток в цепи якоря генератора *Г*. Здесь *1* — обмотка усилителя, создающая н. с. F_1; *2* — обмотка управления, включаемая в цепь якоря управляемого генератора и создающая н. с. F_2, направленную встречно относительно н. с. F_1. При увеличении тока генератора $I_г$ увеличивается встречное действие обмотки *2* и соответственно этому уменьшаются: поток по продольной оси, напряжение на выходе усилителя и ток в цепи возбуждения генератора *Г*; в результате ток $I_г$ доводится почти до его прежнего значения. При данной схеме регулирование тока $I_г$ обеспечивается с точностью $\pm$ (2—3) %.

Электромашинные усилители обычно выполняются на мощности до 100 *квт*. Для иллюстрации приводим данные ЭМУ-600 : 60 *квт*, 230 *в*, 1500 *об/мин* при $2p = 4$. В настоящее время электромашинные усилители большой мощности начали применяться также в качестве возбудителей турбогенераторов при сочленении их с валом турбогенератора через зубчатую передачу. Так, например, в США построен ЭМУ мощностью 400 *квт*, 375 *в*, 1200 *об/мин* при $2p = 4$ для возбуждения турбогенератора 147 *Мв·а*, 3600 *об/мин* [144].

Д. Электромашинный регулятор (ЭР). Для тех же целей автоматического управления производственными процессами был предложен электромашинный регулятор. По своему устройству он представляет собой обычную машину постоянного тока, имеющую несколько обмоток возбуждения. На рис. 11-18 показана его схема как регулятора скорости, действующего по принципу обратной э. д. с. Здесь *Г* — ге-

нератор, приводимый во вращение от трехфазного асинхронного двигателя; *Д* — двигатель постоянного тока, питаемый генератором *Г*; *Р* — электромашинный регулятор, сочлененный на одном валу с генератором (может быть приведен во вращение также небольшим отдельным асинхронным двигателем) и включенный в схему моста; *В1* и *В2* — две параллельные ветви обмотки возбуждения генератора *Г*; *1′* и *1″* — две параллельные ветви обмотки самовозбуждения электромашинного регулятора; *2* и *3* — обмотки управления. Обмотки возбуждения *В1* и *В2* генератора *Г* и обмотки *1′* и *1″* регулятора включены в плечи уравновешенного моста по схеме, показанной на рисунке.

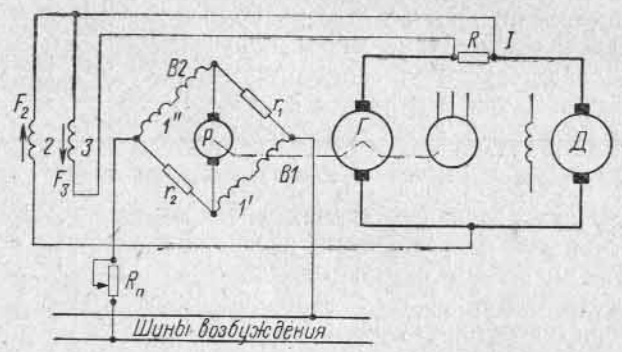


Рис. 11-18. Электромашинный регулятор в системе ГД

Обмотка *2* включена на зажимы двигателя, причем ее н. с. $F_2 \sim U_д$; обмотка *3* присоединена параллельно к сопротивлению R, и ее н. с. $F_3 \sim I$. При установившемся режиме работы н. с. F_1 обмоток *1′* и *1″* и н. с. F_3 направлены согласно, но встречно относительно F_2, причем $F_1 + F_3 = F_2$. Следовательно, результирующая н. с. регулятора равна нулю, соответственно чему практически равна нулю его э. д. с, так как магнитная система регулятора выполняется из специальной стали с минимальным остаточным магнетизмом (0,4% вместо обычных 2—3%) и минимальным гистерезисным эффектом. Теперь предположим, что мы изменили, например уменьшили, сопротивление $R_п$; н. с. F_1 возрастет, и в цепи якоря регулятора появится некоторая первоначальная э. д. с., под действием которой начнется его самовозбуждение. Таким образом, небольшой первичный импульс вызывает значительное изменение тока возбуждения генератора *Г* и соответственно скорости вращения двигателя *Д*. Если же при заданном сопротивлении $R_п$ изменится, например увеличится, тормозящий момент двигателя, то ток I будет стремиться возрасти, а скорость n — уменьшиться; но при этом увеличится н. с. F_3, а это приведет к такому увеличению тока возбуждения и э. д. с. генератора *Г*, при котором скорость останется без изменения. Электромашинный регулятор выполняется на мощности до 1 *квт*, в системе ГД он позво-

ляет регулировать скорость двигателя в пределах до 1 : 120 и в ряде случаев с успехом конкурирует с электромашинным усилителем.

Е. Преобразователь постоянного тока К. И. Шенфера. Преобразователь постоянного тока, изобретенный одновременно Пестарини (J. Pestarini) [145] и К. И. Шенфером [146] в 1929 г. и часто называемый метадином, представляет собой специальную регулирующую машину, позволяющую осуществить безреостатный пуск электропоездов, широкое регулирование скорости и торможение вплоть до очень малых скоростей. Принципиальная схема преобразователя показана на рис. 11-19. Здесь *Пр* — преобразователь, приводимый во вращение с постоянной скоростью и представляющий собой машину постоянного тока с двумя парами щеток, расположенными по продольной и поперечной осям (щетки *Я1—Я2* и *Я3 — Я4*); *1* и *2* — тяговые двигатели, включенные между точками *a* и *b* последовательно со щетками *Я3 — Я4*, т. е. в цепь поперечного тока I_{II}; между этими же точками находится цепь продольного тока I_I. Таким образом, мы имеем две параллельные ветви: одну — по продольной оси, а другую — по поперечной оси, причем токи I_I и I_{II} в якоре преобразователя создают по соответствующим осям потоки Φ_I и Φ_{II}.

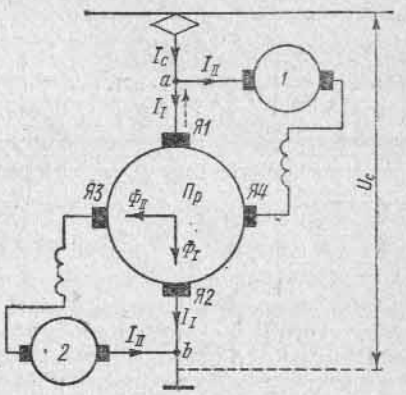


Рис. 11-19. Принципиальная схема преобразователя постоянного тока К. И. Шенфера

Пренебрегая для простоты падением напряжения в цепи тока I_I, имеем:

$$U_c \approx E_I \approx C_{eI} n_{пр} \Phi_{II} \approx C'_{eI} n_{пр} I_{II}. \quad (11\text{-}6)$$

Здесь U_c — напряжение сети; $n_{пр}$ — скорость вращения преобразователя. Будем считать, что $U_c = \text{const}$ и $n_{пр} = \text{const}$. Тогда $\Phi_{II} = \text{const}$ и, следовательно, $I_{II} = \text{const}$.

Отсюда следует, что, несмотря на изменение скорости вращения тяговых двигателей *1* и *2*, ток I_{II} остается при указанных выше условиях практически постоянным по величине.

С другой стороны,

$$I_{II} = \frac{(U_c + E_{II}) - 2E_{a\,дв}}{R}. \quad (11\text{-}7)$$

Здесь E_{II} — э. д. с., создаваемая в обмотке якоря преобразователя потоком Φ_I; $E_{a\,дв}$ — противоэлектродвижущая сила каждого из тяговых двигателей *1* и *2*; R — суммарное сопротивление контура с током I_{II}.

Будем по-прежнему считать, что $U_c = \text{const}$ и $n_{пр} = \text{const}$. Тогда $E_{II} = C_{e\,II} n_{пр} \Phi_I \approx C'_{e\,II} I_I$ и $E_{a\,дв} = C_{e\,дв} n_{дв} \Phi_{дв} = C'_{e\,дв} n_{дв}$, и равен-

ство (11-7) может быть написано в следующем виде:

$$(U_c + C'_{e\,II} I_I) - I_{II} R = 2C'_{e\,дв} n_{дв}.$$

Из формулы видно, что ток I_I зависит от скорости вращения тяговых двигателей. Если пренебречь падением напряжения $I_{II}R$, то при трогании двигателей с места, когда $n_{дв} = 0$, имеем $I_I = -U_c/C'_{e\,II}$; физически это означает, что ток I_I направлен от преобразователя в сеть (штриховая стрелка на рис. 11-19). Поэтому ток, поступающий из сети, будет $I_c = I_{II} - I_I$. Соответственно отрицательному направлению тока I_I э. д. с. E_{II} действует встречно относительно напряжения U_c, играя тем самым роль пускового реостата; таким образом, при пуске

$$I_{II} = \frac{U_c - E_{II}}{R}.$$

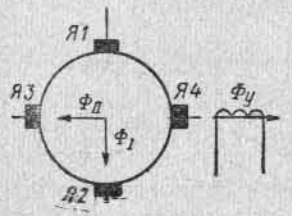


Рис. 11-20. Обмотка управления преобразователя, расположенная по поперечной оси

По мере разгона тяговых двигателей ток I_I постепенно уменьшается по абсолютной величине и при определенной скорости $n_{дв}$ изменяет свой знак на обратный, соответственно чему знак э. д. с. E_{II} тоже изменяется; в этих условиях имеем:

$$I_{II} = \frac{U_c + E_{II}}{R} \quad \text{и} \quad I_c = I_{II} + I_I.$$

Таким образом, преобразователь К. И. Шенфера является своеобразным трансформатором постоянного тока, преобразовывающим постоянное по величине напряжение U_c и изменяющийся ток I_I в изменяющееся по величине напряжение $U_c \pm E_{II}$, но постоянный по величине ток I_{II}.

Чтобы иметь возможность регулировать скорость вращения тяговых двигателей, на статоре преобразователя К. И. Шенфера располагают две обмотки управления, питаемые от особых возбудителей. Главное значение имеет обмотка, расположенная по оси щеток *Я3 — Я4*, т. е. в поперечном направлении (рис. 11-20). Создаваемый ею поток Φ_y должен быть направлен встречно относительно потока Φ_{II}, так что результирующий поток по этой оси будет $\Phi_{II} - \Phi_y = \Phi_{II\,рез}$. Тогда формула (11-4) может быть написана в виде:

$$U_c \approx E_I = C_{eI} n_{пр} (\Phi_{II} - \Phi_y) = C_{eI} n_{пр} \Phi_{II\,рез}.$$

При $U_c = \text{const}$ и $n_{пр} = \text{const}$ результирующий поток $\Phi_{II\,рез}$ тоже должен иметь постоянную величину, т. е. $\Phi_{II\,рез} = \Phi_{II} - \Phi_y = \text{const}$. Отсюда следует, что при всяком изменении потока Φ_y соответственно току в обмотке управления I_y будут изменяться: поток Φ_{II}, ток I_{II} и соответственно этому скорость вращения тяговых двигателей.

Исследование преобразователя постоянного тока мощностью 50 *квт* в схеме с двигателем смешанного возбуждения было произведено в ВЭИ и показало, что он может быть с успехом использован в ряде случаев, в частности на электровозах.

Ж. Машины постоянного тока с постоянными магнитами. В начале 30-х годов текущего столетия были найдены для постоянных магнитов новые материалы, обладающие хорошими магнитными свойствами и представляющие собой сплавы железа с другими металлами. Наибольший практический интерес имеет алюминиевоникелевая сталь, т. е. сплав железа с алюминием (11—16%) и никелем (18—24%). По сравнению с прежними материалами — хромовой и вольфрамовой сталью — алюминиевоникелевая сталь имеет примерно в 10 раз большую коэрцитивную силу и в 9—10 раз превосходит их по магнитной энергии.

Постоянные магниты отличаются от электромагнитов своей низкой магнитной проницаемостью. Так, например, для алюминиевоникелевой стали $\mu = 8 \div 10$, тогда как для электромагнитов величина μ в несколько сотен раз больше.

Работу генератора с постоянными магнитами можно уподобить работе генератора с независимым возбуждением при $i_в = \text{const}$. Но при этом не следует упускать из виду, что машины с постоянными магнитами при определенных условиях могут частично потерять свой магнетизм под действием реакции якоря.

Машины постоянного тока с постоянными магнитами выполняются практически только как машины весьма малой мощности, например тахогенераторы. Но произведенные исследования показали, что можно рационально выполнить машину постоянного тока с постоянными магнитами мощностью в несколько киловатт.

З. Самолетные электрические машины. Первой электрической машиной, предложенной в 1869 г. для применения на самолете, был электродвигатель мощностью 300 *л. с.*, разработанный А. Н. Лодыгиным. От этого электродвигателя предполагалось приводить во вращение винты самолета. Перед первой мировой войной Лодыгин разработал новый, более совершенный проект, в котором питание электродвигателей должно было осуществляться от генератора, приводимого во вращение двигателем внутреннего сгорания. Такой тип привода самолетного генератора в дальнейшем нашел практическое применение на самолетах; первая установка была выполнена в 1934 г. Выбор системы электроснабжения постоянного тока был окончательно сделан в 1919—1920 гг., поскольку решено было отказаться от искровых радиопередатчиков, требовавших применения переменного тока с частотой порядка 1000 *гц*. Первые самолетные генераторы постоянного тока мощностью 200—300 *вт* имели напряжение 8 *в*, а затем 12 *в*. Эти машины изготовлялись в Ленинграде на заводе имени Козицкого.

По мере того как возрастали дальности и высоты полета, увеличивались размеры самолета. Это потребовало также значительного роста мощности генератора. Поскольку один генератор не мог обеспечить в этих условиях надежной работы самолета, возникла необходимость параллельного включения нескольких генераторов. Решение этой проблемы представляло значительные трудности, так как генераторы работают с переменной скоростью вращения от авиамоторов. В результате проведенных исследований была разработана схема автоматического регулирования напряжения генератора.

Широкое осуществление электрификации самолетов началось в 1939 г., когда впервые были применены электромеханизмы для дистанционного управления шасси, стабилизатора, радиаторов, питаемые от генераторов постоянного тока.

В связи с ростом мощности и количества потребителей электрической энергии на самолете единичная мощность самолетных генераторов увеличилась до многих десятков киловатт и имеет тенденцию к дальнейшему росту. Напряжение генераторов возросло в несколько раз и достигает 120 *в* и выше. В современных самолетах широко используются электродвигатели постоянного тока в виде электростартеров, а также большое число электромашинных преобразователей, предназначенных в основном для получения переменного тока. Электрическая система современного самолета представляет собой сложный комплекс, состоящий из значительного числа разнообразных электрических машин. По принципу действия самолетные генераторы не отличаются от стационарных генераторов. Можно использовать генераторы как постоянного тока, так и переменного. Хотя до последнего времени наибольшее распространение имели генераторы постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением, но все большее внимание привлекает возможность использования генераторов с независимым возбуждением. Скорость вращения генератора изменяется в пределах 5000—10 000 *об/мин* в соответствии с режимом работы авиационного мотора, от которого обычно генератор приводится непосредственно во вращение. За последнее время пределы скорости вращения еще более возросли и достигают 18 000 — 20 000 *об/мин*. В самолетах, кроме нормальных конструкций генераторов постоянного тока, применяют также трехщеточный тип, в котором обмотка возбуждения включается между главной и вспомогательной (третьей) щетками. Эти генераторы выполняются на малые мощности, с низким напряжением и работают параллельно с аккумуляторными батареями.

В последнее время широкое применение на самолетах получили электромашинные усилители.

В основу расчета и конструкции самолетных генераторов и двигателей должны быть положены специфические требования. Особо важна высокая надежность и безотказность в работе машин, так как от этого зависит безопасность полета. Кроме того, машины должны иметь минимальный вес и габариты, их работа не должна зависеть от положения самолета в пространстве, скорости и ускорения в полете. Весьма существенно, чтобы не возникало мешающего воздействия на работу электрических машин и других элементов электрооборудования, осуществлялся быстрый пуск их в ход и быстрое затухание переходных процессов. Вопросы расчета, конструирования и эксплуатации самолетных электрических машин более подробно рассмотрены в книге проф. Д. А. Завалишина «Самолетные электрические машины» (ЛИАП, 1956).

В заключение следует указать, что переход к сверхзвуковым скоростям полета и резкому увеличению мощности авиамоторов вновь поставил вопрос о конкурентоспособности генераторов переменного тока для самолетов. По-видимому, применение системы переменного тока окажется для самолетов более целесообразным, чем системы постоянного тока.



Раздел второй

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Глава двенадцатая

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

12-1. Развитие трансформаторостроения [8]

Ранее (см. введение) мы уже говорили, что основоположниками трансформаторостроения были русские электротехники П. Н. Яблочков, И. Ф. Усагин и М. О. Доливо-Добровольский, разработавшие тип трехфазного трансформатора для целей передачи электрической энергии. Начиная с 90-х годов прошлого столетия, первоначальный тип трансформатора в сухом исполнении был постепенно вытеснен трансформатором в масляном исполнении. Аварии, которые происходили сначала из-за неумения изолировать масло от окисляющего действия воздуха, были практически устранены посредством маслорасширителей, вошедших во всеобщее употребление примерно с середины 10-х годов текущего столетия.

Весьма большое влияние на развитие трансформаторов оказало применение легированной, так называемой трансформаторной стали. Достаточно сказать, что за время с 1904 по 1911 г. масса стали масляного трансформатора мощностью 20 *кв·а* уменьшилась более чем вдвое, а масса меди — почти на 40% при том же или даже более высоком к. п. д. В последующем произошло дальнейшее уменьшение массы активных материалов трансформаторов, а в настоящее время в этом отношении намечаются новые перспективы в связи с применением холоднокатаной стали.

Так как типов трансформаторов очень много, то здесь мы ограничимся краткой характеристикой только силового трансформатора, поскольку он представляет наибольший интерес в связи с мощным развитием электроэнергетических систем.

За время с 1905 по 1940 г. потребление электроэнергии в промышленно развитых странах удваивалось примерно каждые 8—10 лет. Соответственно этому росли мощности центральных электрических станций и мощности устанавливаемых на них агрегатов, в том числе трансформаторов. Уже к 1930 г. был построен трехфазный пятистержневой трансформатор мощностью 100 тыс. *кв·а*, а к 1936 г.— трехфазный групповой трансформатор мощностью $3 \times 65 = 195$ тыс. *кв·а* при нормальном дутьевом охлаждении и $3 \times 80 = 240$ тыс. *кв·а* при форсированном охлаждении. Для Волжской ГЭС имени В. И. Ленина выполнены трансформаторные группы мощностью 3×123500 *кв·а*.

В соответствии с развитием линий передачи электроэнергии на большие расстояния в целях использования низкокалорийных сортов топлива и, особенно, водных ресурсов росло рабочее напряжение трансформаторов — с 110 *кв* в 1907 г. до 220 *кв* в 1921 г., 287,5 *кв* в 1937 г., 400 *кв* в 1952 г. и 500 *кв* в 1969 г. При напряжении 400 *кв* передается электроэнергия от Волжской ГЭС имени В. И. Ленина в Москву.

Производство и эксплуатация мощных трансформаторов поставили перед трансформаторостроением ряд важных и трудных проблем, из числа которых мы назовем здесь: а) повышение к. п. д. трансформатора, б) охлаждение трансформатора и в) его защиту от перенапряжений.

Вопрос о к. п. д. силовых трансформаторов имеет весьма важное эксплуатационное значение, если принять во внимание, что генерируемая на электростанции энергия подвергается трех- и часто четырехкратной трансформации, прежде чем она достигнет приемника. Для повышения к. п. д. трансформатора было необходимо непрерывно совершенствовать методы расчета трансформаторов и улучшать их конструкцию, применять новые материалы улучшенного качества или при заданном качестве материалов использовать их наиболее рациональным образом.

Вопрос об охлаждении трансформаторов допускает различные решения. Первоначально баки трансформаторов малой мощности выполнялись из волнистого железа, а в трансформаторах большой мощности широко применялось внутреннее водяное охлаждение масла. Но такие трансформаторы оказались недостаточно надежными в работе и уступили свое место трансформаторам с баками трубчатого типа для мощностей до 2000 *кв·а* и радиаторного типа с естественным охлаждением для мощностей до 7500 *кв·а* включительно и трансформаторам с дутьевым охлаждением большей мощности. Примерно до Великой Отечественной войны применялось централизованное дутье от одного или двух общих для трансформатора вентиляторов, но в настоящее время каждый радиатор обдувается отдельно с помощью пристроенных к нему вентиляторов малой мощности (см. ниже рис. 12-20).

Со времени постройки первых линий высокого напряжения исключительный интерес был проявлен к вопросу о защите трансформаторов от перенапряжений. Исследования показали, что некоторые из защитных приспособлений, как, например, усиление изоляции концевых катушек, являются недостаточными, а другие, как, например, защитные реактивные катушки — практически бесполезными. Поэтому еще в середине 10-х годов возникла идея так называемого н е р е з о н и р у ю щ е г о, или г р о з о у п о р н о г о, трансформатора, в котором напряжение распределяется вдоль обмотки более или менее равномерно независимо от режима работы трансформатора. В 1929 г. был выполнен грозоупорный трансформатор с полной емкостной за-

щитой, а затем в 1937 г. на МТЗ — трансформатор с частичной емкостной защитой. В настоящее время такая защита применяется во всех трансформаторах отечественного производства на 110 *кв* и выше.

Наряду с основным типом силового трансформатора был разработан ряд типов этого трансформатора со специальными характеристиками. Уже с середины 20-х годов получили широкое распространение трехобмоточные трансформаторы (см. ниже гл. 23).

С другой стороны, совместная работа мощных энергосистем требует трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой как по величине, так и по фазе (так называемое продольное и поперечное регулирование). В связи с широким развитием электрометаллургических и электрохимических предприятий были созданы типы мощных печных трансформаторов и трансформаторов для выпрямительных установок, а для сварочных операций (сварка дугой, контактная, стыковая и т. д.) — соответствующие типы сварочных трансформаторов.

Из сказанного следует, что трансформаторостроение достигло весьма высокого уровня развития и способно удовлетворить всем предъявляемым к нему требованиям.

12-2. Основные определения

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования одной — первичной — системы переменного тока в другую — вторичную — той же частоты, имеющую в общем случае другие характеристики, в частности другое напряжение и другой ток.

Как правило, трансформатор состоит из а) сердечника, набранного из листовой трансформаторной стали, и б) двух или нескольких обмоток, связанных между собой электромагнитно, а в автотрансформаторе — также и электрически.

Трансформатор, имеющий две обмотки, называется двухобмоточным, трансформатор с тремя или несколькими обмотками — трехобмоточным или многообмоточным. Соответственно роду тока различают трансформаторы однофазные, трехфазные и многофазные. Под обмоткой многофазного трансформатора понимают совокупность всех фазных обмоток одинакового напряжения, определенным образом соединенных между собой. Та из обмоток трансформатора, к которой подводится энергия переменного тока, называется первичной, другая, от которой энергия отводится, называется вторичной обмоткой. В соответствии с названиями обмоток все величины, относящиеся к первичной обмотке, как, например, мощность, ток, сопротивление и т. д., тоже называются первичными, а относящиеся ко вторичной обмотке — вторичными.

Обмотка, присоединенная к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высшего напряжения (ВН); обмотка, присоединенная к сети меньшего напряжения, называется обмоткой низшего напряжения (НН). Если вторичное напряжение меньше первичного, то трансформатор называется понижающим, а если больше — повышающим.

Трансформатором с ответвлениями называется трансформатор, обмотки которого имеют специальные ответвления для изменения коэффициента трансформации трансформатора.

Чтобы предотвратить вредное влияние воздуха на изоляцию обмоток и улучшить условия охлаждения трансформатора, его сердечник с находящимися на нем обмотками помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом. Такие трансформаторы называются масляными. Трансформаторы, не погружаемые в масло, называются сухими.

12-3. Номинальные величины

Номинальные величины трансформаторов — мощность, напряжения, токи, частота и т. д.— указываются на заводском щитке, который должен быть помещен так, чтобы к нему был обеспечен свободный доступ. Однако термин «номинальный» может применяться и к величинам, не указанным на щитке, но относящимся к номинальному режиму, таким, как номинальный к. п. д., номинальные температурные условия охлаждающей среды и т. д.

Номинальным режимом работы трансформатора называется режим, указанный на заводском щитке трансформатора.

Номинальной мощностью трансформатора называется мощность на зажимах вторичной обмотки, указываемая на щитке и выражаемая в киловольт-амперах.

Номинальным первичным напряжением называется напряжение, указанное на щитке трансформатора; если первичная обмотка имеет ответвления, то ее номинальное напряжение отмечается особо.

Номинальным вторичным напряжением называется напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора и при номинальном напряжении на зажимах первичной обмотки; если вторичная обмотка имеет ответвления, то ее номинальное напряжение отмечается особо.

Номинальными токами трансформатора — первичным и вторичным — называются токи, указываемые на щитке трансформатора и вычисленные по соответствующим значениям номинальной мощности и номинальных напряжений. При этом, имея в виду, что к. п. д. трансформатора весьма высок, принимают, что номинальные мощности обеих обмоток равны. Пусть, например, номинальная мощность трехфазного трансформатора $P_н = 100$ *кв·а*, номинальные первичное и вторичное напряжения $U_{1н} = 6000$ *в* и $U_{2н} = 230$ *в*. Тогда

$$I_{1н} = \frac{P_н}{\sqrt{3}U_{1н}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9{,}63 \text{ а}$$

и

$$I_{2н} = \frac{P_н}{\sqrt{3}U_{2н}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 251 \text{ а}.$$

Номинальная частота в СССР равна 50 *гц*.

Согласно ГОСТ 183—66, кривая напряжения, э. д. с. или тока считается практически синусоидальной, если выраженное в процентах отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд трех наибольших гармонических составляющих данной периодической кривой к амплитуде ее основной гармонической (рис. 12-1) оказывается не более 5% для машин и трансформаторов мощностью выше 1000 *квт*, т. е.

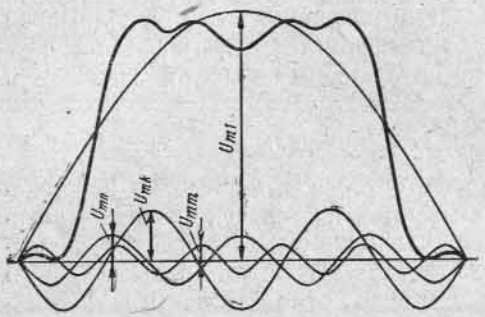


Рис. 12-1. К определению практически синусоидальной кривой

$$\frac{\sqrt{U_{mk}^2+U_{mn}^2+U_{mm}^2}}{U_{m1}}\times 100\leqslant 5\%.$$

При меньших мощностях машин это отношение не должно быть больше 10%.

Трехфазная система напряжений или токов считается практически симметричной, если при разложении ее на системы векторов прямой и обратной последовательности оказывается, что величина векторов обратной последовательности не превышает 5% от величины векторов прямой последовательности.

12-4. Основные принципиальные и конструктивные типы выполнения трансформаторов [157, 158, 162, 163, 166, 167, 170, 173]

Наибольшее значение имеют следующие типы трансформаторов:

1) силовые — для передачи и распределения электроэнергии;

2) автотрансформаторы — для преобразования напряжений в относительно ограниченных пределах, для связи энергосистем различных напряжений, для пуска в ход двигателей переменного тока и т. д.;

3) для питания установок со статическими преобразователями (ртутными выпрямителями, игнитронами, полупроводниковыми вентилями и т. п.) при преобразовании переменного тока в постоянный (выпрямлении) и обратном преобразовании постоянного тока в переменный (инвертировании);

4) испытательные — для производства испытаний под высоким и сверхвысоким напряжением;

5) силовые специального назначения: печные, сварочные и т. д.;

6) измерительные — для измерения тока и напряжения при включении в схемы измерительных приборов;

7) радиотрансформаторы, применяемые в радиотехнике, и т. д.

Таким образом, область применения трансформаторов чрезвычайно широка. Но во всех случаях основные процессы, определяющие работу трансформатора, а равно приемы изучения происходящих

в трансформаторе явлений по существу одни и те же. Поэтому, говоря о трансформаторе, мы будем в дальнейшем иметь в виду его основной тип, а именно одно- и трехфазный двухобмоточный силовой трансформатор. Описание трехобмоточных трансформаторов и других типов трансформаторов специального назначения см. в гл. 23.

Применяемые на практике устройства и конструктивные выполнения различных типов трансформаторов достаточно разнообразны в зависимости от их основных параметров и назначения. Мощности трансформаторов в настоящее время колеблются от нескольких вольт-ампер до 600 *Мв·а* в одной единице и выше, напряжения — от долей вольта до 1 *Мв* и выше в одной единице (для высоковольтных испытательных трансформаторов).

Хотя трансформаторы в зависимости от назначения весьма сильно различаются по своей конструкции (например, обычные силовые трансформаторы и измерительные трансформаторы тока и напряжения, высоковольтные испытательные и печные трансформаторы на большие токи и т. д.), однако все типы и конструкции трансформаторов можно представить в виде некоторой разновидности одного исходного типа, получающейся путем изменения формы и взаимного расположения основных элементов трансформатора — его обмоток и сердечника из листовой стали.

Однофазные трансформаторы. Из рассмотрения принципа действия трансформатора нетрудно усмотреть, что сочетание первичной и вторичной обмоток *1* и *2* и сердечника *3* трансформатора, являющихся его а к т и в н о й ч а с т ь ю, образует как бы два сцепленных звена некоторой электромагнитной системы, где тело обмоток *1* и *2* составляет одно звено, а тело сердечника *3* — другое.

Условия работы трансформатора принципиально не изменятся, если, например, разделить плоскостью *А—А* (рис. 12-2, *а*) тело обмоток *1* и *2* на две равные части и, оставляя их по-прежнему в сцеплении с сердечником *3*, передвинуть одну из частей по кольцу сердечника в положение, показанное на рис. 12-2, *б*; в результате получается симметричная трехзвенная цепь с одним магнитным звеном и двумя электрическими. Подобным же образом, если тело сердечника *3* разделить плоскостью *В—В* на две равные части (рис. 12-2, *а*) и, оставляя их в сцеплении с обмотками, передвинуть одну из частей по обмотке в положение, представленное на рис. 12-2, *в*, то получится также трехзвенная цепь, но теперь с одним электрическим звеном и двумя магнитными. Путем дальнейшего разделения каждого получившегося магнитного сердечника (рис. 12-2, *в*) еще на две части можно превратить этот тип в пятизвенный, представленный на рис. 12-2, *г*, с более равномерно распределенными четырьмя магнитными звеньями вокруг одного центрального электрического звена. С другой стороны, можно, оставив расположение двух звеньев обмоток, как на рис. 12-2, *б*, разделить тело магнитного сердечника на три части, собрав трансформатор в пятизвенную цепь с двумя электрическими звеньями и тремя магнитными, по рис. 12-2, *д*. Возможны также и другие формы выполнения однофазных трансформаторов, с иным взаимным расположением звеньев обмоток и магнитных сердечников.

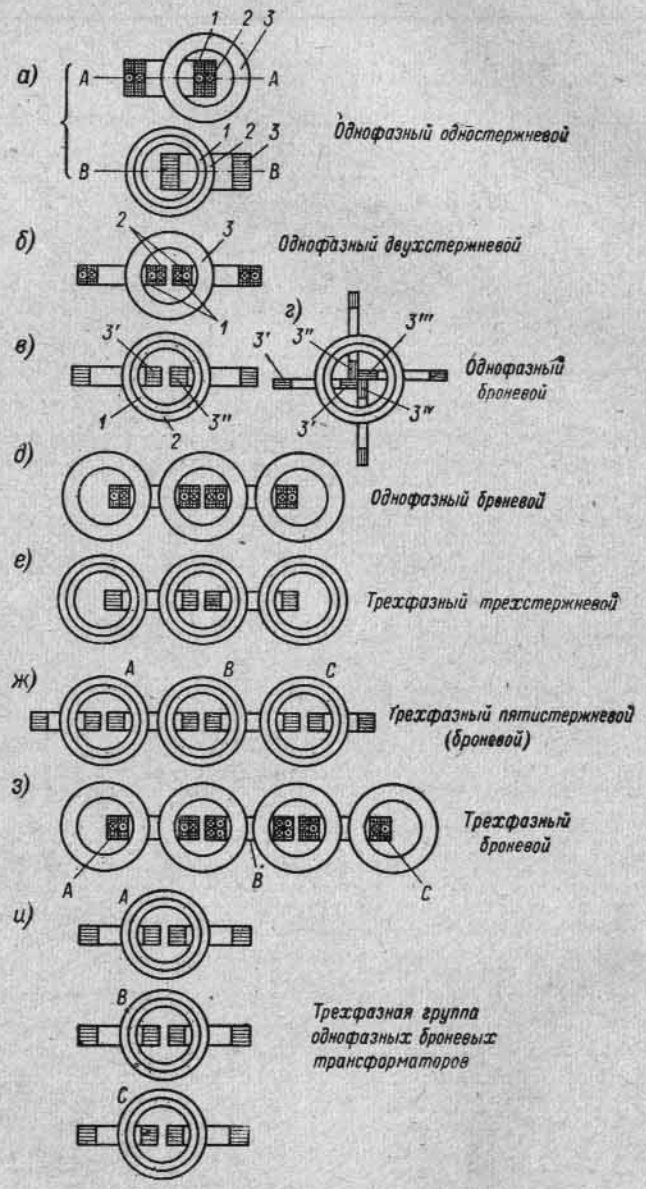


Рис. 12-2. Основные принципиальные типы выполнения трансформаторов

На рис. 12-2, *а—д* показаны лишь принципиально возможные формы выполнения активной части трансформатора; на практике же, например, круглые сердечники используются только у измерительных трансформаторов тока и у броневых трансформаторов с ленточными сердечниками, намотанными по типу, изображенному на рис. 12-2, *в*, и применяемыми для распределительных трансформаторов малой мощности по рис. 23-21. Поскольку у большинства трансформаторов для облегчения сборки сердечники выполняются из отдельных листов стали (см. ниже), то, естественно, что листы сердечников, а вместе с тем и сами трансформаторы получают не круглую, а прямоугольную форму, изображенную на рис. 12-3 и 12-4, соответственно принципиальным формам сцепленных звеньев по рис. 12-2, *а* и *б*. Трансформаторы на рис. 12-3 и 12-4, соответствующие принципиальным формам сцепления звеньев по типу рис. 12-2, *а* и *б*, именуются стержневыми или стержневого типа, причем те части сердечника, на которых размещены обмотки, называются с т е р ж н я м и, а те части, которые соединяют между собой стержни и служат для замыкания магнитной цепи, называются я р м а м и; пространства между стержнями и ярмами, через которые проходят обмотки, называются о к н а м и с е р д е ч н и к а.

Трансформаторы на рис. 12-5 и 12-6 именуются броневыми (или броневого типа), поскольку обмотки, как это видно на рисунках, в значительной своей части закрыты, или «забронированы», внутри стального сердечника. На рис. 12-3 — 12-6 обозначения деталей трансформатора следующие: *1* — обмотка высшего напряжения; *2* — обмотка низшего напряжения; *3* — стержень; *4* — ярмо. Обмотки высшего и низшего напряжения *1* и *2* могут быть выполнены или в виде отдельных цилиндров (рис. 12-3, *а*, 12-4, *а*, 12-5, *а*, 12-6), или в виде чередующихся колец обмоток высшего и низшего напряжения (рис. 12-3,*б*, 12-4, *б* и 12-5, *б*).

Трехфазные трансформаторы. Конструктивное оформление трехфазных трансформаторов является аналогичным конструкции однофазных трансформаторов с тем отличием, что они должны иметь уже три отдельные фазовые обмотки высшего и низшего напряжения *A*, *B* и *C* (рис. 12-2, *е*, *ж*, *з*). Трехфазный стержневой трансформатор имеет принципиальную форму сцепления обмоточных и магнитных звеньев, показанную на рис. 12-2, *е*, представляющую собой дальнейшее развитие трехзвенного сцепления двух магнитных звеньев и одного обмоточного по рис. 12-2, *в*. В этом случае одно обмоточное звено расщепляется на три отдельных обмоточных звена для всех трех фаз, что дает пятизвенное сцепление трех звеньев обмоток и двух магнитных звеньев.

Если расщепить, далее, каждое магнитное звено на два самостоятельных по рис. 12-2, *ж*, то получится броневой трехфазный трансформатор, имеющий семизвенное сцепление, состоящее из трех звеньев обмоток и четырех магнитных звеньев. Подобным же образом пятизвенный однофазный трансформатор (рис. 12-2, *д*) при добавлении одного звена обмотки и одного магнитного звена превращается в принципиальную семизвенную систему (рис. 12-2, *з*), состоящую из трех

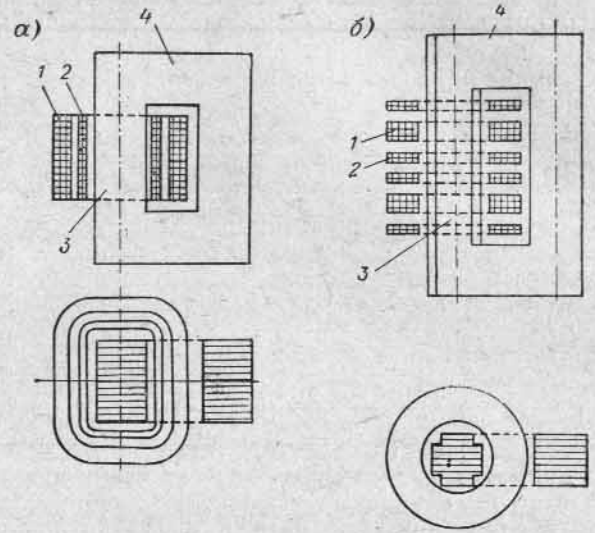


Рис. 12-3. Однофазный стержневой трансформатор с обмотками на одном стержне: *а* — с концентрическими обмотками; *б* — с чередующимися обмотками

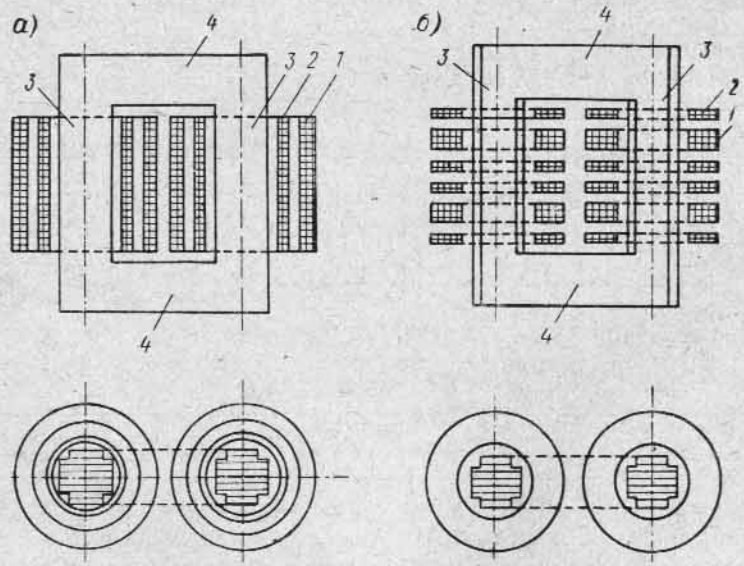


Рис. 12-4. Однофазный стержневой трансформатор: *а* — с концентрическими обмотками; *б* — с чередующимися обмотками

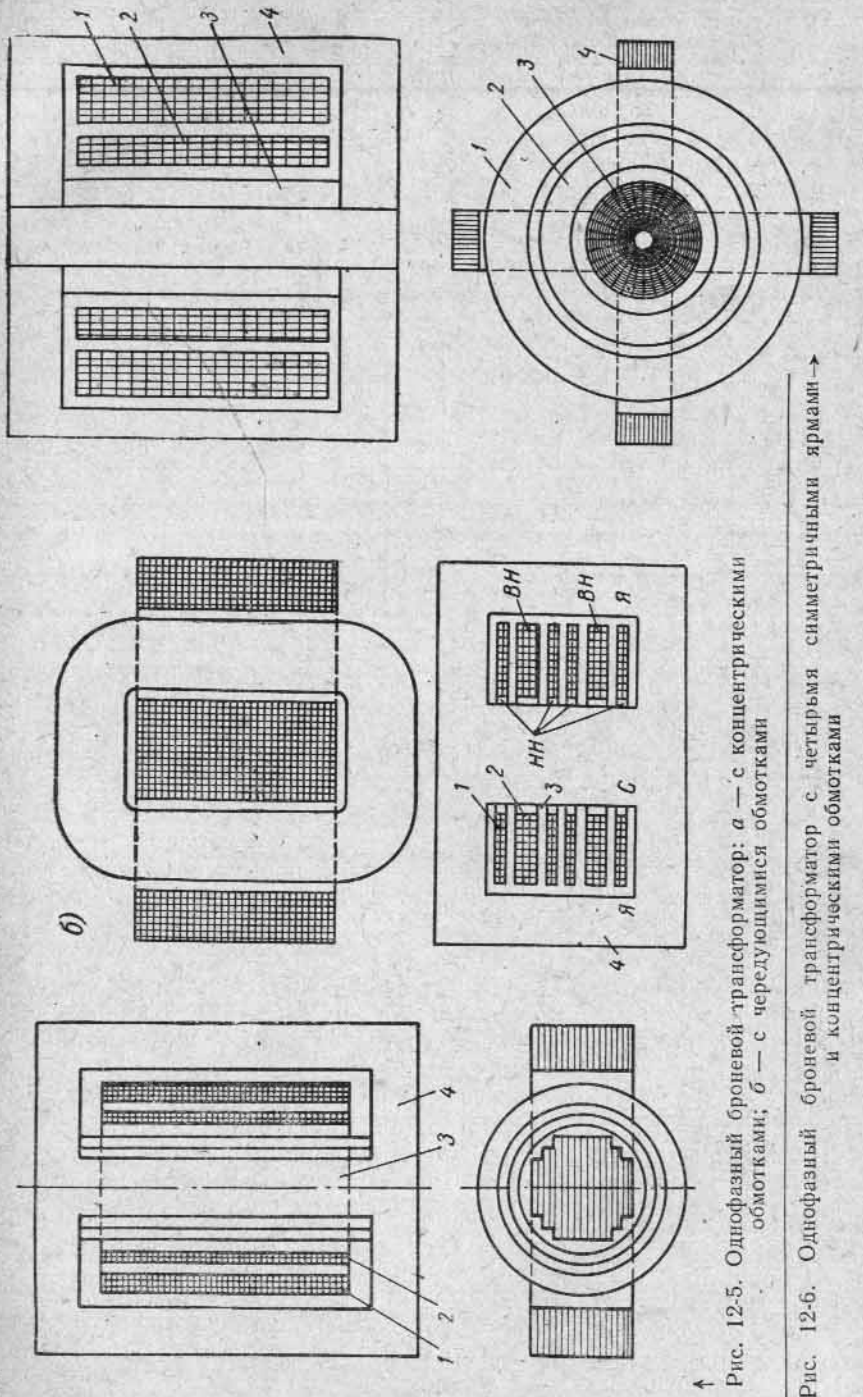


Рис. 12-5. Однофазный броневой трансформатор: *а* — с концентрическими обмотками; *б* — с чередующимися обмотками

Рис. 12-6. Однофазный броневой трансформатор с четырьмя симметричными ярмами → и концентрическими обмотками

звеньев обмоток и четырех магнитных звеньев. Нетрудно усмотреть, что по существу семизвенная система броневого трансформатора, (рис. 12-2, *з*) является с принципиальной точки зрения совершенно аналогичной семизвенной системе пятистержневого трехфазного трансформатора, изображенного на рис. 12-2, *ж*.

Конструктивное выполнение трехфазного трехстержневого трансформатора с цилиндрическими обмотками, представленное на рис. 12-7, соответствует принципиальному осуществлению по пятизвенной схеме рис. 12-2, *е*.

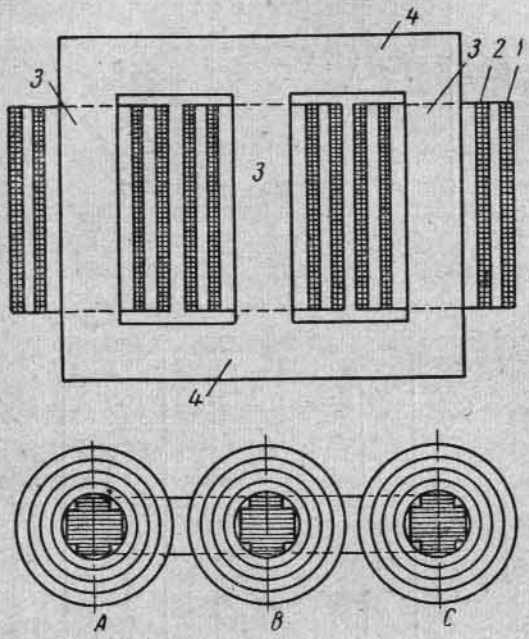


Рис. 12-7. Трехфазный трехстержневой трансформатор с концентрическими обмотками

Конструктивное выполнение трехфазного пятистержневого трансформатора с цилиндрическими обмотками, показанное на рис. 12-8, соответствует принципиальному осуществлению по семизвенной схеме рис. 12-2, *ж*.

Конструктивное выполнение трехфазного броневого трансформатора с чередующимися кольцевыми обмотками дано на рис. 12-9; оно соответствует принципиальному осуществлению по девятизвенной схеме рис. 12-2, *и*, но так как шесть магнитных систем в этом случае могут осуществляться в виде одной общей магнитной системы, то конструктивно эта система выполняется в виде четырехзвенной системы из трех обмоточных систем и одной общей магнитной системы.

Обмотки трех фаз стержневого трехфазного трансформатора расположены на трех стержнях его сердечника, соединяемых ярмами и лежащих в одной плоскости (см. рис. 12-7), вследствие чего такой сердечник и такой трансформатор являются не вполне симметричными. Несимметрия заключается в том, что, например, фазы обмоток *A* и *B* расположены различно относительно третьей фазы *C*. Как будет видно ниже, в магнитном отношении трехфазный стержневой трансформатор типа, изображенного на рис. 12-7, уже нельзя рассматривать как комбинацию из трех однофазных трансформаторов. Напротив, трехфазные трансформаторы броневого типа (см. рис. 12-9) в действительности представляют собой сочетание трех однофазных трансформаторов, из которых каждый имеет как бы свою независимую магнитную цепь.

Вышеупомянутый принцип принудительного распределения магнитного потока может быть применен и для трехфазных трансформаторов, каковыми, например, являются пятистержневые трансформаторы на рис. 12-8. В этом случае обмотки трех фаз *A*, *B* и *C* расположены на трех средних стержнях, и боковые стержни (деталь *5*) приблизительно половинного сечения служат, собственно говоря, дополнительными ярмами. Эта конструкция применяется главным образом в особо мощных трансформаторах весьма высоких напряжений с целью снижения высоты трансформатора приблизительно на высоту одного ярма, что является особо важным для возможности вписывания трансформатора в перевозочный габарит железных дорог.

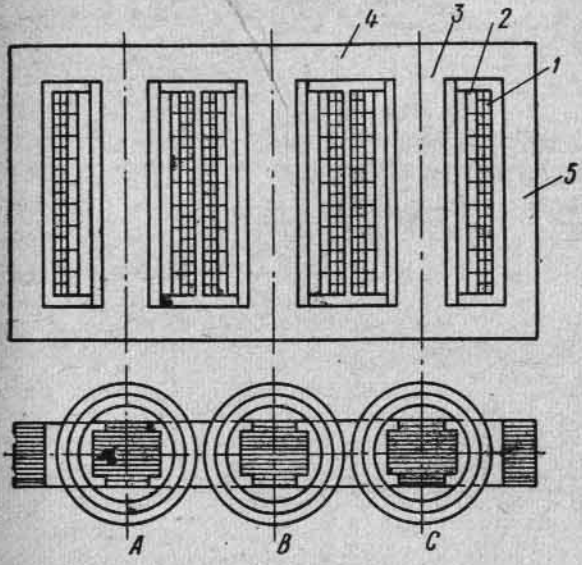


Рис. 12-8. Трехфазный пятистержневой трансформатор с концентрическими обмотками

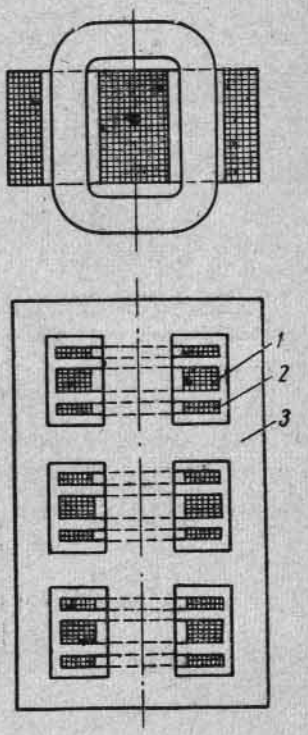


Рис. 12-9. Трехфазный броневой трансформатор с чередующимися обмотками

Три однофазных трехзвенных трансформатора с тремя обмотками и шестью магнитными системами составляют систему трехфазного девятизвенного броневого трансформатора, в котором, однако, шесть магнитных систем могут быть, как было сказано выше, конструктивно объединены в одну общую магнитную систему.

Три однофазных трехзвенных трансформатора с шестью обмотками и тремя магнитными системами по рис. 12-2, *б* составляют также девятизвенную систему стержневых трансформаторов, но они не могут быть объединены в одну общую магнитную систему.

Из рассмотренных принципиальных многозвенных систем для стержневых трансформаторов употребительными являются системы, изображенные на рис. 12-2, *а*, *б*, *д* и *е*, а для броневых трансформаторов — системы на рис. 12-2, *в*, *г*, *ж* и *и*.

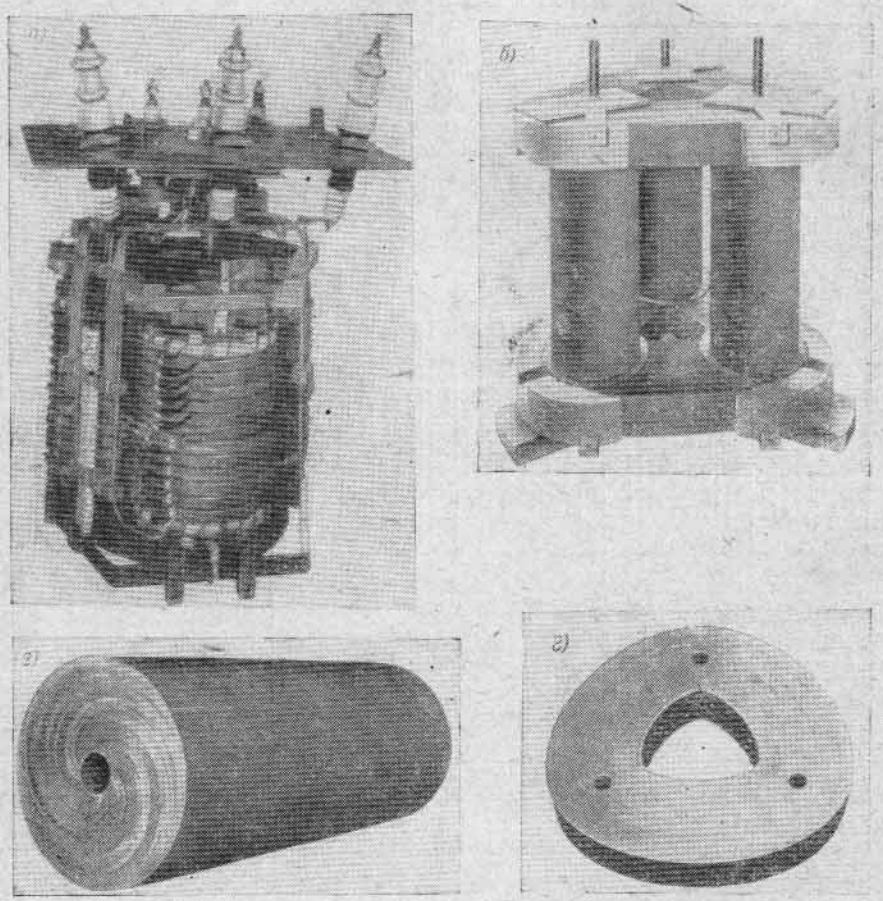


Рис. 12-10. Трехфазный трансформатор фирмы «Броун—Бовери» с симметричной магнитной системой и эвольвентными стержнями: *а* — активная (выемная) часть; *б* — магнитная система; *в* — эвольвентный стержень; *г* — ярмо

Известным преимуществом броневого трансформатора является его более короткая магнитная цепь, что позволяет иметь меньший относительный ток холостого хода, и бóльшая простота его обмоток из-за меньшего числа витков, так как сечение сердечника у броневых трансформаторов можно выбирать бóльшим, чем у стержневых. Недостатком этого типа является меньшая доступность обмоток для охлаждения, бóльшая трудность осмотра и ремонта, а также бóльшая

затрата изоляционных материалов при высоких напряжениях по сравнению с трансформаторами стержневого типа. Напротив, для получения больших токов низкого напряжения трансформаторы броневого типа являются более пригодными, в особенности однофазные печные трансформаторы, которые для этой цели применяются и в СССР.

Нужно отметить, что первые системы трехфазных стержневых трансформаторов, предложенные и разработанные их изобретателем М. О. Доливо-Добровольским, имели стержни, расположенные равномерно в трех плоскостях по окружности ярма. Вследствие этого такие трансформаторы были вполне симметричными в магнитном отношении. Так как конструкции и производство этих трансформаторов достаточно сложные, они были заменены несимметричными трансформаторами со стержнями, расположенными в одной плоскости (см. рис. 12-7). Однако в последнее время швейцарская фирма «Броун—Бовери», применявшая для однофазных броневых трансформаторов конструкцию типа рис. 12-6, для стержневых трехфазных трансформаторов возвратилась в первоначальной конструкции с симметричной магнитной цепью по системе М. О. Доливо-Добровольского (по рис. 12-10), хотя расположение листов электротехнической стали в стержне получается в них несколько более сложным, так как требует эвольвентной формы загиба листов электротехнической стали.[1] Сравнивая трехфазный трансформатор с группой из трех однофазных трансформаторов на то же номинальное напряжение, можно показать, что трехфазный трансформатор получается заметно выгоднее трех однофазных на ту же общую мощность как по массе (на 20—30%) и соответственно по цене, так и по величине к. п. д.

В США однофазные трансформаторы находят широкое применение как для трехфазных линий передачи, так и в распределительных сетях, причем броневой тип достаточно распространен.

12-5. Основные конструктивные элементы трансформаторов

Трансформатор состоит из следующих главных частей: а) сердечника, б) обмотки, в) бака с маслом, если трансформатор масляный, и г) выводных изоляторов.

А. Сердечник трансформатора. Сердечником трансформатора называется система, образующая магнитную цепь его со всеми деталями. Как было указано выше, по типу сердечника различают:

1) трансформаторы стержневые, в которых обмотки охватывают стержни сердечника;

2) трансформаторы броневые, в которых обмотки частично охватываются сердечником.

Независимо от типа сердечника он набирается из листов специальной, так называемой трансформаторной стали толщиной 0,35 или 0,5 *мм*. В настоящее время применяются два основных вида трансформаторной стали: горячекатаная и холоднокатаная.

[1] BBC Mit. 1962, No 6.

Последняя имеет в направлении проката лучшие по сравнению с первой магнитные характеристики (см. табл. В-5), но требует специальных приемов сборки сердечника (подробнее — см. ниже, § 13-4).

Для изоляции листов стали применяется бумага толщиной 0,03 *мм* и масляный лак. Бумажная изоляция значительно дешевле лаковой, но имеет меньшую теплопроводность и нагревостойкость и меньшую механическую прочность. Кроме того, бумажная изоляция дает больший процент заполнения площади сечения сердечника изоляцией. На этом основании в трансформаторах большой мощности, где эти недостатки имеют существенное значение, отдают предпочтение лаковой изоляции.

Как правило, сборка сердечника силовых трансформаторов большой мощности (больше 100 *кв·а*) производится из листов стали толщиной 0,5 *мм*, так как такая сборка менее трудоемка, чем сборка из листов толщиной 0,35 *мм*.

Сердечники однофазного и трехфазного стержневых трансформаторов с расположенными на них обмотками показаны в схематическом виде на рис. 12-4 и 12-7. Здесь: *3—3* — стержни, *4—4* — верхнее и нижнее ярма.

В трехфазных трансформаторах очень большой мощности сердечник состоит из трех главных стержней, на которых располагаются обмотки, и двух добавочных по бокам стержней без обмоток (рис. 12-8). Этим достигается уменьшение высоты ярма (так как поток стержня имеет возможность разветвиться), а стало быть, и сердечника за счет некоторого уменьшения его длины, что облегчает перевозку трансформатора по железной дороге.

Соединение сердечников с ярмами может быть произведено либо встык, либо впереплет (так называемые стыковая и шихтованная конструкции). При сборке встык стержни и ярма собираются отдельно, а затем соединяются с помощью крепежных частей. Такая конструкция сердечника облегчает посадку обмоток на стержни, так как для этого нужно только снять верхнее ярмо. При сборке впереплет весь сердечник набирается сразу (рис. 12-11), поэтому при посадке обмотки на стержень приходится расшихтовывать верхнее ярмо, а затем после посадки обмотки снова зашихтовывать его. Таким образом, второй способ сложнее первого, но зато имеет ряд ценных преимуществ, а именно:

1. При сборке впереплет зазор в месте стыка листов стержней и ярем может быть сделан минимальным, так как место стыка в одном слое перекрывается листом в другом слое. Наоборот, при сборке встык нужно проложить между стержнем и ярмом изоляционную прокладку толщиной 0,5 — 1 *мм*, чтобы избегнуть образования в месте стыка вихревых токов (рис. 12-12) и связанного с ними увеличения добавочных потерь и даже «пожара в стали» вследствие чрезмерного повышения температуры стали в месте стыка. Отсутствие прокладки в шихтованной конструкции позволяет значительно уменьшить ток холостого хода.

2. При сборке впереплет заметно увеличивается механическая устойчивость сердечника, тогда как стыковая конструкция требует

относительно мощных крепежных частей для надлежащего сопряжения стержней и ярем. Поэтому масса крепежных частей при сборке впереплет значительно меньше, чем при сборке встык. Так, например, по данным МТЗ, масса креплений в трансформаторе мощностью 5600 *кв·а*, 35 *кв* составляла 21,5% от массы активной стали сердечника

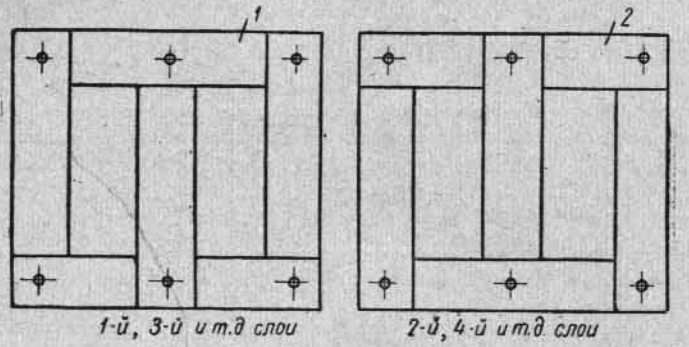


Рис. 12-11. Сборка сердечника впереплет

в стыковой конструкции и уменьшилась до 8% после перехода на сборку впереплет.

Ввиду таких преимуществ способ сборки сердечника впереплет принят в СССР для силовых трансформаторов всех мощностей. Поэтому в дальнейшем мы будем иметь в виду только эту конструкцию сердечника.

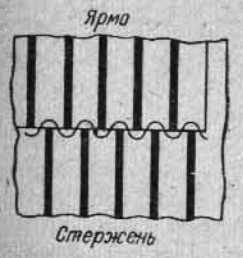


Рис. 12-12. Образование вихревых токов в месте стыка при отсутствии изолирующей прокладки

В поперечном сечении стержню придают форму ступенчатого многоугольника, вписанного в окружность с диаметром D_0 (рис. 12-13, *а, б, в*). Это делают для лучшего использования места внутри окружности. Число ступеней $n_{ст}$ зависит от величины диаметра D_0: при $D_0 \leqslant 100$ *мм* $n_{ст} = 4$, при $D_0 = 100 \div 500$ *мм* оно равно 5—6, при D_0 до 1000 *мм* оно достигает 9—10.

На рис. 12-13, *а* показан пятиступенчатый стержень со стяжкой стержня с помощью шпилек.

В трансформаторах средней и большой мощности с диаметром стержня $D_0 \geqslant 350$ *мм* для улучшения охлаждения стали сердечника его разбивают на пакеты, отделенные друг от друга продольными масляными каналами шириной 6 *мм* (рис. 12-13, *б*). В трансформаторах очень большой мощности с диаметром стержня $D \geqslant 800$ *мм* дополнительно устраивают еще поперечные каналы шириной 10—12 *мм* каждый (рис. 12-13, *в*). В этом случае сердечник трансформатора состоит из двух отдельных рам.

Активное сечение ярма делают либо равным сечению стержня, либо увеличивают его на 5—10%, чтобы уменьшить потери в стали ярма и ток холостого хода.

Из соображений технологического порядка сечению ярма придают более простую форму, чем сечению сердечника, хотя при этом магнитный поток неодинаково распределяется по сечениям этих частей, что ведет к возникновению добавочных потерь в стали. В СССР применяются прямоугольные, крестообразные и Т-образные ярма (рис. 12-14, *а*, *б*, *в*, *г*).

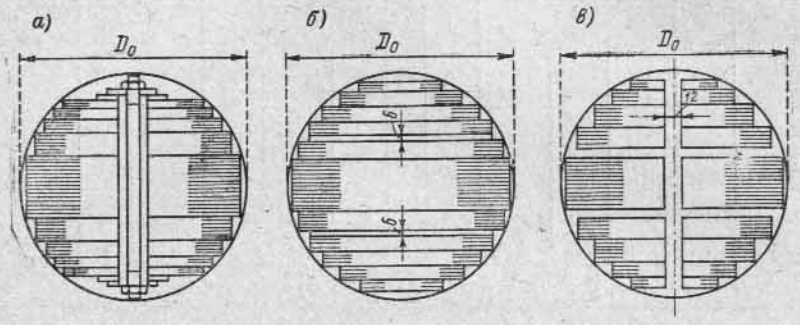


Рис. 12-13. Ступенчатая форма сечения стержня: *а* — без каналов; *б* — с продольными каналами; *в* — с продольными и поперечными каналами

Ярмо с сечением, показанным на рис. 12-14, *а*, применяется в трансформаторах сравнительно малой мощности. Ярма на рис. 12-14, *б*, *в* — в трансформаторах средней мощности. Т-образное ярмо с уступом вниз (рис. 12-14, *г*) — в трансформаторах большой мощности.

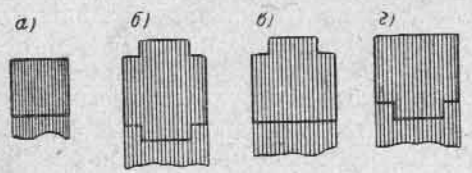


Рис. 12-14. Формы сечения ярма силовых трансформаторов

Если в стержне имеются каналы, то с этими каналами должны совпадать каналы в ярме, чтобы обеспечить свободную циркуляцию масла.

Сердечник однофазного броневого трансформатора показан на рис. 12-5. Стержень *С* располагается посередине, а ярма *Я—Я* — по обе стороны от стержня, частично охватывая собой обмотку. Сечение ярем приблизительно вдвое меньше сечения стержня соответственно разветвлению потока стержня на две части. По форме стержень представляет собой в сечении прямоугольник с отношением сторон приблизительно 1 : 2. Опыт показывает, что стержневые трансформаторы по сравнению с броневыми проще в конструктивном отношении, позволяют легче собирать и изолировать обмотки, особенно высокого напряжения, и устойчивее механически при коротких замыканиях. Поэтому в настоящее время броневая конструкция используется при изготовлении силовых трансформаторов некоторых специальных типов, например печных и трансформаторов, устанавливаемых на подземных электро-

станциях. В США броневые трансформаторы выполняются фирмой «Вестингауз», а в Европе — фирмами «Шнейдер — Вестингауз» и «Жемон».

В дальнейшем мы будем иметь в виду главным образом трансформаторы стержневого типа.

Независимо от типа сердечника его активная сталь и все крепежные части, за исключением стяжных шпилек, должны быть заземлены. Для этого они соединяются с баком, причем число и расположение заземляющих соединений определяются конструкцией сердечника.

Б. Обмотки трансформатора. Обмотки трансформаторов должны удовлетворять ряду требований, из которых наибольшее значение имеют следующие: а) обмотка должна быть экономична как в отношении первоначальных затрат с учетом степени дефицитности меди, так и в отношении к. п. д. трансформатора при его эксплуатации; б) тепловой режим обмотки должен соответствовать требованиям стандарта, так как отступление от этих требований в сторону допуска бóльших температур резко сокращает срок службы трансформатора; в) обмотка должна быть механически устойчива в отношении усилий, возникающих при внезапных коротких замыканиях трансформатора; г) обмотка должна обладать необходимой электрической прочностью в отношении перенапряжений.

Эти требования часто взаимно противоречивы. Так, например, при бóльшей плотности тока в обмотке затрата меди меньше, но больше потери в меди и, следовательно, ниже к. п. д. трансформатора. При допущении бóльших превышений температуры обмоток уменьшаются габариты трансформатора, но сокращается срок его службы и т. д. Поэтому современная конструкция обмоток трансформатора, особенно трансформатора высокого напряжения, представляет собой результат длительной работы, проверенной опытом эксплуатации трансформаторов.

По способу расположения обмоток высшего и низшего напряжений (ВН и НН) относительно друг друга различают: а) концентрические обмотки, т. е. такие, которые в каждом поперечном сечении представляют собой окружности, имеющие общий центр; б) чередующиеся, в которых части обмоток ВН и НН попеременно следуют друг за другом по высоте стержня.

Концентрическая обмотка показана в схематическом виде на рис. 12-3, *а*, 12-4, *а*, 12-5, *а*, 12-6, 12-7 и 12-8. Обычно ближе к стержню располагают обмотку НН, так как по сравнению с обмоткой ВН ее легче изолировать от стержня.

Основными типами концентрических обмоток являются: а) цилиндрическая слоевая обмотка; б) винтовая обмотка и ее видоизменения и в) непрерывная обмотка.

Цилиндрическая слоевая обмотка. Если сечение витка не превышает 8—10 *мм*², то цилиндрическая обмотка выполняется как многослойная из проводов круглого сечения; при бóльших сечениях витка — чаще всего как двухслойная из проводов прямоугольного сечения (рис. 12-15). Слой обмотки образует витки, наматываемые по винтовой линии вдоль образующей цилиндра впри-

тык друг к другу. Таким образом, высота обмотки равна высоте слоя. Прямоугольный провод может наматываться плашмя или на ребро. В первом случае бо́льшую сторону провода располагают в осевом направлении обмотки, во втором случае — в радиальном. Если сечение витка превышает 40—45 *мм*², то виток делают из нескольких одиночных проводов, которые располагаются рядом по высоте слоя так, чтобы все они занимали одинаковое положение по отношению к полю рассеяния.

Для улучшения охлаждения между слоями обмотки оставляют ка-

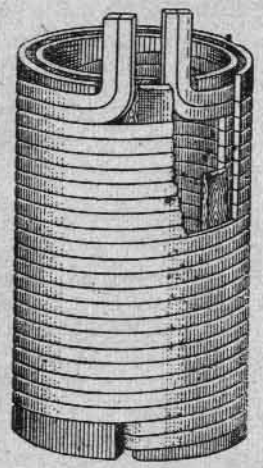


Рис. 12-15. Цилиндрическая двухслойная обмотка

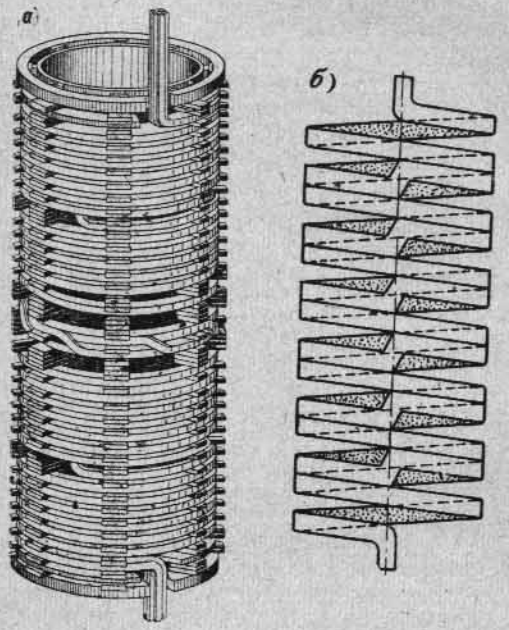


Рис. 12-16. Винтовая обмотка: *а* — простая; *б* — полувинтовая

нал шириной 5—8 *мм* (бо́льшая цифра относится к трансформаторам бо́льшей мощности).

Основная область применения цилиндрических обмоток — трансформаторы малых габаритов мощностью до 560 *кв·а*.

В первый период развития отечественного трансформаторостроения широко применялась катушечная слоевая обмотка из круглого провода, состоящая из нескольких катушек, изолируемых друг от друга электрокартонными шайбами или масляными каналами. В настоящее время она почти вытеснена цилиндрической обмоткой, так как по сравнению с последней оказалась значительно более трудоемкой.

Винтовая обмотка. Различают: а) простую винтовую обмотку, в которой, так же как в цилиндрической, витки наматываются по винтовой линии, но в которой между двумя соседними по высоте витками оставляют канал шириной 4,5 — 6 *мм* (рис. 12-16, *а*), и б) полувинтовую обмотку, в которой

каждые два витка, за исключением концевых, объединяются в одну катушку без канала (рис. 12-16, *б*).

Виток винтовой или полувинтовой обмотки состоит из ряда параллельных проводов прямоугольного сечения, располагаемых в радиальном направлении обмотки плашмя впритык друг к другу. Для

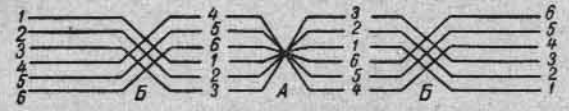


Рис. 12-17. Схема перекрещивания витков простой винтовой обмотки

возможно более равномерного распределения тока между параллельными ветвями прибегают к перекрещиванию (транспозиции) проводов. На рис. 12-17 показана схема перекрещивания витков винтовой обмотки в трех местах по ее высоте: посередине — так называемое серединное перекрещивание *А* и два групповых перекрещивания *Б*, выполняемых так, чтобы обмотка делилась на четыре части, приблизительно равные по высоте обмотки.

Число параллельных проводов в витке винтовой обмотки — обычно от 6 до 20. Винтовая обмотка широко применяется при выполнении обмоток НН трансформаторов средней и, особенно, большой мощности.

Непрерывная обмотка. В трансформаторах высокого напряжения (на 35 *кв* и выше) применяют непрерывную обмотку, которая в отличие от винтовой обмотки представляет собой ряд плоских катушек — дисков, отделенных друг от друга каналами (рис. 12-18). Характерной и весьма ценной особенностью непрерывной обмотки является то, что ее катушки соединяются между собой без пайки путем особого способа перекладки одной из катушек в каждый паре их. Если виток обмотки состоит из нескольких параллельных проводов, то, так же как в винтовой обмотке, прибегают к их перекрещиванию.

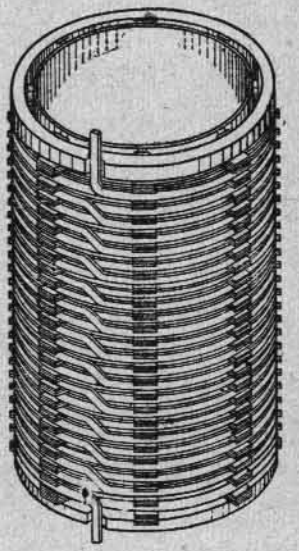


Рис. 12-18. Непрерывная обмотка

В том случае, когда непрерывная обмотка служит обмоткой ВН, в ней делают ответвления для регулирования коэффициента трансформации в пределах $\pm$ 5% или 2 $\times$ ($\pm$ 2,5%).

Особо важное значение имеет вопрос об изоляции обмоток, так как они часто испытывают значительные перенапряжения, в отношении которых обмотки должны обладать необходимой электрической прочностью. Этот вопрос подробно рассматривается ниже, в главе о перенапряжениях.

Чередующаяся обмотка показана в схематическом виде на рис. 12-3, *б*, 12-4, *б*, 12-5, *б* и 12-9. Здесь части обмоток ВН и НН чередуются и расположены так, чтобы ближе к ярму находились катушки обмотки НН. Основная область применения чередующихся обмоток — броневые трансформаторы. По сравнению с концентрическими обмотками они имеют ряд недостатков: более трудоемки при изготовлении, менее устойчивы в отношении коротких замыканий и труднее изолируются друг от друга и от ярма.

Основным конструктивным типом трансформатора в СССР является трансформатор со стержневым сердечником и концентрической обмоткой.

В. Бак масляного трансформатора. В настоящее время наибольшее значение имеют масляные трансформаторы, в которых собственно трансформатор, или так называемая выемная часть его, т. е. сердечник с расположенными на нем обмотками, помещается в бак с маслом. Нагреваясь, масло начинает циркулировать внутри бака и этим обеспечивает естественное охлаждение трансформатора.

Конструкция бака находится в тесной связи с тепловым расчетом трансформатора. Обычная форма бака силового трансформатора — овальная. В механическом отношении бак должен выдерживать избыточное внутреннее давление 0,5 *ат*. Бак устанавливается на тележке с катками, которые должны быть рассчитаны на полную массу трансформатора.

Условия охлаждения трансформатора тем тяжелее, чем больше мощность трансформатора. Соответственно этому изменяется и конструкция бака трансформатора, а именно:

1) трансформаторы очень малой мощности — примерно до 30 *кв·а* — имеют гладкие баки, являющиеся простейшим типом баков;

2) в трансформаторах большей мощности — примерно до 3000 *кв·а* — применяют трубчатые баки, в стенки которых вваривают трубы диаметром около 50 *мм*, располагаемые в один-три ряда (рис. 12-19). Ранее применявшиеся баки из волнистого железа в настоящее время не применяются, так как по сравнению с трубчатыми они менее прочны механически и хуже охлаждают трансформатор;

3) трансформаторы мощностью примерно до 10 000 *кв·а* имеют пристроенные к стенкам бака охладители-радиаторы с естественным охлаждением. Радиатор состоит из двух сборных коробок — верхней и нижней (*1* на рис. 12-20), которые присоединяются к стенкам бака с помощью фланцев *2* и в которые вваривают в два ряда трубы *3* диаметром около 50 *мм* и толщиной около 2 *мм*.

Трубы располагаются либо с одной стороны сборной коробки — одиночный радиатор, либо с обеих сторон ее — сдвоенный радиатор. Относительно стенок бака радиаторы располагаются либо по касательным к ним, либо радиально. В большинстве случаев применяют систему сдвоенных радиаторов радиального типа;

г) в трансформаторах мощностью от 10 000 *кв·а* и выше применяют обдув радиаторов. Первоначально широко применялась

централизованная система обдува с помощью одного или двух вентиляторных агрегатов. Опыт показал, что такая система менее экономична, чем система обособленного

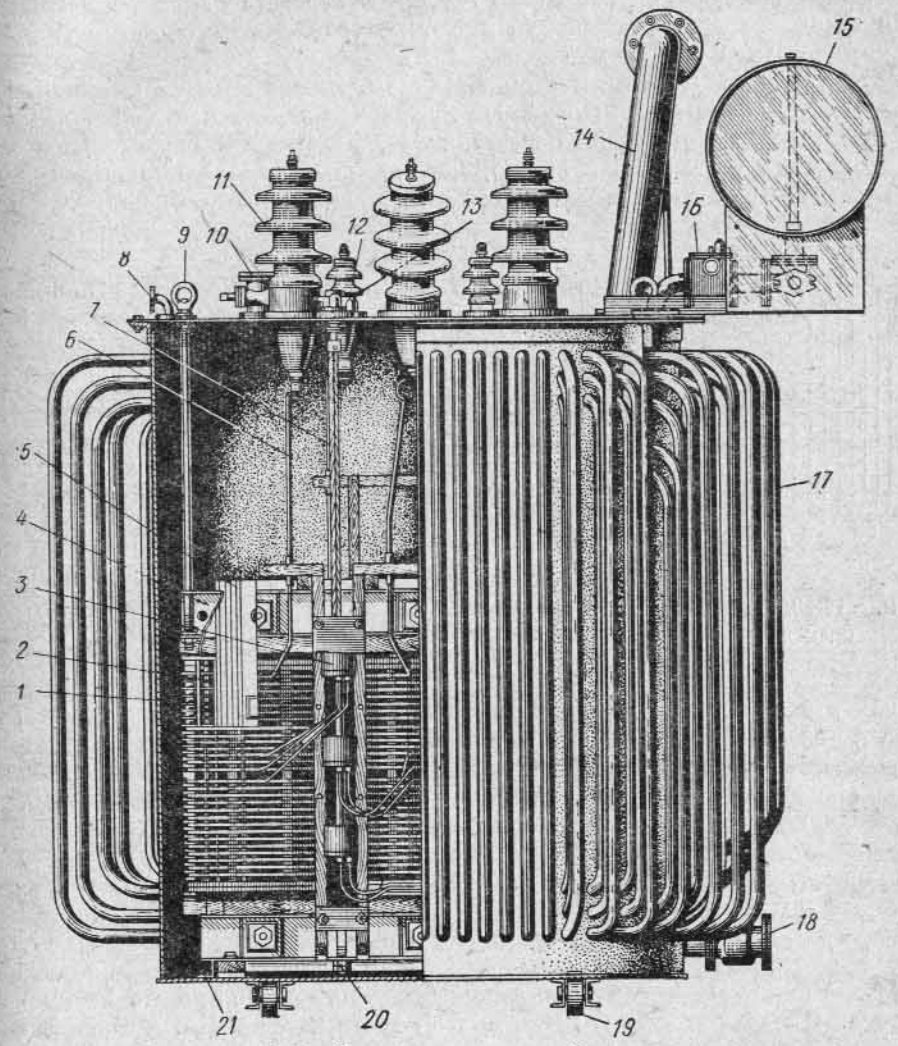


Рис. 12-19. Трансформатор с трубчатым баком

1 — обмотка высшего напряжения (ВН); *2* — обмотка низшего напряжения (НН); *3* — встроенный переключатель регулировочных ответвлений обмотки ВН; *4* — швеллер, прессующий ярмо; *5* — шихтованный магнитопровод; *6* — отводы ВН; *7* — отводы НН; *8* — патрубок для присоединения вакуумного насоса; *9* — кольцо для подъема выемной части; *10* — кран для заливки масла; *11* — ввод (изолятор) ВН; *12* — ввод (изолятор) НН; *13* — привод переключателя; *14* — выхлопная труба; *15* — расширитель; *16* — газовое реле; *17* — трубчатый бак; *18* — кран для спуска масла; *19* — транспортный ролик; *20* — вертикальная шпилька, стягивающая швеллеры; *21* — упорный угольник на дне бака;

обдува радиаторов с помощью одного или нескольких вентиляторов мощностью 150—200 *вт*, устанавливаемых на каждом радиаторе (*4* на рис. 12-20).

В трансформаторах, устанавливаемых на гидростанциях, применяют охлаждение масла водой в маслоохладителях того или иного типа. В этом случае осуществляют принудительную циркуляцию масла с помощью специального насосного агрегата. Трансформаторы с таким способом охлаждения имеют по сравнению с обычными значительно меньшие габариты.

Г. Крышка бака и выводы. Крышка бака является существенным элементом конструкции бака. На крышке расположен целый ряд деталей, из которых наибольшее значение имеют: а) выводные изоляторы для обмоток ВН и НН; б) маслорасширитель — в трансформаторах от 100 *кв·а* и выше; в) выхлопная (предохранительная) труба для трансформаторов мощностью от 1000 *кв·а* и выше.

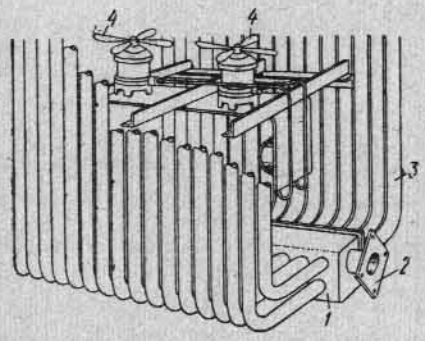


Рис. 12-20. Двойной трубчатый радиатор с обособленным обдувом

В трансформаторах на напряжение до 35 *кв* применяются фарфоровые изоляторы с воздушным или масляным заполнением. На рис. 12-21 показан изолятор (ввод) на 35 *кв*, 275 *а* для наружной установки. В трансформаторах на 110 *кв* и выше применяются маслонаполненные изоляторы, во внутренней полости которых устанавливают ряд концентрически расположенных бумажно-бакелитовых цилиндров (рис. 12-22). Размеры и масса изоляторов сильно растут с повышением напряжения; так, например, полная высота изоляторов для трансформаторов на 110, 150 и 220 *кв* составляет 2500, 3080 и 4490 *мм*; соответственно масса этих изоляторов — 340, 720 и 1750 *кг*.

Маслорасширитель и выхлопная труба показаны на рис. 12-19. Маслорасширитель представляет собой цилиндрический сосуд из листовой стали, устанавливаемый над крышкой бака и соединяемый с ним трубопроводом. Уровень масла в расширителе должен быть таким, чтобы при всех обстоятельствах бак был целиком заполнен маслом. Так как поверхность масла в расширителе гораздо меньше, чем в баке, а температура масла в расширителе значительно ниже, чем в верхней части бака, то процесс окисления масла при соприкосновении с воздухом идет медленнее; этим достигается достаточно надежная защита масла и изоляции трансформатора.

Между расширителем и баком устанавливается газовое реле (*16* на рис. 12-19), сигнализирующее о возникающей в трансформаторе неполадке или, если последняя имеет аварийный характер, отключающее трансформатор от сети.

Для защиты бака от повреждений, возможных при коротком замыкании вследствие образования в баке газов и резкого повышения давления, служит выхлопная труба. Она представляет собой стальной, обычно наклонный цилиндр, сообщающийся с баком и закрытый

сверху стеклянным диском; при определенном давлении диск выдавливается, и газы вместе с маслом выбрасываются из бака наружу.

Д. Трансформаторное масло. В целях лучшей изоляции и лучшего охлаждения активной части трансформатора последнюю помещают в бак, заполняемый минеральным трансформаторным маслом. Применяемое в СССР нефтяное масло имеет следующие основные характеристики (предполагается эксплуатационное масло): плотность (при + 20° С по отношению к воде при + 4° С) не более 0,895, электрическую прочность 20—35 *кв/мм*, теплоемкость 1790—1870 *вт/(кг·град)*, температуру вспышки не ниже 135°С, температуру застывания — 35° С, объемный коэффициент расширения 0,069% на 1 *град*.

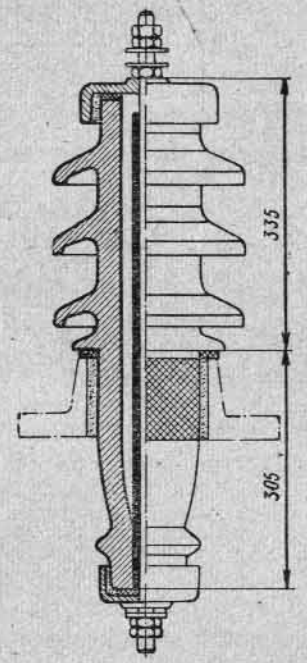


Рис. 12-21. Ввод на 35 *кв* с масляным заполнением

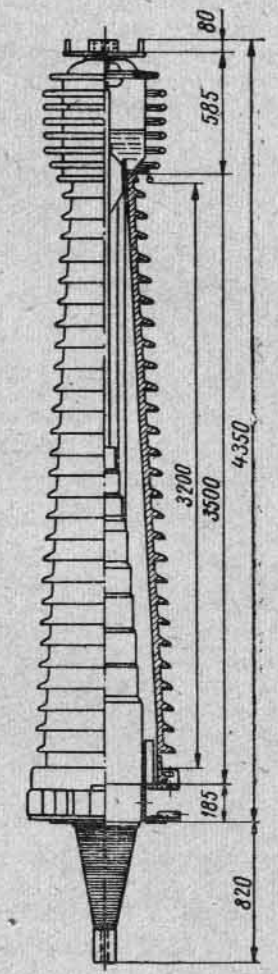


Рис. 12-22. Маслонаполненный ввод на 400 *кв*

Наряду с указанными выше ценными свойствами, трансформаторное масло имеет два основных недостатка: а) оно горюче и б) его пары при некоторых условиях образуют с воздухом взрывчатые смеси. Поэтому в зданиях общественного характера, на шахтах, в цехах

заводов и т. д. предпочтительнее сухие трансформаторы или залитые специальной негорючей и взрывобезопасной жидкостью. Из числа последних в США получил широкое распространение пиранол, а в СССР была разработана жидкость, названная совтолом, по своим изоляционным свойствам и охлаждающей способности близкая к минеральному трансформаторному маслу, но не окисляющаяся и химически устойчивая.

Наряду с этим совтол имеет ряд недостатков: он дорог, высоко чувствителен ко всякого рода загрязнениям, требует замены некоторых применяемых в трансформаторостроении материалов другими и при воздействии на него электрической дуги (например, при пробое внутри трансформатора) выделяет хлористый водород, вредный для здоровья человека. С этой точки зрения несомненный интерес представляет сухой трансформатор, выполненный из холоднокатаной стали с изоляцией из стеклянного волокна на теплостойком пропитывающем составе. Но все же основным типом силового трансформатора продолжает оставаться масляный трансформатор, заполненный обычным минеральным трансформаторным маслом.

12-6. Примеры выполненных мощных высоковольтных трансформаторов

В мировой практике используются трансформаторы всех описанных выше типов. Например, в США фирма «GE» применяет стержневые трансформаторы, а фирма «Вестингауз»—броневые. Во Франции фирмы, имеющие связь с фирмой «GE», например фирма «Альстом», применяют также стержневые трансформаторы, а фирмы, имеющие связь с фирмой «Вестингауз», например «Жемон»,— броневые трансформаторы обычного типа. Нужно отметить, что броневые трансформаторы более компактны, занимают меньше места и поэтому более удобно вписываются в железнодорожные габариты, что является существенным при перевозке трансформаторов большой мощности от заводов, их производящих, к местам установки. В последнее время швейцарская фирма «Броун—Бовери» и связанная с ней французская фирма «Электромеханик» начали широко применять однофазные броневые трансформаторы радиально-броневого типа (см. схему рис. 12-2, *г*), которые получили конструктивное оформление магнитной системы по рис. 12-6.

Сравнение различных типов трансформаторов может быть произведено на примере выполненных однофазных автотрансформаторов для четырех подстанций на высоковольтной передаче 380 *кв* во Франции Альпы—Париж протяжением 600 *км*. На подстанциях были установлены трехфазные групповые автотрансформаторы по 100 *Мв·а* в единице на напряжение 380/225/10,5 *кв*, причем на двух подстанциях Плесси-Гассо и Жениссиа применены автотрансформаторы стержневого типа по схеме рис. 12-4 (фирмы «Альстом» и «Савуазьен»), на одной подстанции Альбертвиль-Бати—броневого типа по схеме рис. 12-9 (фирма «Жемон») и на подстанции Греней—радиально-броневого типа по схеме рис. 12-6 (фирма «Электромеханик—Броун—Бовери»).

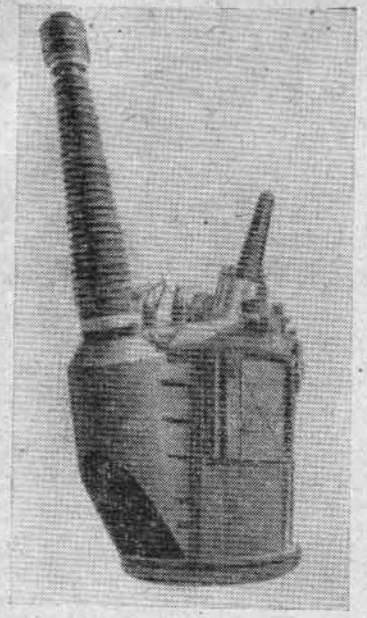


Рис. 12-23. Однофазный автотрансформатор фирмы «Броун—Бовери» на 133 *Мв·а* 220/380 *кв*

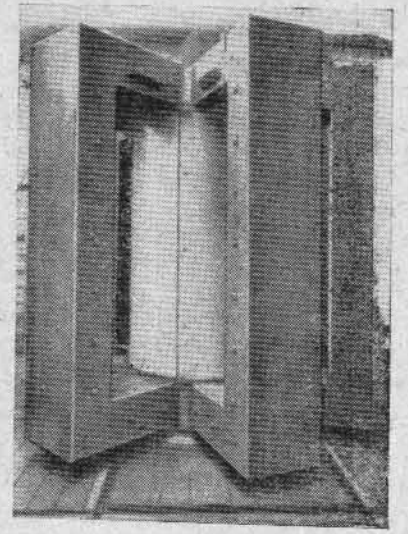


Рис. 12-24. Магнитная система автотрансформатора, показанного на рис. 12-23

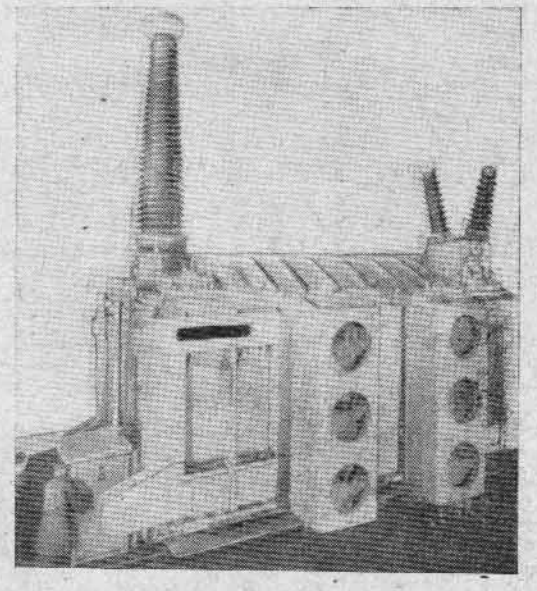


Рис. 12-25. Однофазный трехобмоточный стержневой трансформатор фирмы «Савуазьен» на 100 *Мв·а*, 525/115/11 *кв*

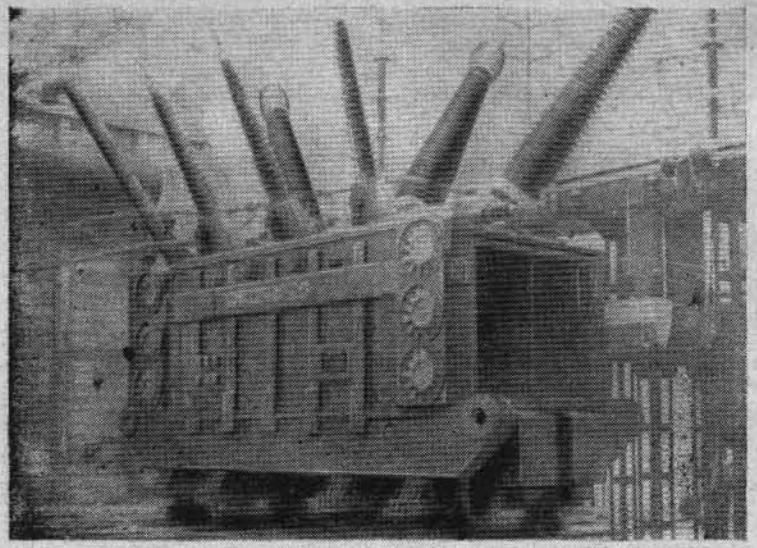


Рис. 12-26. Трехфазный броневой трансформатор фирмы «Жемон» на 100 *Мв·а* 400/225 *кв*

Поскольку все автотрансформаторы работают в идентичных условиях, это дает возможность произвести сравнение типов трансформаторов при одинаковых условиях мощности и напряжения согласно данным табл. 12-1. Все трансформаторы имеют охлаждение с принудительной циркуляцией масла.

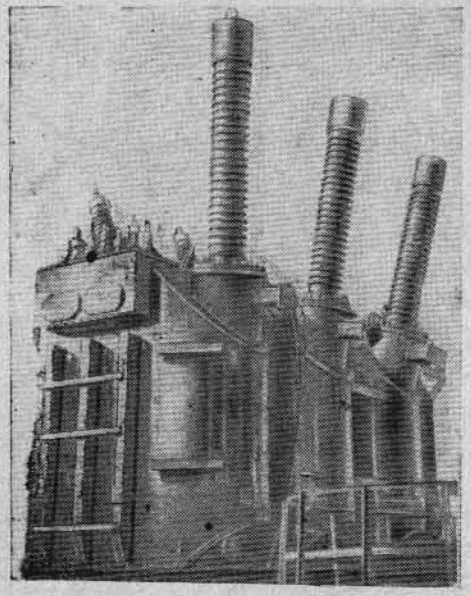


Рис. 12-27. Трехфазный стержневой автотрансформатор Запорожского трансформаторного завода на 120 *Мв·а*, 380 *кв*

Наиболее тяжелыми, с наибольшими потерями являются стержневые трансформаторы на подстанциях Плесси-Гассо и Жениссиа, несколько более легкими, с несколько меньшими потерями оказались броневые трансформаторы обычного типа на подстанции Альбертвиль-Бати и самыми легкими, с наименьшими по-

терями — трансформаторы радиально-броневого типа на подстанции Греней.

Однако наиболее простым в конструктивно-производственном отношении, а также в отношении условий сборки и ремонта оказывается стержневой тип трансформатора, почему он и принят в качестве основного в СССР.

На рис. 12-23 представлена фотография однофазного двухобмоточного броневого автотрансформатора фирмы «BBC» на 133 *Мв·а*, 220/380 *кв*, выполненного с магнитной системой по рис. 12-24. На

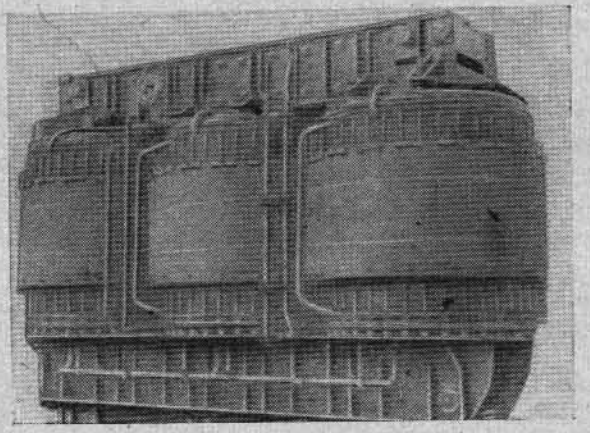


Рис. 12-28. Активная часть трехфазного стержневого трансформатора ТДЦГ-275000/220 (вид со стороны нейтрали) мощностью 275 *Мв·а* при высшем напряжении 220 *кв*

рис. 12-25 приведена фотография трехобмоточного трансформатора стержневого типа французской фирмы «Савуазьен» на 100 *Мв·а*, 525/115/11 *кв*, выполненного этой фирмой для наиболее высоковольт-

Таблица 12-1

Характеристика	Плесси-Гассо	Жениссиа	Альбертвиль-Бати	Греней
Масса, *т*:				
без масла	104	95	102,5	71
с маслом	150	140	125	91
Потери, *квт*:				
в стали	63	65	63	58
в меди	220	210	202	170
суммарные	283	275	265	228
Напряжение короткого замыкания при 380/225 *кв*, %	6,75	7,0	7,4	7,3

ной, действующей в настоящее время линии передачи от Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС в Москву по конструктивной схеме рис. 12-4. Фирмой «ВВС» выполнен трансформатор для опытной линии передачи на 750 *кв* [216б]. На рис. 12-26 представлен броневой трехфазный трансформатор французской фирмы «Жемон» на 100 *Мв·а*, 400/225 *кв*, выполненный по конструктивной схеме рис. 12-9, находящийся на высоковольтной подстанции Мион в районе г. Лиона. На рис. 12-27 показан трехфазный стержневой автотрансформатор Запорожского трансформаторного завода мощностью 120 *Мв·а* при напряжении 330 *кв*; а на рис. 12-28 — выемная часть трехфазного

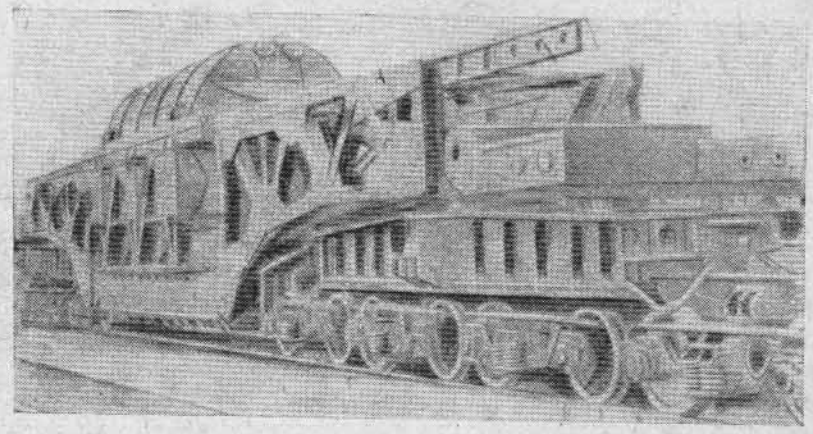


Рис. 12-29. Трансформатор ТДЦГ-275000/220 в транспортном баке на специальном сочлененном транспортере

трансформатора мощностью 275 *Мв·а*, 220 *кв* для работы в блоке с гидрогенератором Братской ГЭС.

Несмотря на столь большую мощность, трансформатор в специальном транспортном баке перевозится на железнодорожной платформе (рис. 12-29).

Глава тринадцатая

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

13-1. Принцип работы трансформатора

Работа трансформатора основывается на принципе электромагнитного взаимодействия двух или в общем случае любого числа контуров, неподвижных относительно друг друга. На рис. 13-1 изображена принципиальная схема однофазного двухобмоточного трансформатора. Если к зажимам $A - X$ одной из обмоток подвести напряжение от сети переменного тока, то под действием связывающего

обе обмотки магнитного потока во вторичной обмотке возникнет переменная э. д. с. и по вторичному контуру будет протекать ток, питающий приключенные к зажимам $a - x$ вторичной обмотки приемники электроэнергии.

Таким путем осуществляется передача энергии переменного тока из первичного контура (первичной сети) во вторичный контур (вторичную сеть).

Для усиления электромагнитной связи между обмотками служит сердечник трансформатора, собранный из листовой электротехнической стали. Чтобы преобразовать (трансформировать) первичное напряжение и первичный ток во вторичное напряжение и вторичный ток, необходимо соответствующим образом рассчитать и выполнить первичную и вторичную обмотки.

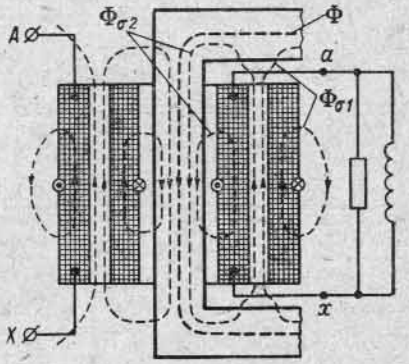


Рис. 13-1. Принципиальная схема трансформатора при нагрузке

13-2. Уравнения н. с. и э. д. с. трансформатора

Анализ работы трансформатора в любом режиме основывается на уравнениях э. д. с. первичной и вторичной обмоток и уравнении н. с.

Пусть u_1 — мгновенное значение напряжения, подводимого к зажимам $A—X$ первичной обмотки трансформатора от сети с частотой f; i_1 и i_2 — мгновенные значения токов в первичной и вторичной обмотках.

Токи i_1 и i_2 создают первичную и вторичную н. с. i_1w_1 и i_2w_2, где w_1 и w_2 — числа последовательно соединенных витков первичной и вторичной обмоток. Согласно второму закону Кирхгофа в применении к магнитным цепям, имеем:

$$i_1w_1 + i_2w_2 = i_0w_1 \qquad (13\text{-}1)$$

или

$$i_1w_1 = -i_2w_2 + i_0w_1. \qquad (13\text{-}2)$$

Здесь $i_0\Phi_1$ — намагничивающая составляющая, необходимая для создания в сердечнике трансформатора потока, мгновенное значение которого мы обозначим через Φ_t. Поток Φ_t распределяется практически равномерно по сечению сердечника трансформатора и сцепляется со всеми витками как первичной, так и вторичной обмоток (жирная штриховая линия на рис. 13-1). Этот поток имеет главное значение и поэтому называется основным.

Основной поток создает в первичной и вторичной обмотках трансформатора э. д. с.

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} = -\frac{d\Psi_{10}}{dt}; \qquad (13\text{-}3)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_t}{dt} = -\frac{d\Psi_{20}}{dt}. \qquad (13\text{-}4)$$

Здесь Ψ_{10} и Ψ_{20} — потокосцепления, соответствующие только основному потоку Φ_t.

Кроме того, н. с. $i_1 w_1$ и $i_2 w_2$ создают первичный и вторичный потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ (тонкие штриховый линии на рис. 13-1), причем под первичным потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ мы будем понимать поток, созданный только током i_1 и сцепленный только с первичной обмоткой, а под вторичным потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ — поток, созданный только током i_2 и сцепленный только со вторичной обмоткой. Так как потоки рассеяния распределяются главным образом в немагнитной среде, имеющей постоянную магнитную проницаемость (масло, воздух, медь и т. д.), то можно считать, что индуктивности рассеяния $L_{\sigma 1} = \text{const}$ и $L_{\sigma 2} = \text{const}$. Соответственно э. д. с. рассеяния, создаваемые потоками рассеяния в первичной и вторичной обмотках трансформатора, будут:

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} \qquad (13\text{-}5а)$$

и

$$e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}. \qquad (13\text{-}5б)$$

Согласно второму закону Кирхгофа, имеем уравнение э. д. с. первичной обмотки:

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_1 r_1, \qquad (13\text{-}6)$$

где r_1 — активное сопротивление первичной обмотки.

Уравнение (13-6) можно написать в виде:

$$u_1 = -[e_1 + e_{\sigma 1} + (-i_1 r_1)]. \qquad (13\text{-}7)$$

Написанное в таком виде уравнение является уравнением равновесия э. д. с., согласно которому напряжение u_1 рассматривается как действие сети по отношению к первичной обмотке трансформатора, а сумма $e_1 + e_{\sigma 1} + (-i_1 r_1)$ — как противодействие этой обмотки по отношению к сети. Действующая и противодействующая э. д. с. в любой момент времени должны быть равны друг другу по величине, но встречно направлены; э. д. с. e_1 и $e_{\sigma 1}$ создаются электромагнитным путем, условная «э. д. с.» $(-i_1 r_1)$ определяет противодействие, которое встречает ток i_1, протекая по проводнику с сопротивлением r_1.

Подставив в уравнение (13-7) выражения для e_1 и $e_{\sigma 1}$ [см. формулы (13-3) и (13-5а)] и раскрыв скобки, получаем:

$$u_1 = \frac{d\Psi_{10}}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} + i_1 r_1, \qquad (13\text{-}8)$$

Здесь Ψ_1 — полное потокосцепление первичной обмотки, созданное как основным потоком, так и потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ этой обмотки.

Средняя часть равенства (13-8) представляет собой алгебраическую сумму трех составляющих напряжения, каждая из которых находится во взаимном равновесии с соответствующей э. д. с.

Во вторичной обмотке действует э. д. с. e_2, создаваемая основным потоком Φ_t, э. д. с. $e_{\sigma 2}$, создаваемая потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$, и «э. д. с.»— $i_2 r_2$. Алгебраическая сумма всех этих э. д. с. образует напряжение u_2 на зажимах вторичной обмотки, уравновешиваемое реакцией вторичной сети. Таким образом,

$$e_2 + e_{\sigma 2} + (-i_2 r_2) = u_2, \qquad (13\text{-}9)$$

или, подставив сюда выражения э. д. с. e_2 и $e_{\sigma 2}$ [см. формулы (13-4) и (13-5б)], получим:

$$0 = \frac{d\Psi_{20}}{dt} + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 + u_2 = \frac{d\Psi_2}{dt} + i_2 r_2 + u_2. \qquad (13\text{-}10)$$

Здесь Ψ_2 — полное потокосцепление вторичной обмотки, созданное как основным потоком, так и потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ этой обмотки. Если можно пренебречь обычно весьма небольшими потерями в стали и считать, что магнитная проницаемость стали постоянна, то потокосцепления Ψ_1 и Ψ_2 обмоток трансформатора можно написать в виде:

$$\Psi_1 = L_1 e_1 + M_{12} i_2 \quad \text{и} \quad \Psi_2 = L_2 i_2 + M_{21} i_1, \qquad (13\text{-}11)$$

где L_1 и L_2 — полные индуктивности первичной и вторичной обмоток, соответствующие всему сцепленному с данной обмоткой потоку; $M_{12} = M_{21} = M$ — взаимоиндуктивности обмоток.

Подставляя значения Ψ_1 и Ψ_2 в правые части уравнений (13-8) и (13-10), получаем:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + i_1 r_1 \qquad (13\text{-}12)$$

и

$$0 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 + u_2. \qquad (13\text{-}13)$$

13-3. Коэффициент трансформации напряжений трансформатора

Под коэффициентом трансформации напряжений трансформатора (часто просто коэффициент трансформации) понимают отношение э. д. с., наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора основным магнитным потоком Φ_t. Таким образом,

$$k=\frac{e_1}{e_2}=\frac{-w_1\dfrac{d\Phi_t}{dt}}{-w_2\dfrac{d\Phi_t}{dt}}=\frac{w_1}{w_2}. \qquad (13\text{-}14)$$

Коэффициент трансформации имеет весьма важное значение как в теории трансформаторов, так и в эксплуатационном отношении.

13-4. Уравнения н. с. и э. д. с. при синусоидальном изменении напряжений и токов

Если напряжения, э. д. с. и токи представляют собой синусоидальные функции времени, то действующие значения этих функций можно изобразить комплексами $\dot{U}$, $\dot{E}$ и $\dot{I}$. Тогда уравнения н. с. (13-1) и (13-2) напишутся в виде:

$$\dot{I}_1w_1+\dot{I}_2w_2=\dot{I}_0w_1 \qquad (13\text{-}15а)$$

или

$$\dot{I}_1w_1=-\dot{I}_2w_2+\dot{I}_0w_1. \qquad (13\text{-}15б)$$

Здесь $\dot{I}_0$ — действующее значение намагничивающего тока. Соответственно уравнения э. д. с. (13-6) и (13-7) пишутся в виде:

$$\dot{U}_1+\dot{E}_1+\dot{E}_{\sigma 1}=\dot{I}_1r_1 \qquad (13\text{-}16)$$

или

$$\dot{U}_1=-[\dot{E}_1+\dot{E}_{\sigma 1}+(-\dot{I}_1r_1)]. \qquad (13\text{-}17)$$

Для вторичной обмотки [см. формулу (13-9)] имеем:

$$\dot{E}_2+\dot{E}_{\sigma 2}+(-\dot{I}_2r_2)=\dot{U}_2. \qquad (13\text{-}18)$$

При синусоидальном изменении тока мгновенное значение э. д. с. рассеяния первичной обмотки

$$e_{\sigma 1}=-L_{\sigma 1}\frac{di_1}{dt}=-L_{\sigma 1}\frac{d(I_{1m}\sin\omega t)}{dt}=$$

$$=-I_{1m}L_{\sigma 1}\omega\cos\omega t=-I_{1m}x_1\cos\omega t.$$

Таким образом, э. д. с. рассеяния $e_{\sigma 1}$ отстает по фазе от создающего ее тока i_1 на 90°, и ее действующее значение, выраженное в комплексной форме, будет

$$\dot{E}_{\sigma 1}=-j\dot{I}_1x_1. \qquad (13\text{-}19)$$

Соответственно для вторичной обмотки

$$\dot{E}_{\sigma 2}=-j\dot{I}_2x_2. \qquad (13\text{-}20)$$

Здесь x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток.

Подставив выражения для $E_{\sigma 1}$ и $E_{\sigma 2}$ в формулы (13-16), (13-17) и (13-18), имеем:

для первичной обмотки

$$\dot{U}_1+\dot{E}_1-j\dot{I}_1x_1=\dot{I}_1r_1 \qquad (13\text{-}21)$$

или

$$\dot{U}_1=-(\dot{E}_1-j\dot{I}_1x_1-\dot{I}_1r_1)=-\dot{E}_1+\dot{I}_1(r_1+jx_1)=-\dot{E}_1+\dot{I}_1Z_1; \qquad (13\text{-}22)$$

для вторичной обмотки

$$\dot{E}_2-j\dot{I}_2x_2-\dot{I}_2r_2=\dot{E}_2-\dot{I}_2(r_2+jx_2)=\dot{E}_2-\dot{I}_2Z_2=\dot{U}_2 \qquad (13\text{-}23а)$$

или

$$\dot{E}_2=\dot{I}_2Z_2+\dot{U}_2. \qquad (13\text{-}23б)$$

В этих уравнениях $Z_1=r_1+jx_1$ и $Z_2=r_2+jx_2$ — полные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора; составляющие $\dot{I}_1Z_1$ и $\dot{I}_2Z_2$ называют падениями напряжения в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Уравнения э. д. с. (13-22) и (13-23а), (13-23б) широко используются в теории трансформаторов.

Аналогично могут быть написаны уравнения э. д. с. (13-12) и (13-13) а именно:

$$\dot{U}_1=j\omega L_1\dot{I}_1+j\omega M\dot{I}_2+\dot{I}_1r_1 \qquad (13\text{-}24)$$

и

$$0=j\omega L_2\dot{I}_2+j\omega M\dot{I}_1+\dot{I}_2r_2+\dot{U}_2. \qquad (13\text{-}25)$$

При анализе работы силовых трансформаторов уравнениями (13-24) и (13-25) пользуются сравнительно редко (см. гл. 22), так как самоиндуктивности и взаимоиндуктивности таких трансформаторов являются величинами, изменяющимися в относительно широких пределах.

13-5. Приведенный трансформатор

Так как в общем случае $w_2\neq w_1$, то $E_2\neq E_1$ и $I_2\neq I_1$. Соответственно разным э. д. с. и токам различны и параметры обмоток, т. е. их активные и индуктивные сопротивления. Это затрудняет количественный учет процессов, происходящих в трансформаторе, и построение векторных диаграмм, особенно при больших коэффициентах трансформации. Чтобы избежать этих затруднений, пользуются способом, при котором *обе обмотки трансформатора приводятся к одному числу витков*. Обычно приводят вторичную обмотку к первичной. Для этого пересчитывают вторичную обмотку, имеющую число витков w_2, на эквивалентную ей приведенную обмотку, имеющую такое же число

витков w_1, как и первичная обмотка, с условием, чтобы эта операция приведения вторичной обмотки к первичной не отразилась на энергетическом процессе трансформатора и, следовательно, на режиме работы первичной обмотки.

Все величины, относящиеся к приведенной вторичной обмотке, называются приведенными и обозначаются теми же символами, что и действительные величины, но со штрихом сверху — E_2', I_2', r_2' и т. д.

А. Приведенная вторичная э. д. с. E_2'. *Чтобы получить* E_2', *нужно изменить* э. д. с. E_2 в отношении чисел витков первичной и вторичной обмоток w_1 и w_2, т. е. *пропорционально коэффициенту трансформации* $k = w_1/w_2$.

Следовательно,

$$E_2' = \frac{w_1}{w_2} E_2 = kE_2 = E_1. \qquad (13\text{-}26)$$

В таком же отношении изменяется и э. д. с. рассеяния вторичной обмотки трансформатора $E_{\sigma 2}$.

Б. Приведенный вторичный ток I_2'. При приведении вторичной обмотки к первичной ее полная мощность должна остаться без изменения, т. е. $E_2'I_2' = E_2I_2$. Отсюда

$$I_2' = \frac{E_2}{E_2'} I_2 = \frac{1}{k} I_2, \qquad (13\text{-}27)$$

т. е. *чтобы получить* I_2', *нужно изменить ток* I_2 *обратно пропорционально коэффициенту трансформации.*

В. Приведенное активное сопротивление вторичной обмотки r_2'. Так как при приведении вторичной обмотки к первичной мощности не изменяются, то потери в меди в действительной и приведенной обмотках должны быть равны.

Следовательно,

$$I_2'^2 r_2' = I_2^2 r_2,$$

откуда

$$r_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 r_2 = k^2 r_2, \qquad (13\text{-}28)$$

т. е. *чтобы получить* r_2', *нужно изменить сопротивление* r_2 *пропорционально квадрату коэффициента трансформации.* Физически это можно представить себе так, что при изменении, например увеличении, числа витков вторичной обмотки в k раз длина обмотки увеличивается в k раз, а ее сечение, если предполагать плотность тока постоянной, уменьшается в k раз, вследствие чего активное сопротивление обмотки увеличивается в k^2 раз.

Г. Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки x_2'. Индуктивное сопротивление любого контура $x = \omega L = 2\pi f L$, где L — индуктивность контура. Как известно, L определяется суммой сцеплений потока, создаваемого током в 1 a, текущим по контуру, с витками контура $\left(\sum w\Phi_{(i=1a)}\right)$. Если число витков увеличивается в k раз, то при постоянной магнитной проводимости поток $\Phi_{(i=1a)}$ тоже увеличивается в k раз и, следовательно, $L = wk\Phi_{(i=1a)}$ увеличивается в k^2 раз.

Таким образом,

$$x_2' = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 x_2 = k^2 x_2, \qquad (13\text{-}29)$$

т. е. *чтобы получить* x_2', *нужно изменить* x_2, *так же как и* r_2, *пропорционально квадрату коэффициента трансформации.*

Д. Приведенное полное сопротивление вторичной обмотки и вторичного контура. Так как $Z_2 = r_2 + jx_2$, то

$$Z_2' = r_2' + jx_2' = k^2 Z_2. \qquad (13\text{-}30)$$

Если Z_c — сопротивление сети, питаемой вторичной обмоткой трансформатора, то по аналогии с Z_2' имеем:

$$Z_c' = k^2 Z_c. \qquad (13\text{-}31)$$

13-6. Уравнения н. с. и э. д. с. приведенного трансформатора

В приведенном трансформаторе уравнение н. с. приобретает вид

$$I_1 w_1 + I_2' w_1 = I_0 w_1 \quad \text{или} \quad I_1 w_1 = -I_2' w_1 + I_0 w_1.$$

Сократив обе части этих равенств на w_1, имеем:

$$I_1 + I_2' = I_0. \qquad (13\text{-}32а)$$

или

$$I_1 = -I_2' + I_0. \qquad (13\text{-}32б)$$

Уравнения э. д. с. пишутся в виде:

$$U_1 = -E_1 + I_1 Z_1 \qquad (13\text{-}33)$$

и

$$E_2' - I_2' Z_2' = U_2' \qquad (13\text{-}34а)$$

или

$$E_2' = E_1 = I_2' Z_2' + U_2'. \qquad (13\text{-}34б)$$

13-7. Схема замещения трансформатора

Аналитическое и графическое исследование работы трансформатора упрощается, если действительный трансформатор, в котором обмотки связаны между собой электромагнитно, заместить схемой,

элементы которой связаны между собой только электрически. В общем случае эта задача может иметь ряд решений, т. е. мы можем иметь несколько различных схем замещения трансформатора, но каждая из них должна удовлетворять основным уравнениям э. д. с. и н. с. трансформатора.

В теории трансформаторов пользуются только так называемой Т-образной схемой замещения. Второй вид схемы замещения — Г-образная схема — имеет преимущественное значение в теории асинхронных машин (см. вторую часть).

В соответствии с уравнениями (13-32), (13-33) и (13-34) схема приведенного трансформатора имеет вид, показанный на рис. 13-2, *а*. Каждая обмотка такого эквивалентного трансформатора состоит из двух последовательно соединенных катушек, одна из которых — без рассеяния и без потерь в меди — наматывается на сердечник трансформатора, а другая представляет собой реактор без стального сердечника, имеющий активное и индуктивное сопротивление соответствующей обмотки.

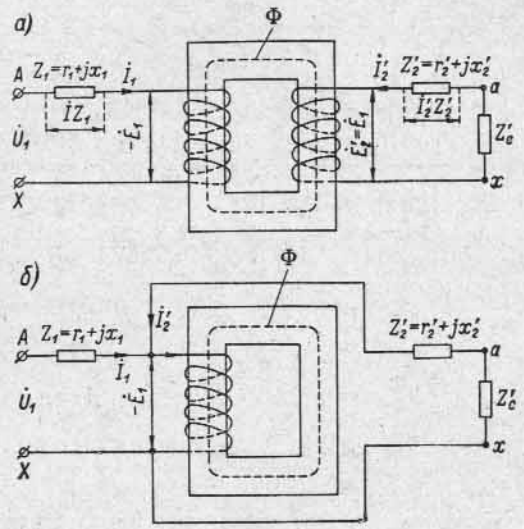


Рис. 13-2. Схемы приведенного трансформатора

Так как в приведенном трансформаторе $w_2 = w_1$, то обе обмотки трансформатора можно совместить в одну (рис. 13-2, *б*), по которой протекает намагничивающий ток $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'$. В этом случае объединенная обмотка играет роль намагничивающего контура, который создает основной магнитный поток Ф, замыкающийся по сердечнику трансформатора. Мощность, расходуемая в этой обмотке, определяется потерями в стали сердечника p_c.

Зависимость между напряжением $-\dot{E}_1$ на зажимах намагничивающего контура и током в контуре $\dot{I}_0$ может быть выражена в виде:

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m = \dot{I}_0 (r_m + jx_m), \qquad (13\text{-}35)$$

где $Z_m = r_m + jx_m$ — полное сопротивление намагничивающего контура; $r_m = p_c/I_0^2$ и $x_m = \omega M$.

Если U_2' — напряжение на зажимах сети, питаемой вторичной обмоткой трансформатора, и Z_c' — полное сопротивление этой сети, то

$$\dot{U}_2' = \dot{I}_2' Z_c'.$$

Тогда из уравнения (13-34б) для вторичного контура трансформатора находим:

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{E}_2'}{Z_2' + Z_c'} = \frac{\dot{E}_1}{Z_2' + Z_c'}.$$

Следовательно,

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' + \dot{I}_0 = \frac{-\dot{E}_1}{Z_2' + Z_c'} + \frac{-\dot{E}_1}{Z_m},$$

откуда

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_1 \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_2' + Z_c'}}. \qquad (13\text{-}36)$$

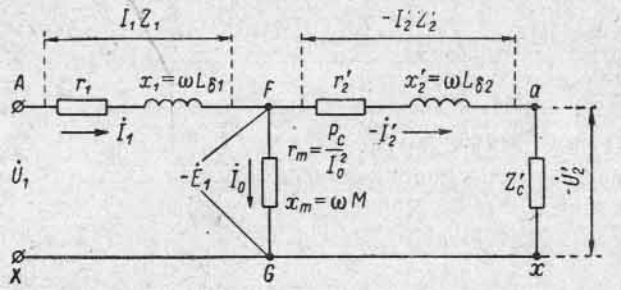


Рис. 13-3. Т-образная схема замещения трансформатора

Подставив это значение $-\dot{E}_1$ в уравнение (13-33) э. д. с. первичной обмотки, получаем:

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{1}{Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_2' + Z_c'}}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_э}. \qquad (13\text{-}37)$$

Здесь

$$Z_э = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_2' + Z_c'}} \qquad (13\text{-}38)$$

представляет собой эквивалентное сопротивление Т-образной схемы замещения трансформатора на рис. 13-3. Мы видим, что трансформатор можно представить себе как совокупность трех ветвей: первичной — с сопротивлением Z_1 и током $\dot{I}_1$, намагничивающей — с сопротивлением Z_m и током $\dot{I}_0$ и параллельно приключенной к намагничивающей ветви вторичной ветви — с сопротивлением $Z_2' + Z_c'$ и током $-\dot{I}_2'$. Распределение токов $\dot{I}_1$, $\dot{I}_0$ и $\dot{I}_2'$ должно соответствовать уравнению н. с. $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' + \dot{I}_0$ [см. формулу (13-32б)].

Так как, согласно (13-34б),

$$\dot{E}_2' = \dot{E}_1 = \dot{I}_2' Z_2' + \dot{U}_2',$$

то

$$-\dot{E}_1 = -\dot{I}_2' Z_2' - \dot{U}_2', \qquad (13\text{-}39)$$

т. е. напряжение $-E_1$ на зажимах FG вторичного контура представляет собой геометрическую сумму падения напряжения $-\dot{I}_2' Z_2'$ во вторичной обмотке, обусловленного током $-\dot{I}_2'$, и напряжения $-\dot{U}_2'$ на зажимах внешней сети.

Глава четырнадцатая

ХОЛОСТОЙ ХОД ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

14-1. Предварительные замечания

Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим его работы, при котором первичная обмотка включена в сеть переменного тока с частотой f, а вторичная обмотка разомкнута.

Изучение режима холостого хода имеет важное значение, так как позволяет определить расчетным или опытным путем следующие характерные для трансформатора величины: а) коэффициент трансформации, б) ток холостого хода и в) потери холостого хода.

Из последующего изложения будет видно, что режим холостого хода в сочетании с режимом короткого замыкания позволяет определить к. п. д. трансформатора, т. е. одну из важнейших величин при эксплуатации силового трансформатора. С другой стороны, налагая один режим работы на другой, мы можем получить любой промежуточный режим работы трансформатора под нагрузкой, и в этом состоит теоретическая ценность таких режимов в их взаимном сочетании.

Мы начнем изучение режима холостого хода с однофазного трансформатора, как более простого, с тем чтобы затем показать характерные особенности этого режима в трехфазных трансформаторах.

14-2. Работа однофазного трансформатора в режиме холостого хода

Подведем к зажимам $A - X$ первичной обмотки трансформатора переменное напряжение u_1 от сети с частотой f. Зажимы a—x вторичной обмотки разомкнуты, и, следовательно, вторичный ток равен нулю (рис. 14-1).

Под действием напряжения u_1 по первичной обмотке протекает ток холостого хода i_0, который создает н. с., равную $i_0 w_1$, где w_1 — число последовательно соединенных витков первичной обмотки. Н. с. $i_0 w_1$ создает магнитный поток, упрощенная картина которого для концентрической обмотки стержневого трансформатора показана на рис. 14-1. Преобладающая часть линий потока замыкается по сер-

дечнику и, будучи сцеплена с обеими обмотками, образует основной магнитный поток Ф. Другая часть потока, обычно гораздо меньшая, проходит в основном по немагнитной среде и сцепляется главным образом с первичной обмоткой (линии *1* и *2* на рис. 14-1), но частично может оказаться сцепленной и со вторичной обмоткой (линия *3* на рис. 14-1). Совокупность линий *1*, *2* и *3* будем рассматривать как первичный поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, сцепленный только с первичной обмоткой.

При работе трансформатора в режиме холостого хода в нем возникают потери холостого хода, состоящие главным образом из потерь в стали. Эти потери покрываются мощностью холостого хода P_0, которую трансформатор потребляет из сети.

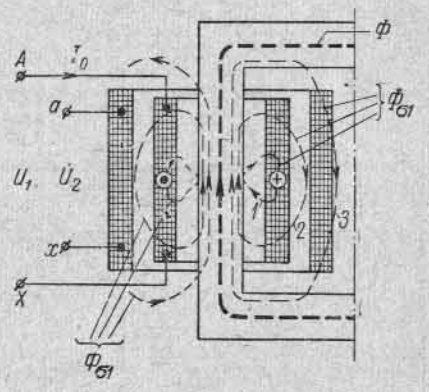


Рис. 14-1. Картина потоков трансформатора при холостом ходе

14-3. Холостой ход простейшего трансформатора

В трансформаторах обычного типа поток рассеяния при холостом ходе ничтожно мал (обычно меньше 0,25% от основного потока). Равным образом потери в стали составляют только доли процента от номинальной мощности трансформатора (см. ниже § 16-5). Поэтому мы сначала изучим режим холостого хода так называемого простейшего трансформатора, т. е. трансформатора без рассеяния и без потерь в меди обмотки и в стали сердечника ($r_1 = 0$, $x_1 = 0$, $P_0 = 0$). Такой метод предварительного упрощения рассматриваемого вопроса позволяет выделить и изучить сначала сущность процесса или явления, а затем в случае надобности внести в него необходимые коррективы.

При анализе работы простейшего трансформатора в режиме холостого хода мы исходим из подводимого к первичной обмотке трансформатора напряжения u_1 и, пользуясь уравнением равновесия э. д. с. первичной обмотки, устанавливаем зависимость между напряжением u_1 и э. д. с. e_1, создаваемой основным потоком трансформатора; затем устанавливаем зависимость между э. д. с. и основным потоком на основе закона электромагнитной индукции и, наконец, определяем намагничивающий ток $i_{0\mu}$, необходимый для создания основного потока, пользуясь законом магнитной цепи.

А. Э. д. с. e_1. Так как в простейшем трансформаторе $r_1 = 0$ и $L_{\sigma 1} = 0$, то уравнение равновесия э. д. с. первичной обмотки [см. формулу (13-7)] приобретает вид:

$$u_1 = -e_1, \qquad (14\text{-}1)$$

т. е. *в простейшем трансформаторе подводимое напряжение и индуктируемая в первичной обмотке э. д. с. находятся в любой момент времени во взаимном равновесии.*

В соответствии с существующей эксплуатационной практикой будем считать, что подводимое к трансформатору напряжение u_1 является синусоидальной функцией времени. В этом случае

$$u_1 = U_{1m} \sin \omega t = U_1 \sqrt{2} \sin 2\pi f t, \qquad (14\text{-}2)$$

где U_{1m} — амплитуда подводимого напряжения; U_1 — действующее значение его и $\omega = 2\pi f$ — угловая частота.

На рис. 14-2, *а* напряжение u_1 и э. д. с. e_1 показаны кривыми *1* и *2*, имеющими одинаковые амплитуды и сдвинутыми относительно друг друга на 180°; следовательно, можно сказать, что кривая э. д. с. e_1 является зеркальным отражением кривой u_1 относительно оси абсцисс. На этом основании э. д. с. e_1 часто называют обратной э. д. с.

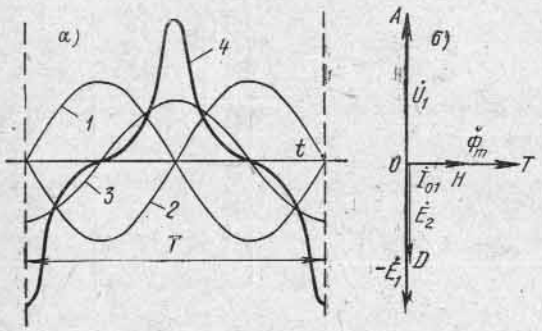


Рис. 14-2. Диаграммы э. д. с. и тока простейшего однофазного трансформатора: *а* — в прямоугольных координатах; *б* — векторная

По аналогии с выражением для u_1 имеем:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t - \pi) = E_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \pi). \qquad (14\text{-}3)$$

На рис. 14-2, *б* кривые *1* и *2* изображены векторами $\overline{OA} = \dot{U}_1 = \overline{OF} = -\dot{E}_1$ для момента времени, когда $u_1 = U_{1m}$.

Б. Основной магнитный поток Ф. Согласно формуле (13-3),

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} = E_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \pi),$$

где Φ_t — мгновенное значение основного потока.

Интегрируя обе части написанного равенства, имеем:

$$\int d\Phi_t = -\frac{E_1 \sqrt{2}}{w_1} \int \sin(\omega t - \pi) dt,$$

откуда

$$\Phi_t = \frac{E_1 \sqrt{2}}{\omega w_1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \qquad (14\text{-}4)$$

Постоянную интегрирования мы должны принять равной нулю, так как при установившемся режиме работы поток постоянного направления в сердечнике трансформатора отсутствует.

Из формулы (14-4) следует, что при синусоидальном подведенном напряжении *магнитный поток простейшего трансформатора представляет собой тоже синусоидальную функцию времени,* причем *поток опережает первичную э. д. с. на угол* $\pi/2$, т. е. на четверть периода, или, что одно и то же, *первичная э. д. с. отстает от потока на угол* $\pi/2$ (кривая *3* на рис. 14-2, *а* и вектор $\overline{OT} = \Phi_m$ на рис. 14-2, *б*).

Формулу (14-4) можно представить в виде:

$$\Phi_t = \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \qquad (14\text{-}5)$$

где

$$\Phi_m = \frac{E_1 \sqrt{2}}{\omega w_1} = \frac{E_1 \sqrt{2}}{2\pi f w_1} = \frac{E_1}{\pi \sqrt{2} f w_1} \qquad (14\text{-}6)$$

— амплитуда магнитного потока. Отсюда получается основное выражение в теории трансформатора для действующего значения э. д. с. первичной обмотки:

$$E_1 = \pi \sqrt{2} f w_1 \Phi_m = 4{,}44 f w_1 \Phi_m. \qquad (14\text{-}7)$$

Из этой формулы следует, что если частота f и число витков w_1 заданы, то $E_1 = C_e \Phi_m$, т. е. *поток* Φ_m *прямо пропорционален э. д. с.* E_1.

Вторичная обмотка пронизывается тем же потоком Φ_m. Поэтому действующее значение э. д. с. вторичной обмотки выражается, по аналогии с формулой (14-7), в виде:

$$E_2 = \pi \sqrt{2} f w_2 \Phi_m = 4{,}44 f w_2 \Phi_m, \qquad (14\text{-}8)$$

где w_2 — число последовательно соединенных витков вторичной обмотки. По фазе э. д. с. $\dot{E}_2$, так же как и э. д. с. $\dot{E}_1$, отстает от потока Φ_m на угол $\pi/2$ (вектор $\overline{OD}$ на рис. 14-2, *б*).

Отношение

$$k = E_1/E_2 = w_1/w_2, \qquad (14\text{-}9)$$

так же как раньше отношение e_1/e_2 [см. формулу (13-14)], называется коэффициентом трансформации напряжений трансформатора или просто коэффициентом трансформации.

Обычно коэффициент трансформации принято определять как отношение большей э. д. с. к меньшей независимо от того, какая из обмоток является первичной.

Из выражений (14-7) и (14-8) для э. д. с. определяем одну из важнейших величин, характеризующих трансформатор и его свойства, а именно э. д. с. на виток:

$$E_{вт} = E_1/w_1 = E_2/w_2 = \pi \sqrt{2} f \Phi_m = 4{,}44 f \Phi_m. \qquad (14\text{-}10)$$

В. Намагничивающий ток $i_{0\mu}$. По закону магнитной цепи $\Phi_t = i_{0\mu} w_1 / R_\mu$, где $i_{0\mu} w_1$ — н. с., создаваемая намагничивающим

током $i_{0\mu}$; R_μ — магнитное сопротивление сердечника, состоящее из сопротивления стали и сопротивления в стыках сердечника. Если сталь трансформатора насыщена, как это обычно имеет место в силовых трансформаторах, то форма кривой тока $i_{0\mu}$ и его амплитуда зависят от степени насыщения стали. Говоря о стали, мы будем иметь в виду, так же как и раньше, горячекатаную сталь. Соответственно ее кривой намагничивания (см. рис. В-25) мы можем считать, что трансформаторная сталь не насыщена примерно до индукции 0,8 *тл*; в этой зоне можно приближенно принять, что намагничивающий ток пропорционален индукции. Индукции от 0,8 до 1,3 *тл* соответствуют колену кривой намагничивания, т. е. средненасыщенной стали, а индукции больше 1,3 *тл* — различным степеням насыщений стали.

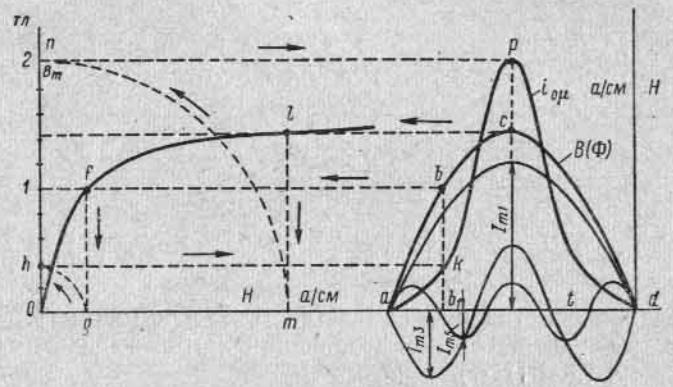


Рис. 14-3. Построение кривой $i_{0\mu} = f_1(t)$ и разложение ее на основную и высшие гармонические

На рис. 14-3 произведено построение кривой намагничивающего тока $i_{0\mu} = f(t)$ по средней кривой намагничивания для трансформаторной стали. На синусоидальной кривой индукции *abcd* взяты две точки: точка *b* для индукции $B_m = 1$ *тл* и точка *c* для наибольшей индукции $B_m = 1{,}45$ *тл*. Построение произведено в последовательности, показанной на рисунке стрелками (*b—f—g—h—k* и *c—l—m—n—p*). Соединив между собой ряд таких точек, получим кривую *akpd* намагничивающего тока $i_{0\mu}$ простейшего трансформатора.

Мы видим, что при синусоидальном потоке ток холостого хода трансформатора с насыщенной сталью несинусоидален (кривая *4* на рис. 14-2, *а*). Мы можем разложить кривую $i_{0\mu}$ в ряд гармонических (рис. 14-3). Так как эта кривая симметрична относительно оси абсцисс, то ряд содержит гармонические только нечетного порядка — первую, третью, пятую и т. д. с амплитудами I_{m1}, I_{m3}, I_{m5} и т. д. Первая гармоническая намагничивающего тока совпадает по фазе с основным потоком и, следовательно, отстает от первичного напряжения на 90°. Из числа высших гармонических тока сильнее всего

выражена третья. Из последующего изложения мы увидим, что эта гармоническая оказывает значительное влияние на работу трехфазных трансформаторов при некоторых способах соединения их обмоток (см. § 16-1). Гармонические высших порядков выражены слабее, чем третья, и поэтому их влиянием чаще всего пренебрегают.

Процентное содержание высших гармонических в кривой тока холостого хода тем больше, чем выше амплитуда индукции. На рис. 14-4 отношение $I_{m3}/I_{m1} = \alpha_3$ определяется кривой *1* и соответственно $I_{m5}/I_{m1} = \alpha_5$ — кривой *2*. Кривые построены для горячекатаной трансформаторной стали Э42. Мы видим, что при обычных в сердечниках силовых трансформаторов индукциях порядка 1,4 — 1,45 *тл* отношение I_{m3}/I_{m1} достигает 50%, т. е. кривая тока холостого хода приобретает заметно заостренный характер.

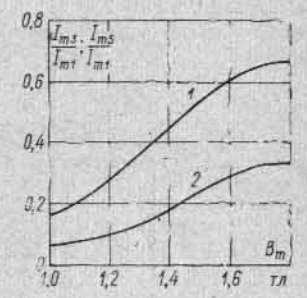


Рис. 14-4. Зависимости I_{m3}/I_{m1} и $I_{m5}/I_{m1} = f(B_m)$ при холостом ходе трансформатора

Зная амплитуды гармонических в кривой тока холостого хода, мы можем определить действующее значение этого тока по общеизвестной формуле:

$$I_{0\mu} = \sqrt{\left(\frac{I_{m1}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{m3}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{m5}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \ldots} = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}}\sqrt{1 + \alpha_3^2 + \alpha_5^2 + \ldots} \qquad (14\text{-}11)$$

Часто для упрощения не производят разложения тока на гармонические, а прямо считают по амплитуде

$$I_{0\mu m} = I_{m1} + I_{m3} + I_{m5} = I_{m1}(1 + \alpha_3 + \alpha_5), \qquad (14\text{-}11а)$$

принимая

$$I_{0\mu} = \frac{I_{0\mu m}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}}(1 + \alpha_3 + \alpha_5). \qquad (14\text{-}11б)$$

Очевидно, что при этом значение $I_{0\mu}$ получается преувеличенным в

$$k_\alpha = \frac{1 + \alpha_3 + \alpha_5}{\sqrt{1 + \alpha_3^2 + \alpha_5^2}} \qquad (14\text{-}11в)$$

раз. Коэффициент k_α при применяемых в трансформаторах величинах магнитной индукции довольно значительно отличается от единицы. Табл. 14-1 по Рихтеру [202] дает величины I_{m1}, α_3 и α_5 для различных значений индукции B, а также значение k_α, вычисленное по уравнению (14-11в). Зная величину B, можно, пользуясь упрощенной формулой (14-11б) и табл. 14-1, вводить поправку в виде коэффициента k_α, принимая

$$I_{0\mu} = \frac{I_{0\mu m}}{\sqrt{2}\,k_\alpha}. \qquad (14\text{-}11г)$$

Так как ток холостого хода несинусоидален, то на векторной диаграмме может быть показана только первая гармоническая этого тока $\dot{I}_{01} = \overline{OH}$ (рис. 14-2, *б*), поскольку на векторных диаграммах могут изображаться величины только какой-нибудь одной периодичности. Таким образом, диаграмма холостого хода носит в отношении тока холостого хода приближенный характер, что необходимо иметь в виду как здесь, так и при построении диаграмм в дальнейшем. Но при практических приближенных построениях обычно исходят из эквивалентного синусоидального тока холостого хода, имеющего действующее значение $I_{0\mu}$ [см. формулу (14-11)].

Таблица 14-1

B, *тл*	I_{m1}, *а*	α_3	α_5	k_α
1	1,53	0,162	0,05	1,2
1,2	2,73	0,287	0,094	1,32
1,4	7,38	0,528	0,267	1,55
1,6	26,1	0,658	0,331	1,6
1,8	74,5	0,658	0,275	1,58

Так как ток I_{01} отстает от напряжения U_1 на 90°, то активная мощность первой гармонической равна нулю; мощности высших гармонических также равны нулю, поскольку они имеют периодичность, отличную от периодичности напряжения U_1. Следовательно, активная мощность, потребляемая простейшим трансформатором из сети, равна нулю, чего и следовало ждать, так как, согласно условию, в простейшем трансформаторе потери приняты равными нулю.

14-4. Холостой ход реального однофазного трансформатора

Введем поправки на рассеяние и потери, которыми мы пренебрегли в простейшем трансформаторе. Поток рассеяния первичной обмотки создает в ней э. д. с. рассеяния, а потери при холостом ходе трансформатора покрываются за счет мощности P_0, поступающей в трансформатор из сети. В однофазном трансформаторе $P_0 = U_1 I_{0a}$, где I_{0a} — действующее значение активной составляющей тока холостого хода. Таким образом, ток холостого хода реального трансформатора имеет две составляющие — намагничивающую с действующим значением $I_{0\mu}$, создающую основной магнитный поток Ф и совпадающую с ним по фазе (рис. 14-5), и активную составляющую I_{0a}, находящуюся в квадратуре с первой составляющей. Заменив действительную кривую намагничивающего тока на рис. 14-3 эквивалентной синусоидой с тем же, что и у действительной кривой, действующим значением $I_{0\mu}$ и сложив геометрически составляющие $\dot{I}_{0\mu}$ и $\dot{I}_{0a}$, получим ток $I_0 = \sqrt{I_{0\mu}^2 + I_{0a}^2}$.

Обычно ток $I_{0a} < 10\%$ от тока I_0, поэтому он оказывает ничтожное (часто меньше 0,5%) влияние на величину тока холостого хода.

Равным образом весьма мал и угол α, на который поток Ф отстает от тока I_0 и который часто называют углом магнитного запаздывания.

Несколько большее влияние оказывает ток I_{0a} на форму и фазу тока холостого хода. Мы будем иметь в виду только потери на гистерезис, так как в трансформаторах из горячекатаной трансформаторной стали они составляют примерно 85% от мощности P_0 (при $f = 50$ *гц*). На рис. 14-6 изображена сильно уширенная гистерезисная петля. Каждой заданной индукции B соответствуют разные значения тока холостого хода для восходящей и нисходящей ветвей гистерезисной петли. Построение кривой тока холостого хода произведено по способу, показанному на рис. 14-3. Разложив кривую в ряд гармонических, найдем, что поток Ф отстает от первой гармонической тока i_{01} на угол α_2 (рис. 14-6).

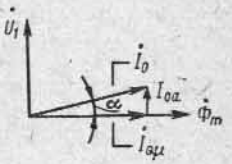


Рис. 14-5. Ток холостого хода трансформатора и его составляющие

При замене действительной кривой тока холостого хода эквивалентной синусоидой мы можем написать уравнение э. д. с. первичной обмотки в символической форме, так как все величины, определяющие режим холостого хода, изменяются во времени синусоидально. Согласно формуле (13-22), имеем:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1. \qquad (14\text{-}12)$$

Соответственно уравнению э. д. с. (14-12) можно построить векторную диаграмму холостого хода трансформатора.

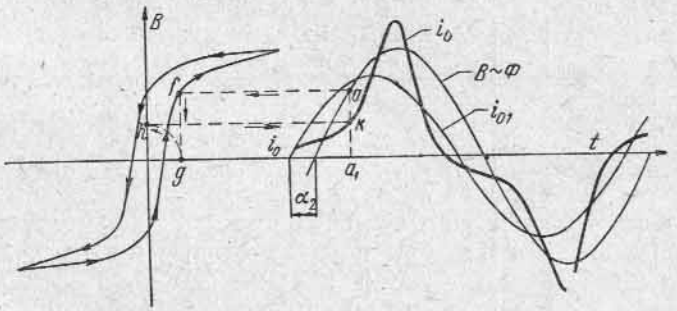


Рис. 14-6. Влияние гистерезиса на кривую тока холостого хода

Проведем вектор основного магнитного потока Φ_m в положительном направлении оси абсцисс (рис. 14-7). Вектор э. д. с. $\dot{E}_1$ отстает от вектора потока Φ_m на 90°; по фазе с $\dot{E}_1$ совпадает вектор э. д. с. $\dot{E}_2$ вторичной обмотки. Вектор тока $\dot{I}_0$ строится по его намагничивающей и активной составляющим так же, как на рис. 14-5. Вектор $E_{\sigma 1} = -j\dot{I}_0 x_1$ отстает от вектора тока $\dot{I}_0$ на 90°; вектор $-\dot{I}_0 r_1$ находится

в противофазе с током I_0. Чтобы построить вектор напряжения U_1, нужно геометрически сложить составляющие напряжения — E_1, $I_0 r_1$ и $jI_0 x_1$, каждая из которых равна соответствующей э. д. с. по величине, но обратна по направлению (знаку).

На рис. 14-7 векторы $I_0 r_1$ и $jI_0 x_1$ изображены для ясности в сильно увеличенном по сравнению с э. д. с. E_1 масштабе. В силовых трансформаторах падение напряжения при холостом ходе обычно меньше 0,5% от U_1.

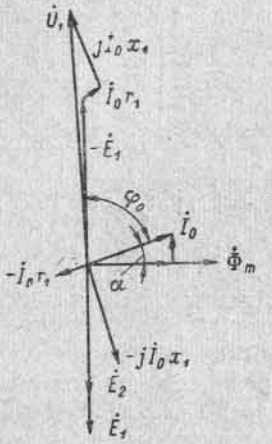


Рис. 14-7. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

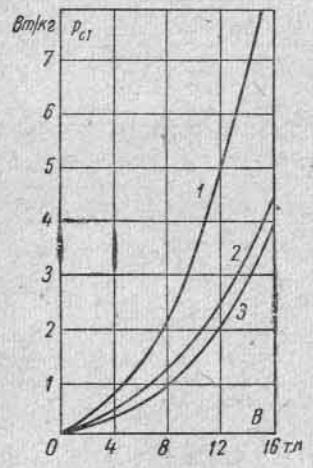


Рис. 14-8. Кривые потерь для электротехнической стали разных марок

1 — сталь марки Э12 толщиной 0,5 *мм*; *2* — сталь марки Э42 толщиной 0,5 *мм*; *3* — сталь марки Э42 толщиной 0,35 *мм*

14-5. Потери холостого хода трансформатора

При холостом ходе в трансформаторе имеют место следующие виды потерь: а) потери в меди первичной обмотки $p_{м1} = I_0^2 r_1$; б) основные потери в стали сердечника $p_{с0}$ и в) добавочные потери холостого хода $p_{д0}$.

Мощность P_0, потребляемая трансформатором при холостом ходе, расходуется целиком на покрытие потерь холостого хода. Следовательно,

$$P_0 = p_{м1} + p_{с0} + p_{д0}. \qquad (14\text{-}13)$$

Расчет показывает, что потерями $p_{м1} = I_0^2 r_1$ можно пренебречь, так как даже в трансформаторах малой мощности с относительно большим током I_0 и сопротивлением r_1 они обычно меньше 2% от суммы потерь холостого хода. Поэтому можно принять, что

$$P_0 = p_{с0} + p_{д0} = p_c, \qquad (14\text{-}14)$$

т. е. что *мощность холостого хода практически расходуется только на потери в стали.*

А. Основные потери в стали сердечника. Эти потери состоят из потерь на гистерезис и на вихревые токи и могут быть учтены по формулам, приведенным в § 7-4.

Обычно потери относят к 1 *кг* массы сердечника и при определении их расчетным путем исходят из опытной кривой «удельных потерь» (рис. 14-8):

$$p_{c1} = f(B) \qquad (14\text{-}15)$$

для электротехнической стали данного сорта и для заданной частоты. Умножая эту величину на массу сердечника в килограммах, получают общие потери в нем. Если, как это часто бывает, разные части сердечника (стержни, ярма) имеют разные сечения, а следовательно, при одном и том же магнитном потоке Ф — разные индукции B, то для каждой из частей определяют величину магнитной индукции $B = \Phi/S$, а по значению последней и по кривой рис. 14-8 — потери p_{c1}. Умножая величину p_{c1} на массу данной части сердечника и суммируя подобные произведения для всего сердечника, получают величину p_{c0} основных потерь в нем. Для расчета величины p_{c0} иногда пользуются формулами вида

$$p_{c0} = p_{c1} B^{\alpha} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} G_c, \qquad (14\text{-}16)$$

где p_{c1} — потери на 1 *кг* стали в ваттах при $B = 1$ *тл*; однако этими формулами можно пользоваться тогда, когда известны показатели степени α и β, которые, в свою очередь, зависят от своих оснований. Иногда для простоты принимают для применяемых средних значений индукции $B \approx 1{,}2$ *тл* величину $\alpha = 2$, а для частот, близких к 50 *гц*, считают $\beta = 1{,}25$.

Мы уже говорили, что сердечники трансформаторов собираются из листов специальной трансформаторной стали толщиной 0,5 — 0,35 *мм*. Характеристики этой стали как горячекатаной, так и холоднокатаной, и кривые ее намагничивания см. во введении на рис. В-25.

В настоящее время в трансформаторостроении получает все большее применение холоднокатаная сталь (марки Э310, Э320, Э330), так как по сравнению с горячекатаной она обладает большей магнитной проницаемостью и имеет меньшие удельные потери. Но при этом она резко анизотропна, т. е. ее высокие магнитные свойства наблюдаются только в направлении проката; в направлении же, поперечном прокату, они значительно хуже. Поэтому конструкции сердечников из горячекатаной стали непригодны для сердечников из холоднокатаной стали. Потребовалась разработка специальных конструкций, в которых, однако, усложняется процесс сборки сердечника и увеличивается трудоемкость его изготовления. В однофазных трансформаторах небольшой мощности применяется конструкция спирального сердечника, выполненного без стыков из ленточной холоднокатаной стали (см. рис. 23-21).

Б. Добавочные потери холостого хода. Главными видами этих потерь являются: а) добавочные потери в стали вследствие изменения структуры листов стали при их механической обработке; б) потери в местах стыков и в местах расположения шпилек вследствие неравномерного распределения магнитной индукции; в) потери в конструктивных деталях — в шпильках, в балках, прессующих ярма, в баке трансформатора и т. д.; г) потери в изоляции трансформаторов высокого напряжения.

Добавочные потери холостого хода не поддаются точному расчету. Поэтому потери холостого хода трансформатора рассчитываются по табличным данным для удельных потерь, в которые уже входят добавочные потери холостого хода. Исследования показывают, что

в трансформаторах из горячекатаной стали все виды добавочных потерь холостого хода начинают резко возрастать при индукциях в в стержне, превышающих 1,5 *тл*. Те же исследования показывают, что при обычных в стержнях мощных трансформаторов индукциях 1,45 — 1,47 *тл* добавочные потери $p_{д0}$ составляют 15—20% от основных потерь p_{c0}. Следовательно,

$$p_c = p_{c0} + p_{д0} = (1{,}15 \div 1{,}20)\, p_{c0}. \qquad (14\text{-}17)$$

Г. Влияние формы кривой и величины приложенного напряжения, а также частоты на работу трансформатора при холостом ходе. Выше было предположено, что первичное напряжение изменяется по синусоидальному закону. Возникает вопрос, как изменится основное уравнение (14-7) в случае любой формы кривой приложенного напряжения и магнитного потока.

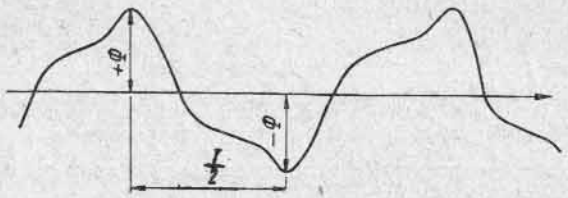


Рис. 14-9. Несинусоидальная форма магнитного потока

Пусть, например, поток изменяется согласно кривой на рис. 14-9. Тогда независимо от формы этой кривой всегда будет справедливо соотношение (13-3), из которого имеем:

$$e_1 dt = -w_1 d\Phi_t.$$

Интегрируя это выражение за время полупериода $T/2$ и соответственно от $+\Phi$ до $-\Phi$, получаем:

$$\int_0^{T/2} e_1 dt = -w_1 \int_{+\Phi}^{-\Phi} d\Phi_t = +w_1 \cdot 2\Phi.$$

Среднее значение э. д. с. будет, очевидно,

$$E_{1\,ср} = \frac{\int_0^{T/2} e_1 dt}{T/2} = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} e_1 dt = \frac{4}{T} w_1 \Phi = 4 w_1 f \Phi \qquad (14\text{-}18)$$

независимо от формы кривой приложенного напряжения.

Если ввести коэффициент формы кривой $k_e = E_1/E_{1ср}$, то получается:

$$E_1 = k_e E_{1\,ср} = 4 k_e w_1 f \Phi \qquad (14\text{-}19)$$

при любой кривой приложенного напряжения. Для синусоиды $k_e = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11$, вследствие чего уравнение (14-19) переходит в (14-7); для острых кривых $k_e > 1{,}11$, для тупых $k_e < 1{,}11$ (табл. 14-2).

Д. Следствия из основных соотношений при холостом ходе трансформатора. Из уравнения (14-19), как наиболее общего для э. д. с. трансформатора, вытекают важные следствия.

1. При холостом ходе любого трансформатора величина магнитного потока Ф, а вместе с ней и величина индукции B в сердечнике для определенной кривой приложенного напряжения а) прямо пропорциональны э. д. с. E_1 (или $\approx U_1$) при данной частоте f и данном

Таблица 14-2

Ф			E		I_0	
Форма кривой	k_e	p_r	Форма кривой	k_e	Форма кривой	k_e
Синусоида	1,11	Номин.	Синусоида	1,11	Заостренная; Третья гармоническая в фазе с первой	>1,11
Плоская; Третья гармоническая противоположна первой по фазе	<1,11	Номин.	Заостренная; Третья гармоническая в фазе с первой	>1,11	Синусоида	1,11
Плоская; Третья гармоническая противоположна первой по фазе	<1,11	Менее номин.	Заостренная; Третья гармоническая в фазе с первой	>1,11	Синусоида	1,11

числе витков w_1; б) обратно пропорциональны числу витков w_1 при данной частоте f и данном U_1; в) обратно пропорциональны частоте f при постоянных прочих условиях и при изменении частоты; г) обратно пропорциональны коэффициенту k_e формы кривой приложенного напряжения при постоянных прочих условиях.

2. Поскольку, согласно уравнению (14-4), кривая магнитного потока является интегральной кривой по отношению к кривой э. д. с., то на основании уравнения (14-6) можно заключить, что плоской кри-

вой магнитного потока будет соответствовать острая кривая э. д. с. и наоборот.

Из сказанного выше о форме кривой тока холостого хода вытекает еще одно важное следствие.

3. Если, как это иногда бывает при работе трехфазных трансформаторов (см. § 16-1), ток холостого хода будет синусоидальным, то при этом не могут быть синусоидальны ни магнитный поток, ни фазная э. д. с.

14-6. Влияние формы кривой напряжения на величину потерь в стали

Все сказанное выше о потерях в стали относилось к случаю, когда кривая подводимого к трансформатору напряжения являлась синусоидальной функцией времени. При этом кривые э. д. с. e_1 потока Φ_t однофазного трансформатора тоже синусоидальны (см. рис. 14-2). При несинусоидальном напряжении u_1 формы кривых э. д. с. и потока изменяются. В общем случае $\Phi_t = -\int e_1 dt$, т. е. поток является интегральной функцией э. д. с. Следовательно, при заостренной форме кривой напряжения и, стало быть, э. д. с. кривая потока имеет уплощенный характер (см. табл. 14-2) и наоборот. В первом случае наибольшее значение индукции B_m уменьшается, во втором — увеличивается. Соответственно изменяются и потери в стали, но при этом изменение потерь на гистерезис и на вихревые токи происходит различно. Рассмотрим потери в стали при заданном действующем значении напряжения U_1 или, что практически одно и то же ,э. д. с. E_1 и при заданной частоте f. При несинусоидальной форме кривой э. д. с.

$$E_1 = 4k_e f w_1 \Phi_m,$$

где k_e — коэффициент формы кривой э. д. с. Следовательно,

$$\Phi_m \sim B_m \sim \frac{E_1}{k_e} \sim \frac{U_1}{k_e}.$$

Как мы знаем (см. гл. 7), потери на гистерезис $p_г \sim B_m^2$, т. е. $p_г \sim (U_1/k_e)^2$; потери на вихревые токи $p_{вх} \sim k_e^2 B_m^2$, т. е. $p_{вх} \sim U_1^2$. Отсюда следует, что *при заданном действующем значении э. д. с. потери на гистерезис обратно пропорциональны квадрату коэффициента формы кривой э. д. с., а потери на вихревые токи не зависят от формы этой кривой*. Так как основным видом потерь в трансформаторной стали являются потери на гистерезис, то можно приближенно считать, что общие потери в стали $p_с \sim (U_1/k_e)^2$. При заостренной форме кривой э. д. с. коэффициент $k_e > 1{,}11$, а при уплощенной $k_e < 1{,}11$; следовательно, в первом случае потери в стали уменьшаются, во втором — увеличиваются по сравнению с потерями при синусоидальной кривой э. д. с.

14-7. Схема замещения при холостом ходе трансформатора

Соответственно схеме на рис. 13-3 схема замещения трансформатора при холостом ходе имеет вид, показанный на рис. 14-10, *а*. Соответствующая этой схеме диаграмма холостого хода трансформатора показана на рис. 14-10, *б*.

14-8. Опыт холостого хода трансформатора

Опыт производится по схеме на рис. 14-11. Обычно напряжение подводится к стороне обмотки НН. Посредством вольтметров V_1 и V_2, амперметра A и ваттметра W измеряются первичное и вторичное напряжения U_1 и U_{20}, ток и мощность холостого хода I_0 и P_0; частотомер F служит для контроля частоты. Подводя синусоидальное напряжение при номинальной частоте и изменяя его в некоторых пределах, получаем данные холостого хода, по которым можно построить кривые I_0 и $P_0 = f(U_1)$. Соответственно номинальному напряжению $U_н = 1$ определяем номинальные значения тока и мощности холостого хода $I_{0н}$ и $P_{0н}$ (рис. 14-12). По этим данным мы можем определить параметры холостого хода трансформатора. Из схемы на рис. 14-10, *а* следует, что (индекс «н» для краткости опускается)

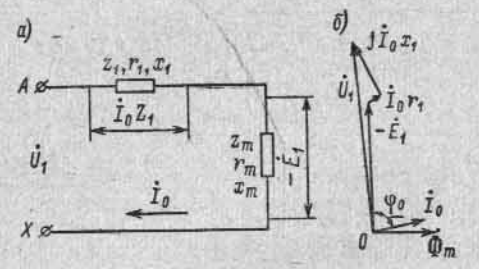


Рис. 14-10. Схема замещения и векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе

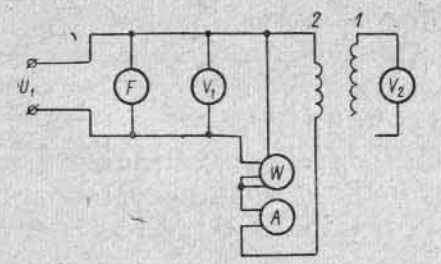


Рис. 14-11. Схема для испытания трансформатора при холостом ходе

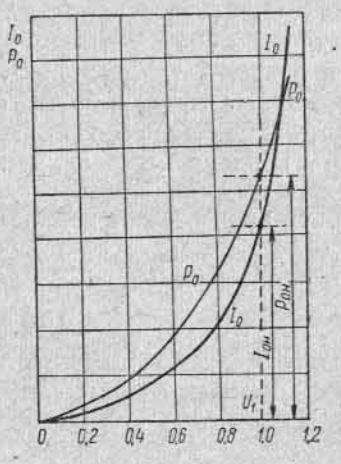


Рис. 14-12. Кривые I_0 и $P_0 = f(U_1)$

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_0} = Z_0 = Z_1 + Z_m = (r_1 + jx_1) + (r_m + jx_m) = r_0 + jx_0. \quad (14\text{-}20)$$

В силовых трансформаторах сопротивления r_1 и x_1 ничтожно малы по сравнению с сопротивлениями r_m и x_m (в сотни раз меньше). Поэ-

тому без сколько-нибудь заметной погрешности можно считать, что

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_0} = Z_0 = r_0 + jx_0 \approx Z_m = r_m + jx_m. \qquad (14\text{-}21)$$

Если расчетным или опытным путем мы определим потери в стали сердечника p_c, то

$$r_m = \frac{p_c}{I_0^2}. \qquad (14\text{-}22)$$

Тогда

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{\left(\frac{U_1}{I_0}\right)^2 - \left(\frac{p_c}{I_0^2}\right)^2}. \qquad (14\text{-}23)$$

Испытание трансформатора в режиме холостого хода служит для определения коэффициента трансформации трансформатора k. Так как при холостом ходе $U_1 \approx E_1$ и $U_{02} = E_2$, то

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}}. \qquad (14\text{-}24)$$

Согласно ГОСТ 3484—54, определение коэффициента трансформации производится на всех ответвлениях обмоток и для всех фаз при пониженном напряжении. Обычно для крупных трансформаторов мощностью свыше 560 *ке·а* величина подводимого напряжения должна быть порядка нескольких процентов от номинального напряжения, а для трансформаторов малой мощности — порядка нескольких десятков процентов от номинального напряжения.

Глава пятнадцатая

КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ И СПОСОБОВ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. Э. Д. С. ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

15-1. Классификация магнитных систем трехфазных трансформаторов

В зависимости от устройства сердечника трехфазного трансформатора различают: а) трансформаторы со связанными магнитными системами и б) трансформаторы с независимыми или почти независимыми магнитными системами.

На рис. 15-1 показан трехстержневой трансформатор со связанной магнитной системой. Характерной особенностью трансформатора на рис. 15-1 является несимметричность его магнитной системы, так как длины магнитных цепей в стержнях A, B и C не равны: длина магнитной цепи в среднем стержне B меньше, чем длины цепей в крайних стержнях A и C. Все три цепи сходятся в узлах O_1 и O_2. Если Φ_A, Φ_B и Φ_C — амплитуды магнитных потоков в стержнях A, B и C, то, согласно первому закону Киргхгофа в применении к магнитным цепям, имеем в каждом из узлов:

$$\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0. \qquad (15\text{-}1)$$

Будем считать, что трансформатор является простейшим ($r_1 = 0$, $x_1 = 0$, $p_c = 0$) и что к нему подводится синусоидальное симметричное напряжение. В этом случае напряжения $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ и потоки $\dot{\Phi}_A$, $\dot{\Phi}_B$ и $\dot{\Phi}_C$ образуют правильные трехлучевые звезды, причем каждый вектор потока отстает от соответствующего вектора напряжения на угол 90° (рис. 15-2).

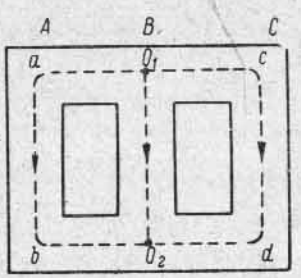


Рис. 15-1. Магнитная система трехстержневого трансформатора

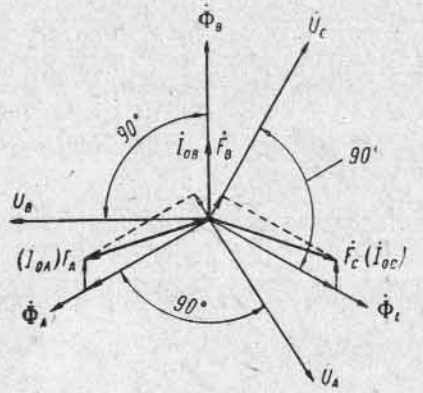


Рис. 15-2. Диаграмма токов холостого хода трехстержневого трансформатора

При прохождении потока $\dot{\Phi}_A$ по участку O_1abO_2 (рис. 15-1) возникает падение магнитного потенциала $\dot{\Phi}_A$ $(R_{ст} + 2R_я)$, где $R_{ст}$ — магнитное сопротивление стержня и $R_я$ — магнитное сопротивление каждой половины верхнего или нижнего ярма. Соответственно для стержня C имеем $\dot{\Phi}_C$ $(R_{ст} + 2R_я)$. В стержне B падение магнитного потенциала равно $\dot{\Phi}_B R_{ст}$. Если $\dot{F}_A$, $\dot{F}_B$ и $\dot{F}_C$ — амплитуды н. с., соответствующие потокам $\dot{\Phi}_A$, $\dot{\Phi}_B$ и $\dot{\Phi}_C$, то по второму закону Кирхгофа в применении к магнитным цепям имеем:

для цепи abO_2O_1

$$\dot{\Phi}_A (R_{ст} + 2R_я) - \dot{\Phi}_B R_{ст} = \dot{F}_A - \dot{F}_B;$$

для цепи cdO_2O_1

$$\dot{\Phi}_C (R_{ст} + 2R_я) - \dot{\Phi}_B R_{ст} = \dot{F}_C - \dot{F}_B.$$

Кроме того, в системах без нулевого провода геометрическая сумма токов и, следовательно, н. с. в трех фазах должны быть равны нулю, т. е.

$$\dot{F}_A + \dot{F}_B + \dot{F}_C = 0.$$

Решая написанные уравнения относительно $\dot{F}_A$, $\dot{F}_B$ и $\dot{F}_C$, получаем:

$$\dot{F}_A = (R_{ст} + 2R_я)\,\dot{\Phi}_A + \frac{2}{3} R_я \dot{\Phi}_B; \qquad (15\text{-}2а)$$

$$\dot{F}_B = R_{ст}\dot{\Phi}_B + \frac{2}{3} R_я \dot{\Phi}_B; \qquad (15\text{-}2б)$$

$$\dot{F}_C = (R_{ст} + 2R_я)\,\dot{\Phi}_C + \frac{2}{3} R_я \dot{\Phi}_B. \qquad (15\text{-}2в)$$

Из равенства (15-2б) следует, что н. с. $\dot{F}_B$ зависит только от потока Φ_B и, стало быть, вектор $\dot{F}_B$ совпадает по фазе с вектором потока Φ_B. Наоборот, н. с. $\dot{F}_A$ и $\dot{F}_C$ представляют собой геометрические суммы двух н. с., из которых одна совпадает по фазе с данным потоком, а другая — с потоком Φ_B. Поэтому вектор н. с. $\dot{F}_A$ отстает по фазе от вектора потока Φ_A на некоторый угол, а вектор н. с. $\dot{F}_C$ опережает на такой же угол вектор потока Φ_C. Таким образом, н. с. $\dot{F}_A$, $\dot{F}_B$ и $\dot{F}_C$ и, следовательно, намагничивающие токи $\dot{I}_{0A}$, I_{0B} и $\dot{I}_{0C}$ образуют несимметричные системы, в которых $\dot{F}_A = \dot{F}_C > \dot{F}_B$ или соответственно $\dot{I}_{0A} = \dot{I}_{0C} > F_{0B}$ (жирные линии на рис. 15-2).

Несимметрия токов холостого хода сказывается главным образом в трансформаторах малой мощности, где ярмо играет относительно большую роль. Здесь $\dot{I}_{0A} = \dot{I}_{0C} = (1{,}2 \div 1{,}5)\,\dot{I}_{0B}$. В трансформаторах большой мощности несимметрия заметно сглаживается. Согласно ГОСТ,[1] за ток холостого хода I_0 принимают среднее арифметическое токов $\dot{I}_{0A}$, $\dot{I}_{0B}$ и $\dot{I}_{0C}$. Так как ток I_0 невелик (от 3 до 8% $I_н$), то даже в трансформаторах малой мощности несимметрия токов холостого хода перестает сказываться уже при очень небольшой нагрузке.

Так как ток $\dot{I}_{0B}$ отстает от напряжения $\dot{U}_B$ на 90°, то мощность фазы B равна нулю; мощность фазы C положительна, так как проекция тока $\dot{I}_{0C}$ на направление вектора $\dot{U}_C$ положительна, а мощность фазы A равна мощности фазы C по величине, но обратна по знаку, так как проекция тока $\dot{I}_{0A}$ на направление вектора $\dot{U}_A$ отрицательна. Таким образом, при холостом ходе трехстержневого трансформатора фазы C и A обмениваются мощностями, но полная мощность холостого хода трансформатора равна нулю, чего и следовало ждать, поскольку мы рассматриваем простейший трансформатор. Неодинаковое распределение мощности при холостом ходе, так же как несимметрия токов, не имеет значения, так как эта мощность обычно меньше 1% от номинальной мощности трансформатора.

Примером трехфазного трансформатора с независимой магнитной системой служит трехфазная трансформаторная

[1] Здесь и в дальнейшем в разделе «Трансформаторы» использованы следующие ГОСТ: 11667—65, 11920—66, 12022—66, 12965—67, 14074—68.

группа, или, проще, групповой трансформатор (см. ниже, рис. 16-1), представляющий собой три одинаковых однофазных трансформатора, обмотки которых определенным образом соединены между собой.

Примером трансформатора с почти независимой магнитной цепью может служить броневой трансформатор. В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением только трехстержневого трансформатора и трехфазной трансформаторной группы.

15-2. Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

Каждая из обмоток трехфазного трансформатора как первичная, так и вторичная, может быть соединена: а) звездой, б) треугольником, в) зигзагом. Главное значение имеют способы соединения обмоток звездой и треугольником.

Способ соединения зигзагом — см. ниже, § 15-6.

Независимо от способа соединения концевые точки каждой фазной обмотки трехфазной системы называют: одну — началом обмотки, другую — ее концом. Для какой-нибудь одной фазной обмотки выбор ее начала и конца можно сделать произвольно. Предположим, например, что за начало первой обмотки мы приняли ту ее концевую точку, идя от которой мы наматываем обмотку по часовой стрелке («правая намотка» — рис. 15-3). Тогда за начала двух других обмоток мы должны принять такие концевые точки этих обмоток, идя от которых мы наматываем обмотки в том же, что и первую, направлении. Условимся обозначать начала обмотки ВН трехфазного трансформатора буквами A, B и C, а ее концы — буквами X, Y и Z; соответственно начала и концы обмотки НН — буквами a, b, c и x, y, z. В дальнейшем для краткости будем обозначать фазные обмотки только их начальными буквами.

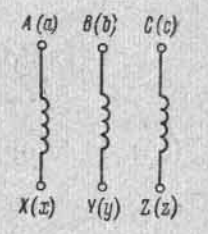


Рис. 15-3. Начала и концы трехфазной обмотки

15-3. Э. д. с. трехфазных обмоток трансформатора

В общем случае э. д. с. e_A, e_B и e_C в фазных обмотках A, B и C несинусоидальны. Предполагая наличие только нечетных гармонических и принимая начальную фазу $\psi = 0$, имеем для обмотки A:

$$e_A = E_{m1}\sin\omega t + E_{m3}\sin 3\omega t + E_{m5}\sin 5\omega t + E_{m7}\sin 7\omega t + \ldots \qquad (15\text{-}3а)$$

Соответственно для фаз B и C имеем:

$$e_B = E_{m1}\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m3}\sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m5}\sin 5\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) +$$

$$+ E_{m7}\sin 7\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \ldots = E_{m1}\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m3}\sin 3\omega t +$$

$$+ E_{m5}\sin\left(5\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + E_{m7}\sin\left(7\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \ldots \qquad (15\text{-}3б)$$

и

$$e_C = E_{m1}\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + E_{m3}\sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + E_{m5}\sin 5\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) +$$

$$+ E_{m7}\sin 7\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \ldots = E_{m1}\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + E_{m3}\sin 3\omega t +$$

$$+ E_{m5}\sin\left(5\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m7}\sin\left(7\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \ldots . \qquad (15\text{-}3в)$$

Из уравнений (15-3а), (15-3б), (15-3в) мы видим, что а) первые гармонические э. д. с. в фазах A, B и C образуют симметричную трехлучевую звезду с порядком следования фаз $\dot{E}_{A1} - \dot{E}_{B1} - \dot{E}_{C1}$

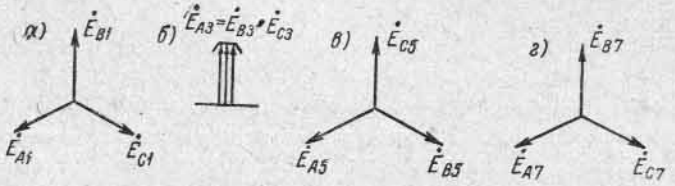


Рис. 15-4. Первая, третья, пятая и седьмая гармонические э. д. с. трехфазной обмотки

(рис. 15-4, *а*); б) третьи гармонические э. д. с. и соответственно гармонические, кратные трем, во всех трех фазных обмотках совпадают по фазе (рис. 15-4, *б*) и, следовательно, независимо от способа соединения обмоток направлены в каждой фазной обмотке либо от ее начала к ее концу, либо в обратном направлении; в) пятая и седьмая гармонические э. д. с. образуют такие же, как первая гармоническая, симметричные трехлучевые звезды, но по сравнению с первой пятая гармоническая имеет обратный порядок следования фаз $\dot{E}_{A5} - \dot{E}_{C5} - \dot{E}_{B5}$ (рис. 15-4, *в*), а седьмая гармоническая — тот же порядок следования фаз, что и первая (рис. 15-4, *г*). В общем случае гармонические порядка $3c + 1$, где c — любое четное число, имеют тот же порядок следования фаз, что и первая гармоническая, получаемая при $c = 0$, а гармонические порядка $3c - 1$ — обратный порядок.

15-4. Соединение трехфазной обмотки трансформатора звездой

При соединении трехфазной обмотки звездой соединяют в одну общую нейтральную точку либо три начала ее, оставляя свободными концы, либо три ее конца, оставляя свободными начала (рис. 15-5, *а*). Обходя любой из трех контуров, образуемых звездой, например контур $(A—X) — (Y—B)$, мы идем по обмотке A от ее начала A к концу X, а по обмотке B — от ее конца Y к началу B, т. е. изменяем направление обхода

обмотки B относительно обмотки A. В этом случае для мгновенных значений линейных э. д. с. имеем:

$$e_{AB} = e_A - e_B; \qquad (15\text{-}4а)$$

$$e_{BC} = e_B - e_C; \qquad (15\text{-}4б)$$

$$e_{CA} = e_C - e_A. \qquad (15\text{-}4в)$$

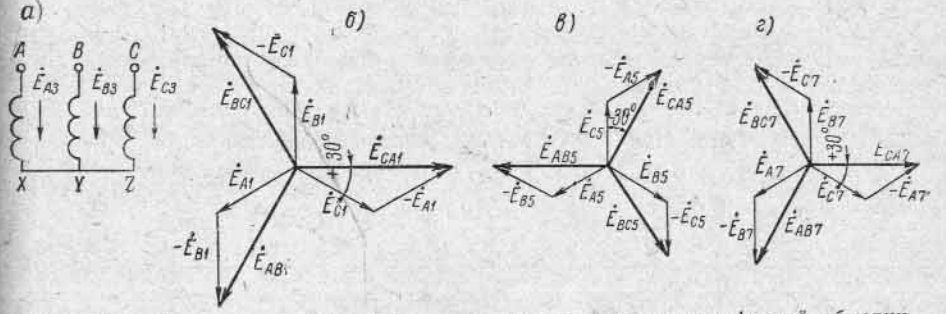


Рис. 15-5. Векторные диаграммы э. д. с. при соединении трехфазной обмотки звездой

Подставляя в эти равенства написанные выше выражения для э. д. с. e_A, e_B и e_C, получаем:

$$e_{AB} = e_A - e_B = E_{m1}\sin\omega t - E_{m1}\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + E_{m3}\sin 3\omega t -$$

$$- E_{m3}\sin\left(3\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + E_{m5}\sin 5\omega t - E_{m5}\sin\left(5\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) +$$

$$+ E_{m7}\sin 7\omega t - E_{m7}\sin\left(7\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \ldots = \sqrt{3}E_{m1}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) +$$

$$+ \sqrt{3}E_{m5}\sin\left(5\omega t - \frac{\pi}{6}\right) + \sqrt{3}E_{m7}\sin\left(7\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \ldots . \qquad (15\text{-}4а)$$

Соответственно

$$e_{BC} = e_B - e_C = \sqrt{3}E_{m1}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}\right) +$$

$$+ \sqrt{3}E_{m5}\sin\left(5\omega t - \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}\right) +$$

$$+ \sqrt{3}E_{m7}\sin\left(7\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}\right) + \ldots \qquad (15\text{-}4б)$$

и

$$e_{CA} = e_C - e_A = \sqrt{3}E_{m1}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{4\pi}{3}\right) +$$

$$+ \sqrt{3}E_{m5}\sin\left(5\omega t - \frac{\pi}{6} + \frac{4\pi}{3}\right) +$$

$$+ \sqrt{3}E_{m7}\sin\left(7\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{4\pi}{3}\right) + \ldots . \qquad (15\text{-}4в)$$

Из уравнений (15-4а), (15-4б) и (15-4в) следует, что при соединении обмоток звездой:

1) гармонические, кратные трем, в линейном напряжении исчезают; физически это объясняется тем, что по каждому из двух контуров, составляющих звезду, эти гармонические действуют взаимно встречно (рис. 15-5, *а*);

2) линейные напряжения всех гармонических порядка $3c + 1$, включая сюда и основную, т. е. первую гармоническую, представляют собой симметричные трехфазные системы напряжений с прямым следованием фаз и начальной фазой $\psi = +30°$ (рис. 15-5, *б* и 15-5, *г*) и соответственно напряжения всех гармонических порядка $3c - 1$ — симметричные трехфазные системы с обратным порядком следования фаз и начальной фазой $\psi = -30°$ (рис. 15-5, *в*);

3) амплитуда линейного напряжения любой гармонической порядка $3c \pm 1$ в $\sqrt{3}$ раз больше амплитуды фазного напряжения соответствующей гармонической, т. е.

$$E_{m\nu л} = \sqrt{3}\, E_{m\nu ф}, \qquad (15\text{-}5)$$

где $\nu = 3c \pm 1$ — порядок гармонической.

Переходя к действующим значениям фазных и линейных э. д. с., имеем:

$$E_ф = \sqrt{\frac{1}{2}\left(E_{m1}^2 + E_{m3}^2 + E_{m5}^2 + E_{m7}^2 + \ldots\right)} \qquad (15\text{-}6)$$

и

$$E_л = \sqrt{\frac{3}{2}\left(E_{m1}^2 + E_{m5}^2 + E_{m7}^2 + \ldots\right)}. \qquad (15\text{-}7)$$

Отсюда следует, что

$$E_л = E_ф \sqrt{3\,\frac{1 + k_{e5}^2 + k_{e7}^2 + \ldots}{1 + k_{e3}^2 + k_{e5}^2 + k_{e7}^2 + \ldots}}, \qquad (15\text{-}8)$$

где

$$k_{e\nu} = \frac{E_{m\nu}}{E_{m1}} = \frac{E_\nu}{E_1}. \qquad (15\text{-}9)$$

Так как при соединении обмоток звездой фазные токи непосредственно выводятся в линию, то

$$I_л = I_ф. \qquad (15\text{-}10)$$

Как известно из курса «Теоретические основы электротехники», при несинусоидальных э. д. с. и токах мощность системы равна сумме мощностей отдельных гармонических. Обычно наибольшее значение имеет мощность первой, или основной, гармонической. Для этой гармонической имеем:

$$P_1 = 3E_{ф1} I_{ф1} \cos\varphi = \sqrt{3}\, E_{л1} I_{л1} \cos\varphi, \qquad (15\text{-}11)$$

где φ — угол сдвига между э. д. с. $E_{ф1}$ и током $I_{ф1}$.

15-5. Соединение трехфазной обмотки трансформатора треугольником

При соединении обмотки треугольником начало последующей фазной обмотки присоединяется к концу предыдущей. Соединение обмоток возможно: а) по схеме $(A—X) — (B—Y) — (C—Z) — A$ (рис. 15-6, *а*) и б) по схеме $(A—X) — (C—Z) — (B—Y) — A$ (рис. 15-6, *б*).

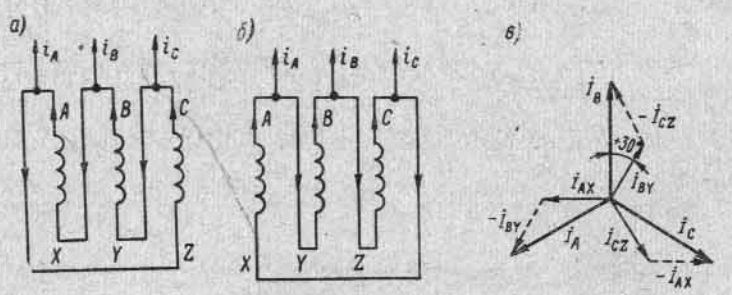


Рис. 15-6. Схемы соединений трехфазной обмотки треугольником (*а* и *б*) и диаграмма токов (*в*)

Пусть i_{AX}, i_{BY} и i_{CZ} — мгновенные значения токов в фазных обмотках A, B и C; i_A, i_B и i_C — мгновенные значения токов в линиях, присоединенных к началам обмоток A, B и C. Тогда для схемы на рис. 15-6, *б* имеем:

$$i_A = i_{AX} - i_{BY}; \qquad (15\text{-}12а)$$

$$i_B = i_{BY} - i_{CZ}; \qquad (15\text{-}12б)$$

$$i_C = i_{CZ} - i_{AX}. \qquad (15\text{-}12в)$$

Соответствующая векторная диаграмма для первой гармонической токов изображена на рис. 15-6, *в* (индекс 1 на диаграмме опущен). Мы видим, что вектор линейного тока опережает вектор фазного тока на угол 30°, причем

$$I_{л1} = I_{ф1}\sqrt{3}. \qquad (15\text{-}13)$$

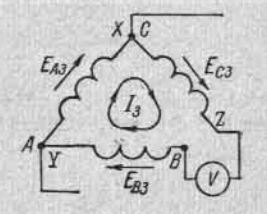


Рис. 15-7. Третьи гармонические э. д. с. и тока при соединении обмоток треугольником

В отношении третьей и кратных ей гармонических треугольник представляет собой замкнутый контур, в котором все эти гармонические действуют в одном направлении — либо от начала каждой фазной обмотки к ее концу, либо в обратном направлении. Действующее значение гармонических, кратных трем,

$$E_{3\Delta} = \sqrt{E_3^2 + E_9^2 + \ldots}. \qquad (15\text{-}14)$$

Э. д. с. $E_{3\Delta}$ можно измерить, если разомкнуть какой-нибудь узел треугольника, например узел $B—Z$ (рис. 15-7), и в рассечку включить вольтметр.

Действуя по замкнутому контуру треугольника, э. д. с. $E_{3\Delta}$ создает в нем ток I_3, который можно измерить, если в указанную выше рассечку включить вместо вольтметра амперметр. В линейных напряжениях э. д. с. $E_{3\Delta}$ не появляется, так как в замкнутом треугольнике она целиком используется для преодоления падения напряжения от тока I_3.

15-6. Соединение трехфазной обмотки трансформатора зигзагом

Сущность этого способа состоит в том, что каждую фазную обмотку на стороне низшего напряжения делят на две чаще всего равные части и помещают эти части на разных стержнях (рис. 15-8, *а*). Соединение

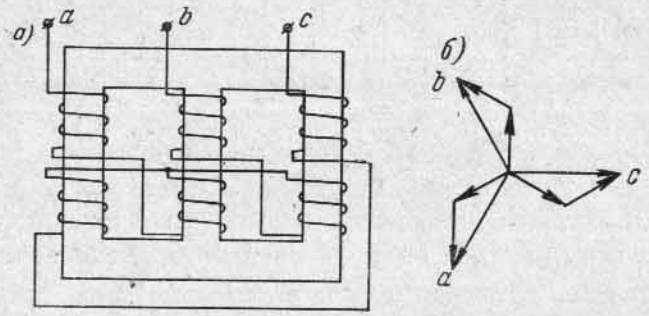


Рис. 15-8. Соединение зигзагом

обеих частей производят так, чтобы их э. д. с. геометрически в ы ч и т а л и с ь; для этого к о н е ц каждой одной половины фазной обмотки с о е д и н я ю т с к о н ц о м второй половины той же обмотки. Если при этом фазные обмотки разделены пополам, то результирующая э. д. с. фазной обмотки в $\sqrt{3}$ раза больше э. д. с. в каждой ее половине (рис. 15-8, *б*).

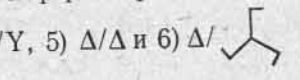
Соединение зигзагом применяется в специальных трансформаторах, например в трансформаторах для ртутных выпрямителей, о чем подробнее см. § 23-6.

15-7. Стандартные способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов в СССР

Соединения звездой, треугольником и зигзагом условились обозначать символами Y, Δ и . Сначала пишут способ соединения обмотки ВН, затем обмотки НН и между этими обозначениями ставят наклонную черту.

Если какая-нибудь обмотка имеет выведенную нейтральную точку, то к соответствующему символу приписывается значок «0». Таким

образом, обозначение Y_0/Δ следует читать так: обмотка ВН соединена звездой и имеет выведенную нейтральную точку, обмотка НН соединена треугольником.

Способы соединения /Y, /Δ и / в СССР не применяются. Таким образом, практически возможны следующие шесть способов соединения обмоток трехфазного трансформатора: 1) Y/Y_0 или Y/Y, 2) Y/Δ, 3) Y/ или Y/, 4) Δ/Y, 5) Δ/Δ и 6) Δ/ или Δ/.

Так как одна из обмоток может быть «вывернута» относительно другой, например намотана в другую относительно первой сторону, то всего можно получить двенадцать различных способов соединения обмоток трехфазных трансформаторов. Некоторые иностранные нормы предусматривают все эти способы, тогда как ГОСТ оставляют из них только три, а именно: 1) Y/Y_0, 2) Y/Δ и 3) Y_0/Δ. В дальнейшем мы будем иметь в виду только эти стандартные способы соединения обмоток.

15-8. Схемы и группы соединений обмоток

Принятые ГОСТ схемы соединений обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов показаны на рис. 15-9. Начала и концы обмоток ВН и НН обозначены согласно сказанному выше (см. § 15-2).

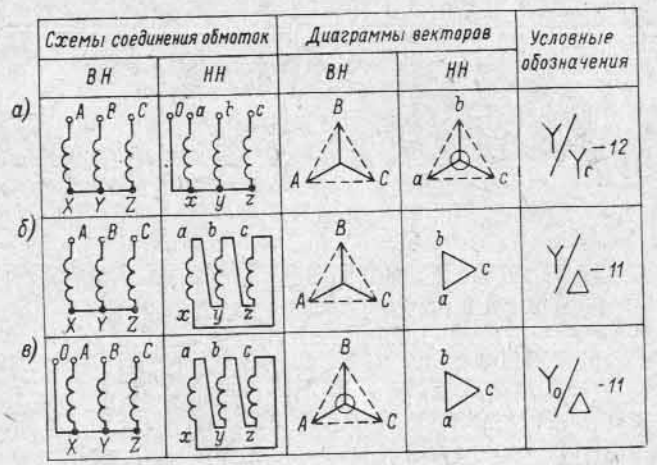


Рис. 15-9. Схемы соединений обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов

При построении диаграмм линейные напряжения обмотки ВН (штриховые линии на рис. 15-9) изображаются во всех случаях равносторонними треугольниками напряжений, причем вершины *A*, *B* и *C* находятся соответственно в нижнем левом углу, в верхнем углу и в нижнем правом углу. При этом, говоря о работе трансформаторов,

мы должны заранее предусмотреть возможность их параллельной работы, при которой могут быть соединены между собой только равнопотенциальные зажимы. Поэтому одного указания на способ соединения обмоток трансформатора недостаточно; необходимо еще указание на угол сдвига α между первичным и вторичным линейными напряжениями, в соответствии с чем определяется г р у п п а, к которой принадлежит трансформатор. Покажем, что угол α зависит от а) направления, в котором намотана обмотка; б) способа обозначения зажимов обмоток, т. е. их маркировки, и в) способа соединения обмоток трехфазных трансформаторов.

Выясним сначала влияние двух первых факторов на примере однофазного трансформатора. Будем считать, что верхняя обмотка трансформатора на рис. 15-10, *а* является его первичной обмоткой, а нижняя — вторичной. Предположим, что обе обмотки намотаны в одну и ту же сторону и что их верхние зажимы приняты за начала обмоток и обозначены буквами A и a, а нижние зажимы X и x — за концы обмоток.

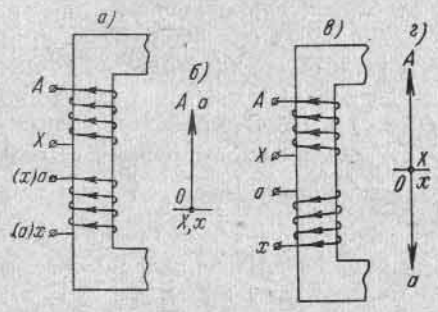


Рис. 15-10. Угол сдвига векторов э. д. с. в зависимости от направления намотки и обозначения зажимов обмотки

Так как обе обмотки трансформатора располагаются на одном и том же стержне и пронизываются одним и тем же основным потоком, то в нашем случае наводимые в обмотках э. д. с. имеют в любой момент времени одинаковое направление относительно зажимов обмоток, например от конца X к началу A в первичной обмотке и от конца x к началу a во вторичной обмотке. Соответственно этому напряжения $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ на зажимах первичной обмотки и вторичной, приведенной к первичной, обмотки трансформатора совпадают по фазе и изображаются двумя векторами $\overline{OA}$ и $\overline{Oa}$, равными по величине и одинаково направленными (рис. 15-10, *б*).

Если первичная и вторичная обмотки намотаны в разные стороны, но сохраняют те же обозначения зажимов, что и на рис. 15-10, *а*, то, как это можно видеть на рис. 15-10, *в*, напряжения $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ относительно зажимов первичной и вторичной обмоток направлены в разные стороны, например от X к A в первичной обмотке и от a к x во вторичной обмотке. Соответственно этому напряжения $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ должны быть изображены векторами $\overline{OA}$ и $\overline{Oa}$, направленными в разные стороны (рис. 15-10, *г*).

Мы получили бы такой же результат, если бы, оставив тот же способ намотки обмоток, что и на рис. 15-10, *а*, изменили маркировку вторичной обмотки, поменяв местами обозначения ее зажимов (соответствующие буквы поставлены в скобках на рис. 15-10, *а*). В этом случае первичное напряжение было бы направлено в одну сторону,

например от зажима X к зажиму A, а вторичное напряжение в другую — от зажима a к зажиму x.

Таким образом, принимая вектор $\overline{OA}$ первичного напряжения за исходный, мы можем сказать, что вектор $\overline{Oa}$ вторичного напряжения однофазного трансформатора либо совпадает с вектором $\overline{OA}$ по фазе, либо находится с ним в противофазе; в первом случае вектор $\overline{Oa}$ смещен относительно вектора $\overline{OA}$ на угол $\alpha = 0°$, а во втором — на угол $\alpha = 180°$.

Вместо того чтобы выражать угол сдвига между напряжениями в градусах, удобнее пользоваться ч а с о в ы м с п о с о б о м обозначения угла. Для этого вектор $\overline{OA}$ первичного линейного напряжения принимают за большую стрелку часов и устанавливают на цифре 12 часового циферблата, а вектор $\overline{Oa}$ вторичного линейного напряжения принимают за малую стрелку часов и устанавливают на циферблате соответственно положению вектора $\overline{Oa}$ относительно вектора $\overline{OA}$. Если векторы $\overline{OA}$ и $\overline{Oa}$ совпадают по фазе, как на рис. 15-10, *б*, то малую стрелку часов мы должны установить, как и большую стрелку, на той же цифре 12 (рис. 15-11). Угол сдвига между стрелками часов равен нулю или, что одно и то же, $360° = 30° \times 12$. Здесь угол 30° представляет собой угол между двумя соседними цифрами часового циферблата и принимается за единицу часового сдвига. Цифра 12 и определяет собой группу, к которой в данном случае принадлежит трансформатор.

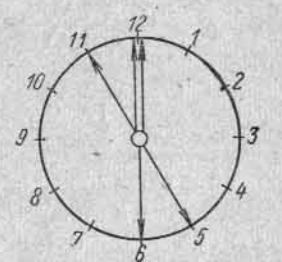


Рис. 15-11. Часовое обозначение группы соединений

Если векторы $\overline{OA}$ и $\overline{Oa}$ находятся в противофазе, как на рис. 15-10, *г*, то малую стрелку часов мы должны установить на цифре 6 циферблата соответственно углу сдвига на $30° \times 6 = 180°$. В этом случае группа трансформатора определяется цифрой 6.

Выясним теперь вопрос о группах трехфазных трансформаторов. Предположим, что обе обмотки трансформатора соединены звездой, намотаны в одну и ту же сторону и имеют одинаковые обозначения зажимов. Обмотку ВН мы будем считать первичной обмоткой, а обмотку НН — вторичной. Системы линейных и фазных первичных и вторичных напряжений предполагаются симметричными. Так как вторичная обмотка как бы повторяет первичную, то звезда ax, by и cz вторичных фазных напряжений и треугольник abc вторичных линейных напряжений совпадают соответственно по фазе со звездой AX, BY и CZ и треугольником ABC фазных и линейных первичных напряжений (рис. 15-12). Таким образом, угол сдвига вторичного линейного напряжения относительно первичного равен нулю, и, следовательно, трансформатор принадлежит к группе Y/Y — 12 ($\alpha = 0°$ или $\alpha = 30° \times 12$).

Если мы намотаем обмотку НН в обратном направлении относительно обмотки ВН или поменяем местами ее начала и концы (но

неодновременно одно и другое), то при соединении обеих обмоток по-прежнему звездой треугольник напряжений *abc* повернется относительно треугольника *ABC* на 180°, т. е. на 30° × 6 (рис. 15-13). В этом случае вторую стрелку часов надо установить на цифре 6 циферблата (см. рис. 15-11). Следовательно, данное соединение обмоток относится к группе 6 и пишется в виде Y/Y—6 или Y/Y_0—6.

Рассмотрим теперь соединение звезда — треугольник на рис. 15-9, *б*. Здесь обмотка НН соединена по схеме *a—x—c—z—b—y—a*. Стороны *AB*, *BC* и *CA* треугольника напряжений *ABC* определяют собой линейные напряжения обмотки ВН, а лучи звезды того же треугольника — фазные напряжения этой обмотки. Если обмотки ВН и НН намотаны в одном направлении и имеют одинаковые обозначения зажимов, то векторы фазных напряжений обеих обмоток совпадают. Поэтому при построении треугольника *abc* нужно провести из точки *a* (рис. 15-14), находящейся в левом нижнем углу, вектор $\overline{ax}$ параллельно вектору $\overline{AX}$, затем из точки *c*, которую нужно совместить с точкой *x*, следует провести вектор $\overline{cz}$ параллельно вектору $\overline{CZ}$ и, наконец, из точки *b*, которую нужно совместить с точкой *z*,

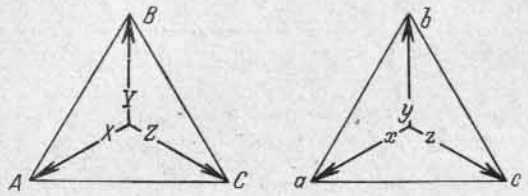


Рис. 15-12. Соединение Y/Y — 12

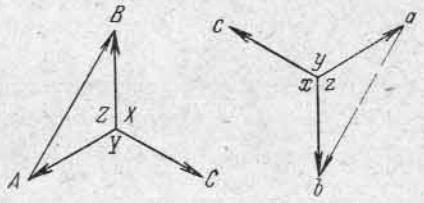


Рис. 15-13. Соединение Y/Y — 6

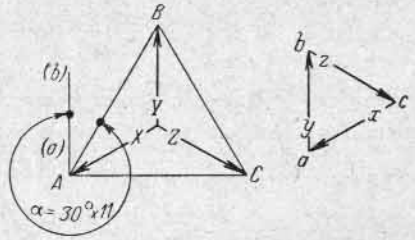


Рис. 15-14. Соединение Y/Δ — 11

провести вектор $\overline{by}$ параллельно вектору $\overline{BY}$, тем самым замыкая треугольник *abc*. Сопоставляя положения треугольников *ABC* и *abc*, например сторон *AB* и *ab*, можно видеть, что второй треугольник повернут относительно первого по направлению вращения часовой стрелки на 330° = 30° × 11. Следовательно, данное соединение обмоток относится к группе 11 и пишется в виде Y/Δ—11.

Если бы обмотка НН была намотана в обратном направлении относительно обмотки ВН или мы поменяли местами ее начала и концы, то треугольник *abc* повернулся бы относительно треугольника *ABC* на 150° = 30° × 5. Следовательно, такое соединение обмоток дает группу 5 и пишется в виде Y/Δ — 5. Нетрудно показать, что если бы мы соединили обмотку НН по схеме *a—x—b—y—c—z—a*, то при одинаковом направлении намотки и одинаковых обозначениях зажимов получили бы группу Y/Δ — 1.

Группы 12, 6, 11 и 5 считаются основными. Из них можно получить ряд производных групп. Для этого нужно только переместить зажимы обмотки НН относительно зажимов обмотки ВН. На рис. 15-15, *а* обе обмотки соединены звездой и одинаково намотаны, но зажимы *a*, *b*, *c* вторичной обмотки перемещены относительно зажимов *A*, *B*, *C* первичной обмотки на угол 120°; в этом случае треугольник *abc* повернется относительно треугольника *ABC* по вращению часовой стрелки на 30° × 4 = 120°, т. е. мы имеем группу соединений Y/Y — 4.

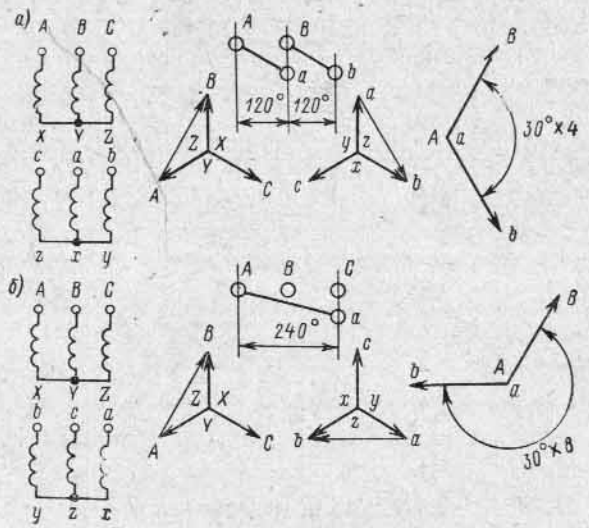


Рис. 15-15. Группы соединений Y/Y — 4 и Y/Y — 8

Если бы при соблюдении тех же условий мы переместили зажимы *a*, *b*, *c* относительно зажимов *A*, *B*, *C* на 240° (рис. 15-15, *б*), то получили бы группу соединений Y/Y — 8.

В том случае, когда обмотка НН намотана в обратном направлении относительно обмотки ВН, мы получаем группы 10 и 2 соответственно группам 4 и 8.

Таким образом, при соединении обмоток по схеме звезда — звезда получаются все четные группы соединений. Рассуждая аналогично, нетрудно убедиться, что при соединении обмоток по схеме звезда — треугольник получаются все нечетные группы соединений.

15-9. Области применения различных способов соединения обмоток

Соединение Y/Y_0 — 12 применяется в тех случаях, когда нагрузка носит смешанный осветительно-силовой характер. Двигатели включаются на линейное напряжение 220 или 380 *в*, а лампы — между

одним из линейных проводов и нейтральным проводом, т. е. на напряжение $220/\sqrt{3} = 127$ *в* или $380/\sqrt{3} = 220$ *в*. Так как при заданном напряжении ток растет пропорционально мощности, то во избежание затруднений, связанных с устройством обмотки на большие токи, ГОСТ ограничивает предельные мощности трансформаторов при соединении $Y/Y_0 - 12$ пределами, указанными в табл. 15-1. Если при этом нагрузка неравномерна, то ток в нейтральном проводе трансформатора не должен превышать 25% номинального тока обмотки НН.

В тех случаях, когда номинальное вторичное напряжение выше 400 *в*, ГОСТ предусматривает соединение обмоток по способу Y/Δ—11. Как будет видно из дальнейшего, соединение одной из обмоток треугольником оказывает ценное положительное влияние на условия работы трансформатора.

Последняя группа трансформаторов, указываемых в табл. 15-1, обслуживает главным образом, линии передачи. Соединение обмоток этих трансформаторов по способу $Y_0/\Delta - 11$ предусматривает возможность заземления системы на стороне высшего напряжения.

Таблица 15-1

Обозначение схемы соединения обмоток	Напряжение обмоток		Мощность трансформатора, *ква*
	ВН, *кв*	НН, *в*	
$Y/Y_0 - 12$	До 35 (включительно)	230 400	До 560 (включительно) До 1800 (включительно)
$Y/\Delta - 11$	До 35 (включительно)	525 Выше 525	До 1800 (включительно) До 5600 (включительно)
$Y_0/\Delta - 11$	110 и выше	3150 и выше	3200 и выше
	6,3 и выше	3300 и выше	7500 и выше

Глава шестнадцатая

ХОЛОСТОЙ ХОД ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

16-1. Холостой ход трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Y/Y_0—12

При изучении режима холостого хода однофазного трансформатора мы видели, что при подведенном синусоидальном напряжении кривые первичной э. д. с. и основного потока синусоидальны, а кривая тока содержит наряду с первой гармонической сильно выраженную третью гармоническую (см. рис. 14-3).

Возьмем теперь трансформаторную группу, состоящую из трех одинаковых однофазных трансформаторов, обмотки которых соединены по способу $Y/Y_0 - 12$ (рис. 16-1).

Основное, что отличает работу при холостом ходе такой трансформаторной группы от работы при холостом ходе однофазного трансформатора, состоит в том, что в ней нет третьих гармонических тока. Это непосредственно вытекает из сказанного ранее (см. § 15-3). Аналогично формулам (15-3а), (15-3б) и (15-3в) для третьих гармонических тока имеем:

$$i_{0A3} = I_{03m} \sin 3\omega t; \tag{16-1а}$$

$$i_{0B3} = I_{03m} \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = I_{03m} \sin 3\omega t; \tag{16-1б}$$

$$i_{0C3} = I_{03m} \sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = I_{03m} \sin 3\omega t. \tag{16-1в}$$

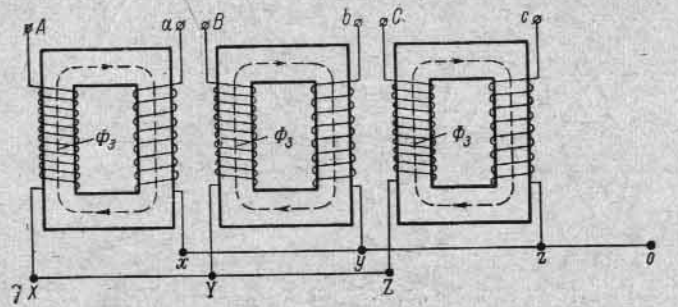


Рис. 16-1. Трансформаторная группа при соединении обмоток по схеме $Y/Y_0 - 12$

Таким образом, третьи гармонические тока, так же как третьи гармонические э. д. с., совпадают по фазе во времени, и, следовательно, каждая из этих гармонических направлена в любой момент времени либо от начала обмотки к ее концу, либо в обратном направлении. Следовательно, при соединении обмоток звездой токи третьей гармонической выпадают из кривой тока холостого хода, поскольку в каждый данный момент они направлены либо все к нейтральной точке, либо от нее.

Токи пятой гармонической продолжают существовать в кривой тока холостого хода, но, в соответствии со сказанным выше [см. формулы (15-3а), (15-3б) и (15-3в)], с обратным порядком следования фаз.

Отсутствие третьей гармонической в кривой тока холостого хода искажает кривую магнитного потока. На рис. 16-2 изображены кривые тока i_0 и потока Ф при наличии третьей гармонической i_{03} в кривой тока i_0 (рис. 16-2, *а*) и при отсутствии ее в этой кривой (рис. 16-2,*б*). В первом случае кривая потока Ф синусоидальна. Выпадение третьей гармонической i_{03} можно представить как наложение на кривую тока

i_0 на рис. 16-2, *а* кривой тока третьей же гармонической, но обратно направленной, т. е.— i_{03}. Соответственно на синусоидальную кривую потока Ф нужно наложить кривую потока Φ_3, создаваемого током — i_{03} (тонкие штриховые линии на рис. 16-2, *б*); кривая результирующего потока Ф показана на рис. 16-2, *б* жирной штриховой линией.

Так как каждая из фаз трансформатора имеет самостоятельную магнитную систему (см. рис. 16-1), то магнитный поток Φ_3 замыкается по тому же пути, что и поток Φ_1, т. е. по пути, имеющему малое магнитное сопротивление.

Поэтому в трехфазной группе величина потока Φ_3 в отдельных случаях составляет 15—20% от Φ_1. При резко выраженной третьей

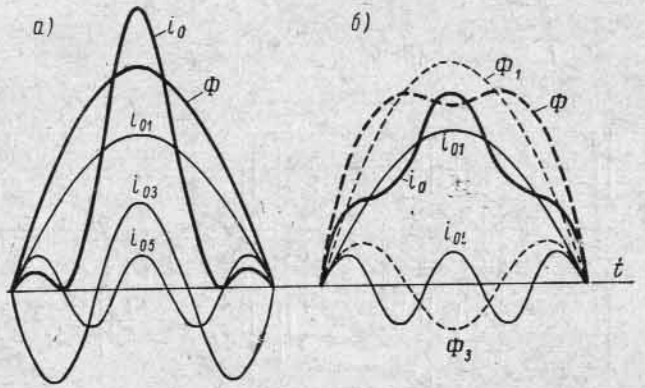


Рис. 16-2. Кривые тока i_0 и потока Ф: *а* — при наличии третьей гармонической в кривой тока i_0; *б* — при отсутствии ее в кривой тока i_0

гармонической потока Φ_3 кривая результирующего потока Ф приобретает седлообразный характер.

Поток Φ_3 наводит э. д. с. e_{13} и e_{23} в первичной и вторичной обмотках трансформатора и, так как он изменяется с частотой $f_3 = 3f$, то наводимые им э. д. с. тройной частоты достигают 45—60% от э. д. с. e_1 и e_2. При этом, как видно из сопоставления кривых э. д. с. e_1 и e_{13} (рис. 16-3), амплитуды этих гармонических складываются. Это повышает на те же 45—60% наибольшее значение фазной э. д. с. и на 10—17% ее действующее значение $\left(\sqrt{1^2+(0{,}45 \div 0{,}60)^2}\right)$. Такое повышение э. д. с. нежелательно и в ряде случаев опасно. Поэтому, например, в трансформаторах большой мощности повышенного напряжения соединение Y/Y — 12 в чистом виде не применяется.

Несмотря на резкое изменение кривых ф а з н ы х напряжений, *линейные напряжения остаются синусоидальными*, так как при соединении обмоток звездой третьи гармонические э. д. с. в линейных напряжениях исчезают (см. § 15-3).

Иначе обстоит дело в трехстержневом трансформаторе, в котором магнитные цепи представляют собой связанную систему. Действительно, потоки третьих гармонических во всех трех фазах, так же как

и токи, совпадают во времени. Это значит, что потоки третьих гармонических в каждый момент времени равны друг другу по величине и в стержнях трансформатора направлены все в одну сторону, например вниз, как это показано на рис. 16-4. Мы видим, что поток третьей гармонической в каком-нибудь одном стержне, например в первом, не может замкнуться ни через второй, ни через третий стержни, так как в каждом из них он встречает поток третьей гармонической, направленный ему навстречу. Это приводит к тому, что линии третьей гармонической потока во всех трех фазах выступают из сердечника и замыкаются от ярма к ярму через воздух. Этот путь имеет большое магнитное сопротивление; поэтому потоки третьей гармонической

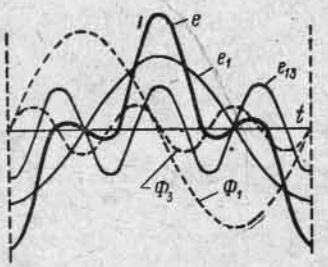


Рис. 16-3. Кривые потока и э. д. с. группового трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Y — 12

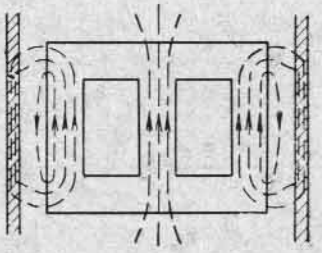


Рис. 16-4. Третьи гармонические потока в трехстержневом трансформаторе

невелики, и при нормальных насыщениях стали кривые фазных напряжений, как правило, остаются практически синусоидальными.

Потоки третьей гармонической, замыкаясь через воздух, пульсируют с частотой $3f$. Они, естественно, стремятся идти по пути, имеющем наименьшее сопротивление, т. е. через стенки бака, стяжные болты и т. д. В результате в этих частях возникают вихревые токи, вызывающие местные нагревания и понижающие к. п. д. трансформатора.

Исследования показывают, что уже при индукциях в стержне порядка 1,4 *тл* потери в баке составляют около 10% от потерь в сердечнике; при увеличении индукции в стержне потери в баке быстро растут и при индукции 1,6 *тл* достигают 50—65% от потерь в сердечнике.

16-2. Холостой ход трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Δ/Y

Как мы знаем, первичный треугольник трансформатора представляет собой контур, по которому все три тока третьей гармонической

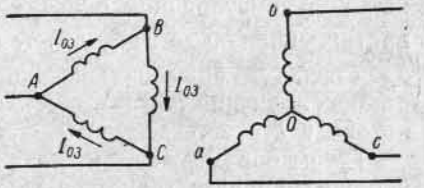


Рис. 16-5. Третьи гармонические тока холостого хода при соединении обмоток по схеме Δ/Y

протекают в одном направлении (рис. 16-5). Но если в токе холостого хода имеется третья гармоническая, то формы кривых магнитного потока и соответственно первичной и вторичной э. д. с. приближаются к синусоиде (см. рис. 16-2), т. е. отпадают все те неблагоприятные явления, о которых мы говорили в предыдущем параграфе. Это составляет весьма ценное преимущество соединения обмоток по способу Δ/Y перед соединением по способу Y/Y.

16-3. Холостой ход трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Y/Δ

То обстоятельство, что здесь, в противоположность соединению Δ/Y, звездой соединяется первичная обмотка, а треугольником — вторичная (рис. 16-6), не имеет существенного значения. Действительно, при соединении первичной обмотки звездой из кривой тока холостого хода выпадает третья гармоническая, и кривая потока приобретает уплощенную форму (см. рис. 16-2, *б*). Третья гармоническая потока $\dot{\Phi}_3$ наводит в каждой фазе вторичной обмотки третью гармоническую э. д. с. $\dot{E}_{23}$, отстающую от потока Φ_3 по фазе на 90° (рис. 16-7). Э. д. с. $\dot{E}_{23}$ создают токи $\dot{I}_{23}$, замыкающиеся по вторичному треугольнику (рис. 16-6) и отстающие от э. д. с. $\dot{E}_{23}$ почти на 90°, так как контур вторичной обмотки имеет значительное индуктивное сопротивление. Мы видим, что ток $\dot{I}_{23}$ находится почти в противофазе с третьей гармонической потока, т. е. создает поток Φ_3, практически компенсирующий поток Φ_3; вследствие этого кривые результирующего потока и соответственно э. д. с. приближаются к синусоиде.

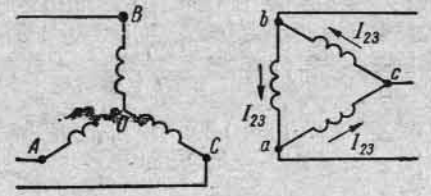


Рис. 16-6. Третьи гармонические тока холостого хода при соединении обмоток по схеме Y/Δ

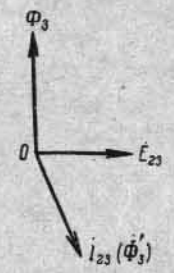


Рис. 16-7. Действие тока $\dot{I}_{23}$ при соединении обмоток по схеме Y/Δ

Таким образом, соединение Y/Δ, так же как и соединение Δ/Y, вполне защищает трансформатор от всякого рода вредных воздействий третьих гармонических потока и э. д. с. В дальнейшем мы распространим этот вывод и на случай работы трансформатора при нагрузке.

16-4. Соединение Y_0/Y_0—12 трехфазного трансформатора с третичной обмоткой

Соединение Y_0/Y_0 — 12 не применяют в мощных трансформаторах высокого напряжения из-за недостатков, о которых мы говорили выше. Но иногда считают выгодным заземлить трансформатор как со стороны первичной обмотки, так и со стороны вторичной. В этом случае обе обмотки соединяют звездой, но устраивают так называемую третичную обмотку, которая представляет собой добавочную обмотку, соединенную треугольником и замкнутую на себя (рис. 16-8). По отношению к этой третичной обмотке поток третьей гармонической будет действовать совершенно так же и с теми же результатами, что и при соединении Y/Δ — 11.

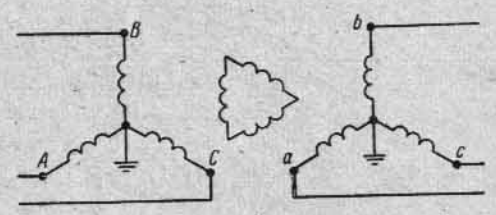


Рис. 16-8. Трансформатор с третичной обмоткой

Трансформаторы с третичной обмоткой встречаются относительно редко, так как обычно заземляется только обмотка ВН.

16-5. Данные холостого хода трехфазных трансформаторов

На рис. 16-9 построены в логарифмической шкале кривые $I_0 = f(P_н)$ и $P_0 = f(P_н)$, причем ток I_0 выражен в процентах от $I_н$, а P_0 — в процентах от $P_н$. Кривые *1* и *3* относятся к трансформаторам с напряжением 6—35 *кв*, кривые *2* и *4* — к трансформаторам с напряжением 10—121 *кв*. Точные значения тока I_0 и мощности P_0 см. в соответствующих ГОСТ.

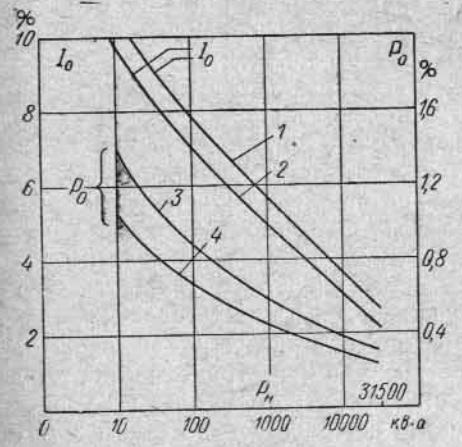


Рис. 16-9. Кривые $I_0 = f(P_н)$ и $P_0 = f(P_н)$

16-6. Численный пример

Определить параметры холостого хода трехфазного масляного трансформатора завода МТЗ. Основные данные трансформатора:

$P_н = 5600 кв \cdot а$, $U_1/U_2 = 35000/6600\ в$, $I_1/I_2 = 92{,}5/490\ а$, $P_0 = 18{,}5\ квт$, $I_0 = 4{,}5\%$, $f = 50\ гц$, $Y/\Delta = 11$.

Расчет ведется на фазу. Фазное напряжение со стороны обмотки ВН

$$U_{1ф} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{35\,000}{\sqrt{3}} = 20\,200\ в.$$

Фазный ток холостого хода

$$I_{0\phi} = 0{,}045 I_1 = 0{,}045 \cdot 92{,}5 = 4{,}16 \text{ а}.$$

Мощность потерь холостого хода на фазу

$$P_{0\phi} = \frac{P_0}{m} = \frac{18\,500}{3} = 6170 \text{ вт}.$$

Параметры холостого хода:

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{0\phi}} = \frac{20\,000}{4{,}16} = 4850 \text{ ом};$$

$$r_0 = \frac{P_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} = \frac{6170}{4{,}16^2} = 356 \text{ ом};$$

$$x_0 = \sqrt{Z_{0\phi}^2 - r_0^2} = \sqrt{4850^2 - 356^2} = 4700 \text{ ом}.$$

Глава семнадцатая

РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ. РАССЕЯНИЕ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

17-1. Предварительные замечания

Короткое замыкание трансформатора представляет собой такой предельный режим его работы, когда вторичная обмотка замкнута на себя и, следовательно, вторичное напряжение U_2 равно нулю.

Если при коротком замыкании трансформатора к зажимам его первичной обмотки подводится номинальное или близкое к нему напряжение, то токи короткого замыкания в обмотках трансформатора достигают величины, превышающей номинальные токи обмоток в 10—20 и более раз, так как сопротивления обмоток относительно невелики. Такое короткое замыкание трансформатора возможно в эксплуатационных условиях и поэтому может быть названо эксплуатационным (аварийным). Оно представляет большую опасность для трансформатора как вследствие возникновения в нем весьма значительных механических усилий, так и вследствие возможного чрезмерного повышения температуры обмоток. Поэтому трансформатор должен обладать необходимой механической и термической прочностью, и в схеме трансформатора должна быть предусмотрена защита, способная отключить от сети короткозамкнутый трансформатор по прошествии некоторого, обычно весьма короткого промежутка времени (часто меньше 1 *сек*). Если защита не сработает, то трансформатор терпит аварию.

Другим видом короткого замыкания трансформатора является режим короткого замыкания при испытании трансформатора, которое производится при соответственно пониженном напряжении $U_к$ и имеет целью получить данные короткого замыкания, а именно: а) напряжение короткого замыкания и

б) мощность, идущую на покрытие потерь при коротком замыкании, так как в этом режиме трансформатор не совершает полезной работы.

Такой вид короткого замыкания может быть назван испытательным.

Здесь еще раз отметим, что режим короткого замыкания наряду с режимом холостого хода имеет важнейшее значение как в теоретическом, так и в эксплуатационном отношении.

17-2. Напряжение короткого замыкания

Предположим, что при коротком замыкании мы понизили подводимое к трансформатору напряжение до такого значения $U_{к.н}$, при котором токи в обмотках трансформатора равны номинальным. Напряжение $U_{к.н}$, выраженное в процентах от соответствующего номинального напряжения, называется номинальным напряжением короткого замыкания или просто напряжением короткого замыкания, причем для краткости индекс «н» при $U_{к.н}$ опускается, т. е.

$$u_к = \frac{U_к}{U_н} \cdot 100\%.$$

Согласно ГОСТ, напряжение короткого замыкания приводится к значению, соответствующему номинальной рабочей температуре обмотки 75° С. Для трехфазных двухобмоточных трансформаторов установлены значения, приведенные в табл. 17-1. Из таблицы видно,

Таблица 17-1

Мощность, *ква*	Номинальное высшее напряжение, *кв*	$u_к$, %
5—5600	6,3 и 10	5,5
50—2400	35	6,5
3200—4200	35	7,0
5600—10000	35—38,5	7,5
15000—31500	35—38,5	8,0
3200—60000	110—121	10,5

что напряжение короткого замыкания тем больше, чем больше мощность трансформатора и его напряжение.

Напряжение короткого замыкания как величина, имеющая весьма важное значение, всегда указывается на щитке трансформатора.

17-3. Физические условия работы трансформатора при коротком замыкании

Подведем к зажимам первичной обмотки короткозамкнутого трансформатора такое синусоидальное напряжение $U_{1к}$, при котором первичный и вторичный токи I_1 и I_2 не выходят за пределы, близкие к их номинальным значениям. Токи I_1 и I_2 создают первичную и вто-

ричную н. с. I_1w_1 и I_2w_2, вступающие между собой во взаимодействие, в результате которого в сердечнике трансформатора создается основной магнитный поток $\Phi_к$, сцепленный с обеими обмотками трансформатора. Кроме того, н. с. I_1w_1 и I_2w_2 образуют первичный и вторичный потоки рассеяния, причем мы будем считать, что каждый из них создается только данной обмоткой и сцеплен с витками только этой обмотки (рис. 17-1). Поток $\Phi_к$ создает в первичной и вторичной обмотках трансформатора э. д. с. $E_{1к}$ и $E'_{2к}$, а потоки рассеяния — э. д. с. $E_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1x_1$ и $\dot{E}'_{\sigma 2} = -j\dot{I}'_2x'_2$ (см. § 13-2 и 13-4). Тогда, согласно формулам (13-22) и (13-23а), уравнения напряжений первичной и приведенной вторичной обмоток напишутся в виде:

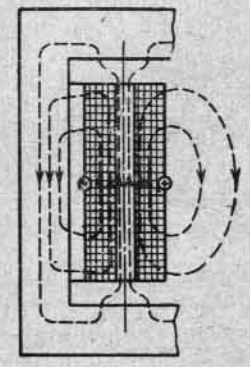


Рис. 17-1. Потоки рассеяния в трансформаторе с концентрической обмоткой при коротком замыкании

$$\dot{U}_{1к} = -(\dot{E}_{1к} - j\dot{I}_1x_1 - \dot{I}_1r_1) = -\dot{E}_{1к} + \dot{I}_1Z_1; \quad (17\text{-}1)$$

$$\dot{E}'_{2к} - \dot{I}'_2(r'_2 + jx'_2) = \dot{E}'_{2к} - \dot{I}'_2Z'_2 = 0. \quad (17\text{-}2)$$

Так как $U_{1к}$ составляет всего 5—10% от номинального напряжения соответствующей обмотки (табл. 17-1), то основной поток в сердечнике трансформатора $\Phi_к$ и необходимая для его создания н. с. $F_0 = I_0w_1$ так невелики, что ими можно пренебречь. Тогда, согласно формулам (13-15а) и (13-15б), уравнение н. с. при коротком замыкании приведенного трансформатора напишется в виде:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = 0 \quad \text{или} \quad \dot{I}_1 = -\dot{I}'_2. \quad (17\text{-}3)$$

Пользуясь уравнениями (17-2) и (17-3), можно представить (17-1) в виде:

$$\dot{U}_{1к} = \dot{I}_1Z_1 + \dot{I}_1Z'_2 = \dot{I}_1[(r_1 + jx_1) + (r'_2 + jx'_2)] =$$
$$= \dot{I}_1[(r_1 + r'_2) + j(x_1 + x'_2)] = \dot{I}_1(r_к + jx_к) = \dot{I}_1Z_к. \quad (17\text{-}4)$$

Сопротивления $r_к = r_1 + r'_2$, $x_к = x_1 + x'_2$ и $Z_к = \sqrt{r_к^2 + x_к^2}$ называются параметрами короткого замыкания трансформатора.

17-4. Диаграмма короткого замыкания приведенного трансформатора

Пусть $\Phi_{кm}$ — вектор основного потока при коротком замыкании (рис. 17-2, *а*). Создаваемые этим потоком э. д. с. $E_{1к}$ и $E'_{2к} = E_{1к} = \overline{OF}$ отстают от потока $\Phi_{кm}$ на 90°. К вектору $\dot{E}'_{2к}$ под углом $\psi_{2к} = \operatorname{arctg}\frac{x'_2}{r'_2}$ проводится вектор тока $\dot{I}'_2$. Вектор э. д. с. рассеяния $\dot{E}'_{\sigma 2} = -j\dot{I}'_2x'_2$ отстает от вектора тока $\dot{I}'_2$ на угол 90°; вектор $-\dot{I}'_2r'_2$ находится с вектором тока $\dot{I}'_2$ в противофазе. Складывая геометрически

вторичные э. д. с. $\dot{E}'_{2к} - j\dot{I}'_2x'_2$ и $-\dot{I}'_2r'_2$ соответственно уравнению (17-2), получаем замкнутый на себя прямоугольный треугольник OFD. Но можно пользоваться и уравнением (13-23б), в этом случае мы строим не э. д. с. $-j\dot{I}'_2x'_2$ и $-\dot{I}'_2r'_2$, а равные им по величине, но направленные в обратную сторону векторы активного и индуктивного падения напряжения во вторичной обмотке $j\dot{I}'_2x'_2$ и $\dot{I}'_2r'_2$ (рис. 17-2, *б*).

Согласно уравнению (17-3), вектор тока $\dot{I}_1$ равен по величине вектору тока $\dot{I}'_2$ и находится с ним в противофазе.

Вектор первичного напряжения $\dot{U}_{1к} = \overline{OA}$ проще всего построить соответственно уравнению (17-1) по составляющим напряжения $-\dot{E}_{1к} = \overline{OG}$, $\dot{I}_1r_1 = \overline{GK}$ и $j\dot{I}_1x_1 = KA$. Фаза тока $\dot{I}_1$ относительно напряжения $U_{1к}$ определяется углом $\varphi_к$.

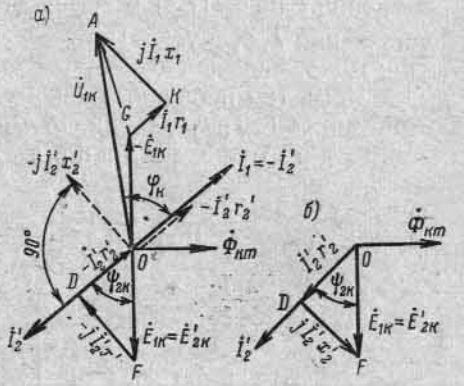


Рис. 17-2. Векторная диаграмма короткого замыкания трансформатора

17-5. Схема замещения трансформатора при коротком замыкании

Решая уравнение (17-4) относительно тока $\dot{I}_1$, получаем:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{1к}}{Z_1 + Z'_2}. \quad (17\text{-}5)$$

Следовательно, схема замещения трансформатора при коротком замыкании представляет собой цепь, к которой приложено напряже-

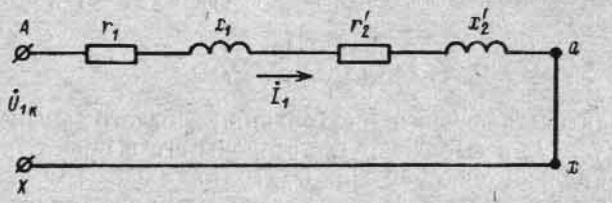


Рис. 17-3. Схема замещения трансформатора при коротком замыкании

ние $U_{1к}$ и которая состоит из последовательно соединенных сопротивлений $r_к = r_1 + r'_2$ и $x_к = x_1 + x'_2$ (рис. 17-3). Эту схему можно получить непосредственно из схемы на рис. 13-3, если исключить намагничивающий контур ($I_0 \approx 0$) и принять, что $Z'_c = 0$.

17-6. Треугольник короткого замыкания трансформатора

Схема замещения на рис. 17-3 позволяет перестроить диаграмму на рис. 17-2 в треугольник короткого замыкания, отличающийся простотой и наглядностью.

Для этого строим вектор тока $\dot{I}_1$ в положительном направлении оси ординат (рис. 17-4) и обычным образом строим векторы падения напряжения $\dot{I}_1 Z_1$ и $\dot{I}_1 Z_2'$. Порядок сложения векторов падений напряжения безразличен. Поэтому мы можем, начиная от точки O, откладывать их в том порядке, в каком это показано на рис. 17-4 сплошными линиями. Треугольник OBA называется треугольником короткого замыкания. Его катеты OB и BA представляют

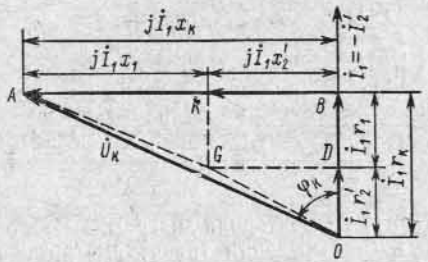


Рис. 17-4. Треугольник короткого замыкания трансформатора

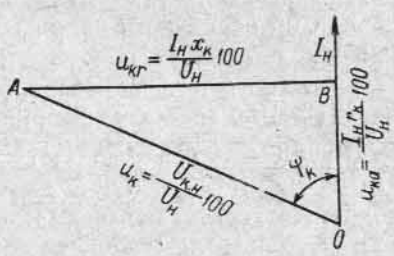


Рис. 17-5. Основной треугольник короткого замыкания трансформатора

собой активную и индуктивную составляющие напряжения $u_к$ и называются активным и индуктивным падением напряжения трансформатора.

Из диаграммы на рис. 17-4 видно, что

$$OB = \dot{I}_1 r_1 + \dot{I}_1 r_2' = \dot{I}_1 r_к; \qquad (17\text{-}6а)$$

$$BA = \dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 x_2' = \dot{I}_1 x_к; \qquad (17\text{-}6б)$$

$$OA = \sqrt{OB^2 + BA^2} = I_1 \sqrt{r_к^2 + x_к^2} = I_1 Z_к \qquad (17\text{-}6в)$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi_к = \frac{BA}{OB} = \frac{x_к}{r_к}. \qquad (17\text{-}7)$$

Для практических целей треугольник короткого замыкания строят для тока $I_1 = I_н$ и выражают все стороны его в процентном отношении от номинального напряжения $U_н$. В этом случае мы можем не придавать им характера векторов и не ставить на них стрелок (рис. 17-5).

Таким образом,

$$OB = u_{ка} = \frac{I_н r_к}{U_н} \cdot 100; \qquad (17\text{-}8а)$$

$$BA = u_{кr} = \frac{I_н x_к}{U_н} \cdot 100; \qquad (17\text{-}8б)$$

$$OA = u_к = \frac{I_н Z_к}{U_н} \cdot 100 = \frac{U_{к.н}}{U_н} \cdot 100. \qquad (17\text{-}8в)$$

Величины $u_{ка}$ и $u_{кr}$ называются активной и реактивной составляющими напряжения короткого замыкания, а треугольник OBA на рис. 17-5 мы будем называть основным треугольником короткого замыкания.

17-7. Потери при коротком замыкании

Так как при коротком замыкании основной поток весьма мал, то потерями в стали сердечника можно пренебречь и считать, что мощность короткого замыкания $P_к$ тратится только на покрытие потерь в меди обмоток $p_{м1}$ и $p_{м2}$, т. е.

$$P_к = p_{м1} + p_{м2}. \qquad (17\text{-}9)$$

Потери в меди состоят из а) основных потерь $p_{м0}$, определяемых сопротивлениями постоянному току обмоток r_{10} и r_{20}, и б) добавочных потерь в меди, обусловленных вихревыми токами, возникающими в обмотке, несовершенством перекрещивания проводов, потерями, вызываемыми потоками рассеяния в стенках бака, и т. д.

Основные потери в меди обмоток составляют главную часть потерь в меди и равны:

$$p_{м0} = I_1^2 r_{10} + I_2^2 r_{20}. \qquad (17\text{-}10)$$

Таблица 17-2

$P_н$, ква	$\frac{P_{к.н}}{P_н} \cdot 100$, %
5—20	3,7—3
30—240	3—2
320—5600	2—1
7500—60000	1—0,4

Вопрос о добавочных потерях в меди относительно сложен и представляет собой специальную проблему. Обычно добавочные потери включаются в основные потери путем увеличения сопротивлений r_{10} и r_{20} до значений $r_1 = r_{10} k_{r1}$ и $r_2 = r_{20} k_{r2}$, где k_{r1} и k_{r2} — коэффициенты добавочных потерь.

Таким образом,

$$P_к = p_{м1} + p_{м2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_1 + I_1^2 r_2' = I_1^2 r_к. \qquad (17\text{-}11)$$

Добавочные потери зависят от типа обмоток — концентрические или чередующиеся, от формы проводника — круглый или прямоугольный, от устройства обмотки и т. д. В нормальных случаях значения коэффициентов k_{r1} и k_{r2} равны 1,05 — 1,15, но в некоторых специальных случаях они могут быть значительно бо́льшими.

Мощность короткого замыкания, так же как и мощность холостого хода, имеет весьма важное эксплуатационное значение. О величине этой мощности можно судить по отношению $\frac{P_{к.н}}{P_н} \cdot 100$, где $P_{к.н}$ — мощность короткого замыкания при $I_1 = I_н$ и температуре обмоток 75° С. Соответствующие значения приводятся в табл. 17-2 по данным ГОСТ для трех- и однофазных двухобмоточных трансформаторов.

Если сопоставить значения мощности холостого хода и короткого замыкания, то для стандартных трансформаторов имеем: $P_0 : P_к = 1 : (2{,}5 \div 4)$. Величина $P_0/P_к$ оказывает большое влияние на форму кривой к. п. д. (см. § 18-9).

17-8. Определение параметров короткого замыкания трансформатора

Для определения параметров короткого замыкания производят испытание трансформатора в режиме короткого замыкания. На рис. 17-6 изображена схема короткого замыкания однофазного трансформатора. Пусть $U_к$, I_1 и $P_к$ — напряжение, ток и мощность короткого замыкания, тогда

$$Z_к = U_к / I_1, \qquad (17\text{-}12а)$$

$$r_к = P_к / I_1^2 \qquad (17\text{-}12б)$$

и

$$x_к = \sqrt{Z_к^2 - r_к^2}. \qquad (17\text{-}13)$$

Зная параметры короткого замыкания, можно определить напряжение $u_к$ и его составляющие $u_{ка}$ и $u_{кr}$, а именно:

$$u_к = \frac{I_н Z_к}{U_н} \cdot 100; \qquad (17\text{-}14а)$$

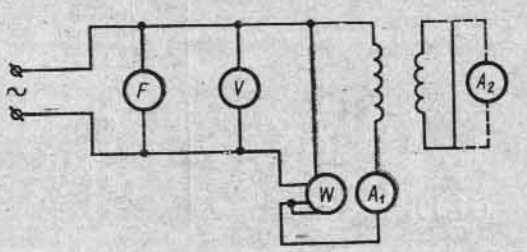


Рис. 17-6. Схема при испытании трансформатора в режиме короткого замыкания

$$u_{ка} = \frac{I_н r_к}{U_н} \cdot 100 = \frac{I_н^2 r_к}{U_н I_н} \times$$

$$\times 100 = \frac{P_{к.\,н}\ [вт]}{10 P_н\ [кв \cdot а]}; \qquad (17\text{-}14б)$$

$$u_{кr} = \frac{I_н x_к}{U_н} \cdot 100 =$$

$$= \sqrt{u_к^2 - u_{ка}^2}. \qquad (17\text{-}14в)$$

Составляющие $u_{ка}$ и $u_{кr}$ зависят главным образом от мощности трансформатора. По мере увеличения последней $u_{ка}$ непрерывно уменьшается, тогда как $u_{кr}$ имеет тенденцию возрастать. Это приводит к тому, что отношение $u_{кr}/u_{ка} = \operatorname{tg} \varphi_к$ относительно быстро растет с увеличением мощности: от 1—2 в трансформаторах мощностью до 50 *кв·а* до 10 в мощных трансформаторах высокого напряжения.

17-9. Короткое замыкание трехфазных трансформаторов

Здесь мы имеем в виду только случай трехфазного, или так называемого симметричного, короткого замыкания, когда замкнуты накоротко все три фазы трансформатора.

Некоторые специальные случаи короткого замыкания — однофазного и двухфазного — рассматриваются ниже в гл. 19.

В противоположность холостому ходу симметричное короткое замыкание трехфазных трансформаторов не имеет особых специфических особенностей по сравнению с коротким замыканием однофазного трансформатора. Это объясняется тем, что при коротком замыкании, в противоположность холостому ходу, сталь не насыщена,

в соответствии с чем токи и мощности распределяются между фазами симметрично и формы кривых э. д. с. не нарушаются.

На этом основании мы можем распространить на случай трехфазного короткого замыкания все, что было сказано выше относительно короткого замыкания однофазного трансформатора. Следует только помнить, что, производя расчеты, мы должны вести их на одну фазу.

17-10. Рассеяние в трансформаторах с концентрическими и чередующимися обмотками

Если н. с. двух обмоток трансформатора находятся в строгом равновесии между собой, т. е. $\dot{I}_1 w_1 = -\dot{I}_2 w_2$, то полный ток $\dot{I}_1 w_1 + (-\dot{I}_2 w_2) = 0$. В этом случае нет потока результирующей н. с., сцепленного с обеими обмотками, а есть только потоки, называемые потоками рассеяния, сцепленные каждый со своей обмоткой. К этим условиям очень близко подходит трансформатор в режиме короткого замыкания (см. рис. 17-1). В общем случае $\dot{I}_1 w_1 = -\dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_0 w_1$ [см. формулу (13-15б)] или $\dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_0 w_1 = (\dot{I}_1 - \dot{I}_0) w_1 = \dot{I}_{\sigma 1} w_1 = -\dot{I}_2 w_2$, т. е. в этом случае потоки рассеяния создаются токами $\dot{I}_{\sigma 1}$ и $\dot{I}_2$.

Такое определение рассеяния может быть легко распространено на многообмоточный трансформатор.

Явление рассеяния определяет ряд основных свойств трансформатора как в стационарном режиме его работы, влияя на изменение вторичного напряжения, условия параллельной работы, добавочные потери в трансформаторе и т. д., так и в режиме внезапного короткого замыкания, определяя величину токов короткого замыкания и связанные с ними эффекты механического и термического характера. Поэтому возможно точное определение индуктивности и э. д. с. рассеяния или соответственно величины напряжения короткого замыкания $u_к$ является одним из основных вопросов теории трансформатора.

Для расчета индуктивности и э. д. с. рассеяния трансформатора необходимо знать пространственное распределение потоков рассеяния в нем. Оно очень сложно даже для сравнительно простых обмоток и зависит от их взаимного расположения и их относительных размеров. Поэтому пользуются методом приведения, состоящим, как мы уже говорили в § 2-4, в том, что действительную сложную картину поля рассеяния заменяют расчетной, которая отличается большей простотой, но дает те же количественные результаты, что и действительная картина.

А. Расчет индуктивности рассеяния концентрических обмоток. Рассмотрим сначала простейший случай, когда первичная и вторичная обмотки представляют собой цилиндры одинаковой высоты с одинаковым распределением н. с. по высоте обмотки, причем $i_1 w_1 = i_2 w_2$. На рис. 17-7, *а* показана действительная картина поля рассеяния для двух концентрических обмоток с большим отношением размеров в осевом и радиальном направлениях (высоты обмотки к ее

ширине). По методу Роговского такую картину заменяют картиной, показанной на рис. 17-7, *б*.

Здесь прежде всего следует обратить внимание на расположение центров O_1 и O_2 первичного и вторичного потоков рассеяния. Если бы каждая из обмоток существовала отдельно от другой и была окружена однородной средой, то центр потока такой обмотки находился бы на пересечении диагоналей изображающего ее прямоугольника. Но в нашем случае вследствие бокового распора трубок центры потоков рассеяния смещаются в противоположные стороны на края

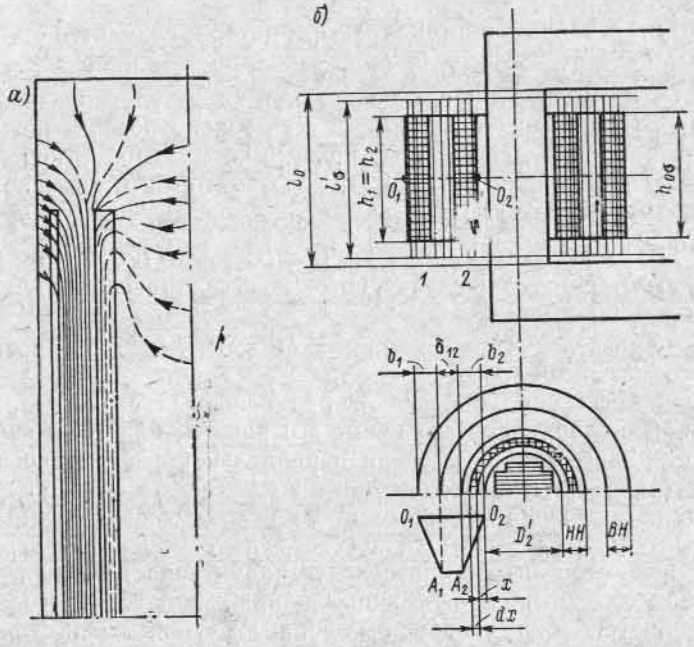


Рис. 17-7. Поле рассеяния трансформатора с концентрической обмоткой: *а* — действительная картина поля; *б* — приведенная

обмоток, продолжая оставаться на средней высоте последних. При этом предполагается, что все трубки потока рассеяния идут параллельно образующим цилиндров и имеют расчетную длину l'_σ. Эта длина вводится в расчет магнитного сопротивления трубки, тогда как сопротивление остальной части трубки принимается равным нулю. Согласно теоретическим исследованиям, можно приближенно считать, что

$$l'_\sigma = \frac{h_{об}}{1 - \frac{b_1 + b_2 + \delta_{12}}{\pi h_{об}}} = \frac{h_{об}}{k_\sigma}. \qquad (17\text{-}15)$$

Здесь $h_{об}$ — высота обмотки; b_1 и b_2 — ширина первичной и вторичной обмоток; δ_{12} — ширина зазора между обмотками и k_σ — коэффициент приведения высоты обмотки к расчетной длине линий поля рассеяния.

Так как ширина обмоток и зазор обычно невелики по сравнению с $h_{об}$, то для обычных концентрических обмоток коэффициент $k_\sigma = 0{,}90 \div 0{,}97$.

Для потока рассеяния, изображенного на рис. 17-7, *б*, можно построить кривую н. с. В центрах O_1 и O_2 н. с. равны нулю; затем н. с. растут пропорционально расстояниям, на которых находятся трубки первичного и вторичного потоков рассеяния от центра O_1 или соответственно O_2. В зазоре δ_{12} между обмотками н. с. не изменяется, причем одну половину зазора мы условно считаем заполненной линиями первичного рассеяния, а другую — вторичного.

Рассчитаем индуктивность рассеяния какой-нибудь одной обмотки, например обмотки *2*, предполагая, что по числу витков она приведена к обмотке *1*. Расчет состоит из расчета индуктивности L'_b по ширине обмотки b_2, где н. с. непрерывно изменяется, и из расчета индуктивности L'_δ по ширине $\delta_{12}/2$, где н. с. остается постоянной. Искомая индуктивность $L'_{\sigma 2} = L'_b + L'_\delta$. Ход расчета носит типичный характер и ведется в следующем порядке: а) выделяем элементарную трубку и определяем ее н. с. и поток при протекании по обмотке тока в 1 *а*, б) определяем число потокосцеплений данной элементарной трубки и в) рассчитываем число потокосцеплений всех элементарных трубок, находящихся в заданных пределах.

Для расчета индуктивности $L'_{об}$ выделим элементарную трубку на расстоянии x от внутренней образующей вторичной обмотки. При $I_2 = 1$ *а* н. с. этой трубки будет

$$F_x = 1 \cdot w_1 \frac{x}{b_2} = w_1 \frac{x}{b_2}.$$

Магнитное сопротивление той же трубки

$$R_{\mu x} = \frac{1}{\mu_0} \frac{l'_\sigma}{\pi (D'_2 + 2x)\, dx},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха (масла) и D'_2 — внутренний диаметр вторичной обмотки.

Следовательно, поток $d\Phi_x$ выделенной нами элементарной трубки и число ее потокосцеплений $d\Psi_x$ будут равны:

$$d\Phi_x = \frac{F_x}{R_{\mu x}} = \mu_0 w_1 \frac{x}{b_2} \frac{\pi (D'_2 + 2x)\, dx}{l'_\sigma}$$

$$d\Psi_x = d\Phi_x \left(w_1 \frac{x}{b_2}\right) = \mu_0 \left(w_1 \frac{x}{b_2}\right)^2 \frac{\pi (D'_2 + 2x)\, dx}{l'_\sigma}.$$

Число потокосцеплений по ширине обмотки b_2 при токе 1 a, т. е. индуктивность обмотки, будет

$$L'_b = \int_0^{b_2} d\Psi_x = \mu_0 \frac{w_1^2}{l'_\sigma}\left[\pi \frac{b_2}{3}\left(D'_2 + \frac{3}{2}b_2\right)\right].$$

Второе слагаемое, соответствующее ширине зазора $\delta_{12}2$, определяется аналогично первому с той только разницей, что трубка, находящаяся в зазоре, создается всей н. с. вторичной обмотки и сцепляется со всеми витками последней. Поэтому число потокосцеплений по ширине $\delta_{12}/2$ будет

$$L'_\delta = \int_0^{\frac{\delta_{12}}{2}} d\Phi_x w_1 = \int_0^{\frac{\delta_{12}}{2}} \mu_0 w_1^2 \frac{\pi\left(D'_2 + 2b_2 + 2y\right)}{l'_\sigma} dy =$$

$$= \mu_0 \frac{w_1^2}{l'_\sigma} \pi \frac{\delta_{12}}{2}\left(D'_2 + 2b_2 + \frac{\delta_{12}}{2}\right).$$

С достаточным приближением можно считать, что суммы $D'_2 + \frac{3}{2}b_2$ и $D'_2 + 2b_2 + \frac{\delta_{12}}{2}$ представляют собой каждая средний диаметр $D_{2\,ср}$ вторичной обмотки. Тогда индуктивность вторичной обмотки будет

$$L'_{\sigma 2} = \mu_0 \frac{w_1^2}{l'_\sigma} \pi D_{2\,ср}\left(\frac{b_2}{3} + \frac{\delta_{12}}{2}\right) = \mu_0 w_1^2 \frac{C_{2\,ср}}{l'_\sigma}\left(\frac{b_2}{3} + \frac{\delta_{12}}{2}\right),$$

где $C_{2\,ср} = \pi D_{2\,ср}$ — средняя длина витка вторичной обмотки.

Если проделать те же расчеты для первичной обмотки, то получим:

$$L_{\sigma 1} = \mu_0 w_1^2 \frac{C_{1\,ср}}{l'_\sigma}\left(\frac{b_1}{3} + \frac{\delta_{12}}{2}\right),$$

где $C_{1\,ср} = \pi D_{1\,ср}$ — средняя длина витка первичной обмотки.

Следовательно, индуктивность рассеяния обеих обмоток будет

$$L_\sigma = L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2} = \mu_0 w_1^2 \frac{C_{ср}}{l'_\sigma}\left(\delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3}\right) = \mu_0 w_1^2 \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}} \delta'. \quad (17\text{-}16)$$

Здесь $C_{ср} = \frac{C_{1\,ср} + C_{ср}}{2}$ представляет собой среднюю длину витка обеих обмоток, а $\delta' = \delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3}$ — так называемую приведенную ширину зазора между обмотками.

Так как $x_к = x_1 + x'_2 = 2\pi f\left(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2}\right) = 2\pi f L_\sigma$, то индуктивное сопротивление трансформатора

$$x_к = 2\pi \mu_0 f w_1^2 \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}} \delta'. \quad (17\text{-}17)$$

Соответственно индуктивная составляющая напряжения короткого замыкания [см. формулу (17-8б)]:

$$u_{кr} = \frac{I_н x_к}{U_н} \cdot 100 = \mu_0 \cdot 2\pi f I_н \frac{w_1^2}{U_н} \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}} \delta' \cdot 10^2 =$$

$$= \mu_0 \cdot 2\pi f \left(U_н I_н\right) \frac{I}{U_н^2 / w_1^2} \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}} \delta' \cdot 10^2 =$$

$$= \mu_0 \cdot 2\pi f \frac{P_н k_{ст}}{E_{вт}^2} \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}} \delta' \cdot 10^2. \quad (17\text{-}18)$$

Здесь $P_н$ — номинальная мощность трансформатора, выраженная в $в \cdot а$; $E_{вт}$ — э. д. с. на виток; $k_{ст}$ — коэффициент, показывающий, какая часть номинальной мощности приходится на один стержень: в однофазных трансформаторах, в которых обмотка располагается обычно на двух стержнях (см. рис. 12-4, $а$), $k_{ст} = 1/2$, в трехфазных трансформаторах, где фазная обмотка расположена обычно на какомнибудь одном стержне, $k_{ст} = 1/3$.

Обычно мощность $P_н$ выражают в $кв \cdot а$ и размеры — в $см$. Так как, кроме того, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, то

$$u_{кr} = 0{,}79 f \frac{P_н k_{ст}}{E_{вт}^2} \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}} \delta' \cdot 10^{-2}. \quad (17\text{-}19)$$

Формула (17-19) имеет весьма важное значение, так как она связывает с величиной $u_{кr}$ ряд величин, определяющих в основном конструкцию трансформатора.

Б. Расчет индуктивности рассеяния чередующихся обмоток. Все изложенное выше о расчете $u_{кr}$ концентрических обмоток может быть с соответствующими изменениями применено и для расчета $u_{кr}$ обмоток чередующихся.

В схематическом виде чередующаяся обмотка показана на рис. 17-8, $а$. Обмотки ВН и НН состоят из одинакового числа катушек, но одна из катушек обмотки НН разделена на две полукатушки, расположенные в верхней и нижней частях обмотки. Центры, вокруг которых образуются линии потока рассеяния, показаны жирными точками. Такая действительная картина потока рассеяния заменена приведенной (рис. 17-8, $б$), в которой все линии потока, показанные штриховыми линиями, идут перпендикулярно оси стержня (сравнить с картиной потока на рис. 17-7, $б$) и имеют расчетную длину l'_σ. Кривая распределения н. с. рассматриваемой обмотки дана на рис. 17-8, $в$. Так как кривая н. с. располагается симметрично относительно оси ординат, то чередующаяся обмотка на рис. 17-8, $а$ называется симметричной. Мы видим, что всю обмотку можно разделить на n последовательно соединенных групп, состоящих каждая из двух полукатушек обмоток ВН и НН. Кривая н. с. каждой группы повторяет собой кривую н. с. концентрической обмотки на рис. 17-7, $б$. Поэтому при определении индуктивности чередующейся обмотки можно исходить из тех же формул (17-16) и (17-17), которые были выведены

для концентрической обмотки, при условии, что чередующуюся обмотку мы рассматриваем как обмотку, состоящую из n последовательно соединенных групп с числом витков w_1/n в каждой. В этом случае соответственно формуле (17-18) имеем:

$$L_\sigma = \mu_0 \left(\frac{w_1}{n}\right)^2 n \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}} \delta'. \qquad (17\text{-}20)$$

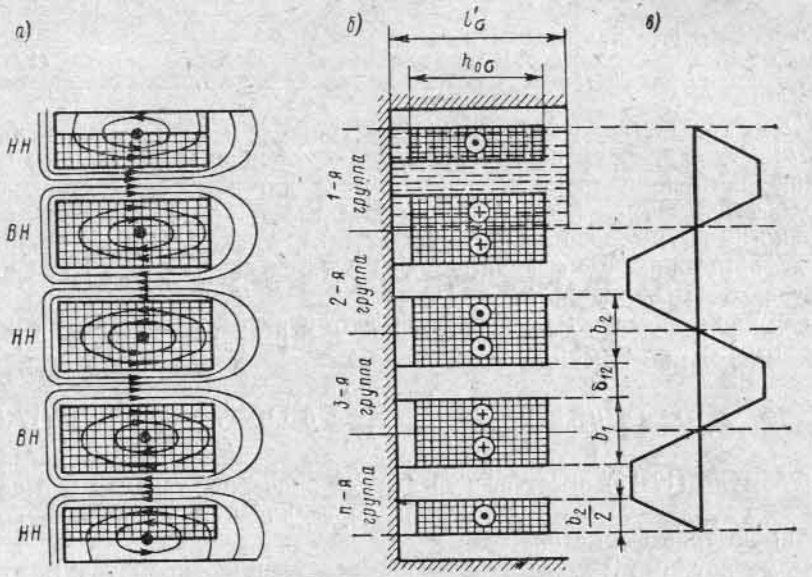


Рис. 17-8. Поле рассеяния и н. с. трансформатора с чередующейся обмоткой

Следовательно,

$$u_{кr} = 0{,}79 f \frac{P_н k_{ст}}{E_{вт}^2} \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об} n} \delta' \cdot 10^{-2}. \qquad (17\text{-}21)$$

Для чередующихся обмоток коэффициент $k_\sigma = 1 - \frac{b_1 + b_2 + \delta_{12}}{\pi h_{об}}$ обычно находится в пределах 0,65 — 0,80.

17-11. Численный пример

Определить параметры и составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора ТМ-5600/35, основные данные которого приведены в § 16-6.

Дополнительные данные: $u_к = 7{,}5\%$, $P_к = 57$ *квт*.

Расчет ведется на фазу. Фазное напряжение короткого замыкания со стороны обмотки ВН

$$U_{1кф} = U_{1ф} u_к = 20\,200 \cdot 0{,}075 = 1515 \text{ в}.$$

Мощность потерь короткого замыкания на фазу

$$P_{к.ф} = \frac{P_к}{m} = \frac{57\,000}{3} = 19\,000 \text{ вт}.$$

Параметры короткого замыкания:

$$Z_к = \frac{U_{1\,к.ф}}{I_{1ф}} = \frac{1515}{92{,}5} = 16{,}4 \text{ ом}; \quad r_к = \frac{P_{к.ф}}{I_{1ф}^2} = \frac{19\,000}{92{,}5^2} = 1{,}8 \text{ ом};$$

$$x_к = \sqrt{Z_к^2 - r_к^2} = \sqrt{16{,}4^2 - 1{,}8^2} = 16{,}3 \text{ ом}.$$

Согласно формулам (17-14б) и (17-14в),

$$u_{ка} = \frac{I_{1ф} r_к}{U_{1ф}} \cdot 100 = \frac{92{,}5 \cdot 1{,}8}{20\,200} \cdot 100 = 0{,}825\%;$$

$$u_{кr} = \frac{I_{1ф} x_к}{U_{1ф}} \cdot 100 = \frac{92{,}5 \cdot 16{,}3}{20\,200} \cdot 100 = 7{,}45\%.$$

Глава восемнадцатая

РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОД НАГРУЗКОЙ

18-1. Предварительные замечания

Основная задача данной главы состоит в том, чтобы а) показать применимость метода наложения, согласно которому любой нагрузочный режим трансформатора может быть получен путем взаимного наложения режимов холостого хода и короткого замыкания, и б) дать способы расчета изменения вторичного напряжения и к. п. д. трансформатора с помощью соответственно упрощенных схем замещения трансформатора.

18-2. Работа под нагрузкой простейшего трансформатора

Принципиальная схема однофазного трансформатора, работающего на некоторую нагрузку, показана на рис. 18-1. Выясним сначала условия работы простейшего трансформатора, предполагая, что вторичная обмотка приведена к первичной. Так как в простейшем трансформаторе мы пренебрегаем падениями напряжения, то в нем всегда, независимо от нагрузки, имеем $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$ (рис. 18-2). Считая напряжение $\dot{U}_1$ постоянным, мы будем иметь при всех нагрузках одно и то же значение обратной э. д. с. $\dot{E}_1$. В соответствии с этим основной поток Φ_m, ток $\dot{I}_0$ и н. с. $F_0 = \dot{I}_0 w_1$ тоже не зависят от нагрузки, т. е. сохраняют одно и то же значение при любом режиме работы трансформатора.

Если мы будем нагружать трансформатор, то из уравнения н. с. [см. формулу (13-32б)] имеем:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'), \qquad (18\text{-}1)$$

т. е.

при нагрузке трансформатора ток $\dot{I}_1$ первичной обмотки представляет собой геометрическую сумму двух составляющих, а именно постоянного по величине намагничивающего тока $\dot{I}_0$, создающего основной поток Φ_m, и нагрузочного тока $(-\dot{I}_2')$, н. с. которого уравновешивает н. с., создаваемую током $\dot{I}_2'$ вторичной обмотки.

Рис. 18-2 показывает, как изменяется ток $\dot{I}_1$ при изменении тока $\dot{I}_2'$ (угол φ_2 предполагается заданным).

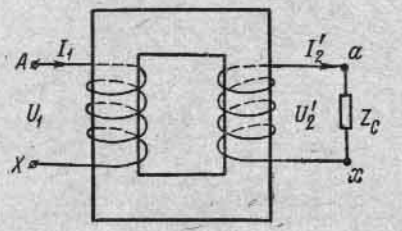


Рис. 18-1. Принципиальная схема работы трансформатора под нагрузкой

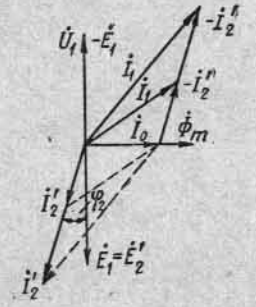


Рис. 18-2. Диаграмма токов простейшего трансформатора

18-3. Работа под нагрузкой действительного трансформатора

Анализ работы действительного трансформатора основывается, так же как и раньше, на уравнениях э. д. с. и н. с. Здесь и в дальнейшем будем считать параметры вторичной цепи трансформатора приведенными к первичной цепи. Тогда [см. формулы (13-33), (13-34) и (13-32)]:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \qquad (18\text{-}2)$$

$$\dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' = \dot{U}_2' \qquad (18\text{-}3)$$

или

$$\dot{E}_2' = \dot{U}_2' + \dot{I}_2' Z_2' \qquad (18\text{-}4)$$

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' + \dot{I}_0. \qquad (18\text{-}5)$$

Соответственно этим уравнениям строим векторные диаграммы трансформатора при его работе под нагрузкой.

На рис. 18-3, *а* построена диаграмма при преобладании индуктивной нагрузки. Вектор основного потока Φ_m проводим в положительном направлении оси абсцисс; для создания этого потока необходим намагничивающий ток $\dot{I}_0$, вектор которого несколько опережает вектор потока Φ_m (см. рис. 14-5). Создаваемые потоком Φ_m э. д. с. E_1 и $\dot{E}_2' = \dot{E}_1$ отстают от него на 90°. Ток $\dot{I}_2'$ отстает от э. д. с. $\dot{E}_2'$ на угол ψ_2, определяемый как родом внешней нагрузки, так и собственными сопротивлениями вторичной обмотки. Согласно уравнению н. с. (18-5), ток $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' + \dot{I}_0$.

Чтобы построить вектор вторичного напряжения $\dot{U}_2' = \overline{OC}$, можно воспользоваться уравнением э. д. с. (18-3). В этом случае нужно геометрически сложить э. д. с. $\dot{E}_2' = \overline{OF}$, э. д. с. рассеяния $\dot{E}_{\sigma 2}' = -j\dot{I}_2' x_2' = \overline{FD}$ и условную «э. д. с.» $-\dot{I}_2' r_2' = \overline{DC}$ (рис. 18-3, *а*).

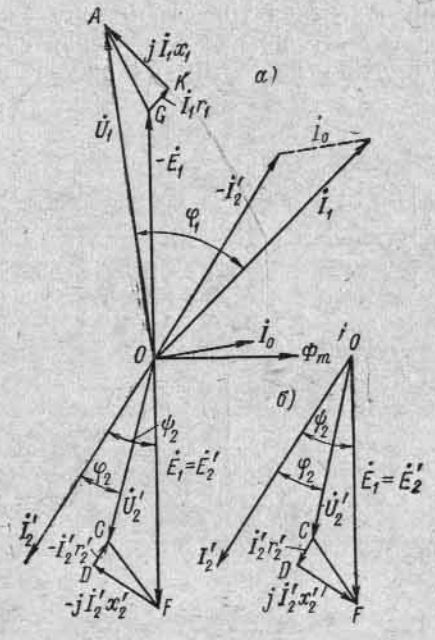


Рис. 18-3. Векторная диаграмма трансформатора при индуктивной нагрузке

Рис. 18-4. Векторная диаграмма трансформатора при емкостной нагрузке

Можно, с другой стороны, воспользоваться уравнением (18-4) для определения э. д. с. $\dot{E}_2'$; в этом случае геометрически складываются напряжение $\dot{U}_2' = \overline{OC}$ и падения напряжения вторичной обмотки $\dot{I}_2' r_2' = \overline{CD}$ и $j\dot{I}_2' x_2' = \overline{DF}$ (рис. 18-3, *б*).

Угол φ_2 между векторами $\dot{U}_2'$ и $\dot{I}_2'$ определяется родом внешней нагрузки трансформатора.

Вектор первичного напряжения $\dot{U}_1 = \overline{OA}$ строится, согласно уравнению (18-2), по трем составляющим напряжения: $-\dot{E}_1 = \overline{OG}$, $\dot{I}_1 r_1 = \overline{GK}$ и $j\dot{I}_1 x_1 = \overline{KA}$, каждая из которых находится в равновесии с соответствующей э. д. с. (рис. 18-3, *а*).

Угол φ_1 между векторами $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$ определяет подводимую к трансформатору из первичной сети активную мощность $U_1 I_1 \cos\varphi_1$.

Векторная диаграмма трансформатора при емкостной нагрузке построена на рис. 18-4 без специальных пояснений, так как приемы ее построения те же, что и раньше.

18-4. Векторные диаграммы замещенного трансформатора

На рис. 13-3 изображена эквивалентная трансформатору схема, между элементами которой существует только электрическая связь. В сокращенном виде схема замещения повторена на рис. 18-5, *а*.

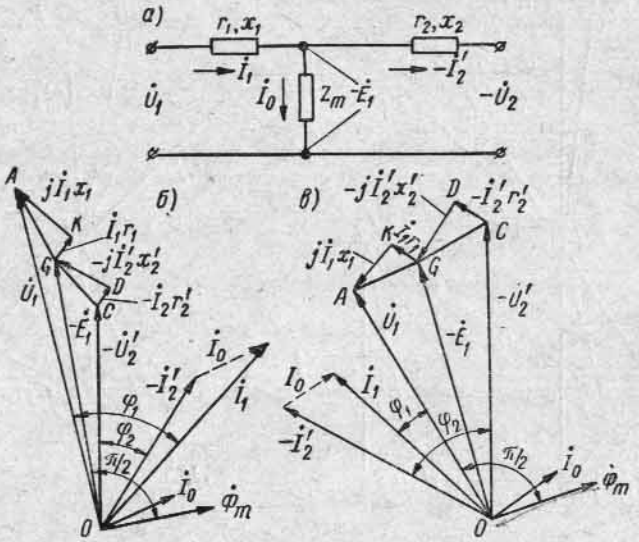


Рис. 18-5. Схема замещения трансформатора (*а*) и векторные диаграммы при индуктивной (*б*) и емкостной (*в*) нагрузках

Соответственно этой схеме строятся векторные диаграммы на рис. 18-5, *б*, *в*. При построении будем считать заданным вторичное напряжение $\dot{U}_2$, вторичный ток $\dot{I}_2$ и коэффициент мощности $\cos\varphi_2$ вторичной сети.

Вектор вторичного напряжения $-\dot{U}_2' = \overline{OC}$ совмещаем с положительным направлением оси ординат. Вектор вторичного тока отстает от вектора напряжения $-\dot{U}_2'$ или опережает его на угол φ_2. Сложив геометрически напряжения $-\dot{U}_2'$ и падения напряжения во вторичной обмотке $-\dot{I}_2'(r_2' + jx_2')$, находим вектор составляющей первичного напряжения $-\dot{E}_1 = \overline{OG}$; вектор основного потока Φ_m отстает от $-\dot{E}_1$ на 90°, а вектор намагничивающего тока $\dot{I}_0$ несколько

опережает вектор потока Φ_m. Вектор первичного тока $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' + \dot{I}_0$. Чтобы построить вектор первичного напряжения $\dot{U}_1 = \overline{OA}$, нужно сложить составляющие этого напряжения — $\dot{E}_1$ и $\dot{I}_1(r_1 + jx_1)$.

Т-образная схема замещения на рис. 18-5, *а* является весьма удобной при изучении работы трансформаторов. Она остается справедливой как при передаче энергии из первичной цепи во вторичную, так и при обратном направлении передачи энергии — из вторичной цепи в первичную. Рассмотрение часто проводится в предположении $\dot{E}_1 = \text{const}$. При индуктивной нагрузке в этом случае получается некоторое повышение напряжения на первичных зажимах и понижение его на вторичных (рис. 18-5, *б*). При емкостной нагрузке трансформатора, наоборот, понижение напряжения получается на первичных зажимах и повышение напряжения на вторичных (рис. 18-5, *в*).

18-5. Упрощенные векторные диаграммы трансформатора

Диаграммы на рис. 18-5, *б* и *в* имеют в основном теоретическое значение главным образом потому, что x_1 и x_2' не могут быть определены порознь, а также и потому, что треугольники AKG и GDC первичного и вторичного падений напряжения ориентированы на диаграммах различно.

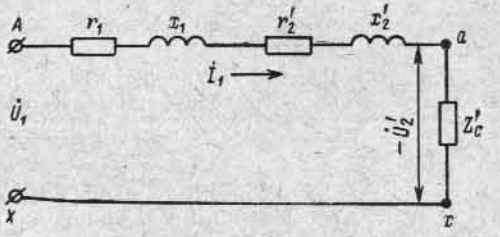


Рис. 18-6. Упрощенная схема замещения трансформатора

Чтобы упростить диаграмму и придать ей практическое значение, в силовых трансформаторах, работающих в режимах, близких к номинальной нагрузке, пренебрегают током $\dot{I}_0$, т. е. считают, что $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2'$. В современных трансформаторах ток $\frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_н} \times 100 = 3 \div 8\%$. Само по себе это значение довольно велико, но так как токи $\dot{I}_0$ и $-\dot{I}_2'$ суммируются геометрически, то ошибка значительно уменьшается. Кроме того, она возникает только в отношении первичного падения напряжения, которое в пределах нормальных нагрузок является величиной второго порядка по сравнению с напряжением $\dot{U}_1$ (3—5% от последнего).

При сделанном допущении схема замещения трансформатора приобретает вид, показанный на рис. 18-6. Схема представляет собой простейшую цепь, состоящую из последовательно соединенных сопротивлений: $Z_1 = r_1 + jx_1$, $Z_2' = r_2' + jx_2'$ и $Z_c' = r_c' + jx_c'$. Соответственно такой упрощенной схеме замещения на рис. 18-7, *а* и *б* построены упрощенные векторные диаграммы для индуктивной и емкостной нагрузок. Вектор тока $\dot{I}_1$ проведен в положительном направлении оси ординат. Векторы падений напряжения $\dot{I}_1 r_2'$, $j\dot{I}_1 x_2'$, $\dot{I}_1 r_1$

и $j\dot{I}_1x_1$ образуют прямоугольные треугольники CDG и GKA с параллельными катетами и могут складываться в той последовательности, как это показано на рисунке жирными линиями. Из диаграммы следует, что вектор $\overline{CB} = \dot{I}_1(r_1 + r_2) = \dot{I}_1 r_к$, а вектор $\overline{BA} = j\dot{I}_1(x_1 + x_2) = j\dot{I}_1 x_к$. Таким образом, треугольник ABC представляет собой треугольник короткого замыкания (см. рис. 17-4), одна сторона которого, совпадающая по фазе с током $\dot{I}_1$, определяет активное падение напряжения в трансформаторе, а другая, опережающая ток $\dot{I}_1$ на 90°,— индуктивное падение напряжения в нем. Если считать заданными напряжение $\dot{U}_1$, ток $\dot{I}_1$ и род нагрузки, т. е. угол φ_2, то из диаграмм видно, что вторичное напряжение получается путем при-

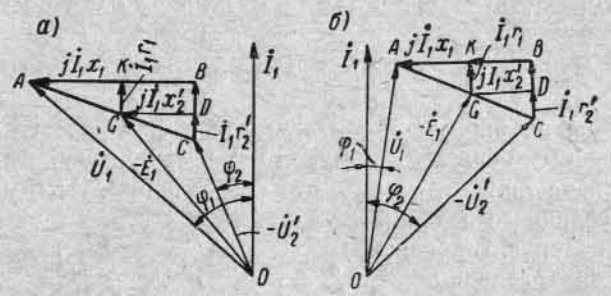


Рис. 18-7. Упрощенные векторные диаграммы замещенного трансформатора: *а* — при индуктивной нагрузке; *б* — при емкостной нагрузке

стройки к вектору напряжения $\dot{U}_1$ треугольника короткого замыкания ABC так, чтобы вершина C треугольника лежала на луче, проведенном из точки O под углом φ_2 к оси ординат. Следовательно, вторичное напряжение $-\dot{U}_2' = \overline{OC}$ мы можем рассматривать как результат наложения на режим холостого хода, определяемый вектором $\overline{OA}$, режима короткого замыкания, определяемого треугольником короткого замыкания ABC.

18-6. Зависимость приведенного вторичного напряжения от cos φ_2 нагрузки

Геометрическое построение вектора $\overline{OC} = -\dot{U}_2'$ проще всего провести следующим образом. Треугольник ABC сносим параллельно самому себе так, чтобы он занял положение треугольника $OB'C'$ (рис. 18-8). Из точки O проводим луч под углом φ_2 к оси ординат и из центра C' делаем на нем засечку радиусом $C'C = U_1$. Тогда вектор $\overline{CO} = -\dot{U}_2'$.

Если напряжение $\dot{U}_1$ и ток $\dot{I}_1$ заданы и остаются постоянными, а род нагрузки, т. е. угол φ_2, изменяется, то изменение напряжения $\dot{U}_2'$ определяется следующим образом. Описываем из точки O, как из

центра, окружность радиусом $OA = \dot{U}_1$, которая представляет собой геометрическое место концов вектора первичного напряжения. Затем из точки C', как из центра, описываем другую окружность радиусом, равным тоже $\dot{U}_1$. Из сказанного выше следует, что эта вторая окружность представляет собой геометрическое место концов вектора вторичного напряжения.

На рис. 18-8 определены напряжения $\dot{U}_2'$ для различных углов φ_2. Диаграмма хорошо иллюстрирует влияние рода нагрузки на величину вторичного напряжения. Мы видим, что при значительном преобладании емкостной нагрузки вторичное напряжение U_2' может стать даже больше первичного напряжения $\dot{U}_1$.

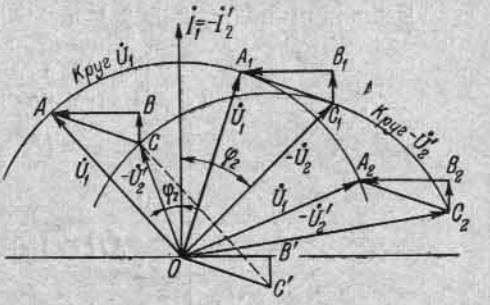


Рис. 18-8. Диаграмма $U_2 = f_1(\cos\varphi_2)$

18-7. Определение изменения вторичного напряжения

Согласно ГОСТ, «Изменением напряжения двухобмоточного трансформатора при заданном коэффициенте мощности называется выраженная в процентах от номинального вторичного напряжения а р и ф м е т и ч е с к а я р а з н о с т ь между номинальным вторичным напряжением (при соответствующем ему положении переключателя) на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе и напряжением, получающимся на тех же зажимах при номинальном вторичном токе, номинальной частоте и номинальном первичном напряжении (при соответствующем ему положении переключателя) на зажимах первичной обмотки». При этом изменение напряжения приводится к условной температуре 75° С.

Таким образом,

$$\Delta U = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100 = \frac{U_{2н}' - U_2'}{U_{2н}'} \cdot 100 = \frac{U_1 - U_2'}{U_1} \cdot 100. \qquad (18\text{-}6)$$

Для определения ΔU мы не можем использовать векторную диаграмму на рис. 18-7 в ее непосредственном виде, так как треугольник ABC в действительности весьма невелик, а это, с одной стороны, затрудняет построение и, с другой стороны, может заметно понизить точность результата. Поэтому диаграмму на рис. 18-7 используют для определения ΔU аналитическим путем.

Условимся определять ΔU при номинальном токе $I_н$. В этом случае вектор $\overline{OA}$ напряжения $\dot{U}_1$ можно принять за 100 условных единиц (рис. 18-9), а стороны треугольника короткого замыкания ABC будут $u_к$, $u_{ка}$ и $u_{кр}$. Поскольку речь идет об определении арифметической разности, стрелок на сторонах треугольника ABC мы не ставим.

Согласно формуле (18-6), имеем:

$$\Delta U = \frac{100 - \dot{U}_2'}{100} \cdot 100 = 100 - \dot{U}_2'.$$

Опустим из точки A перпендикуляр AP на продолжение вектора $\dot{U}_2'$. Пусть отрезки CP и PA составляют $m_к$ и $n_к$ условных единиц. Тогда

$$\dot{U}_2' = \sqrt{100^2 - n_к^2} - m_к = 100\sqrt{1 - \left(\frac{n_к}{100}\right)^2} - m_к.$$

Разложим подкоренное выражение в биномиальный ряд и пренебрежем всеми членами выше второго порядка, так как они по сравнению с двумя первыми исчезающе малы. В этом случае

$$\dot{U}_2' = 100\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{n_к}{100}\right)^2\right] - m_к$$

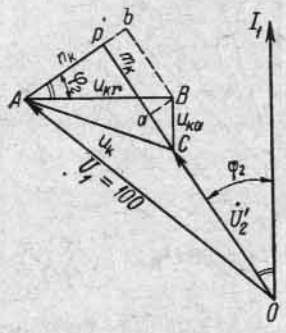


Рис. 18-9. Определение ΔU

и

$$\Delta U = 100 - \dot{U}_2' = 100 - 100 + \frac{n_к^2}{200} + m_к = m_к + \frac{n_к^2}{200}.$$

Чтобы выразить $m_к$ и $n_к$ в зависимости от $u_{ка}$ и $u_{кr}$, опустим перпендикуляр Ba из точки B на отрезок CP и перпендикуляр Bb на продолжение отрезка AP. Тогда

$$m_к = CP = Ca + aP = u_{ка}\cos\varphi_2 + u_{кr}\sin\varphi_2$$

и

$$n_к = AP = Ab - bP = u_{кr}\cos\varphi_2 - u_{ка}\sin\varphi_2.$$

Следовательно,

$$\Delta U = u_{ка}\cos\varphi_2 + u_{кr}\sin\varphi_2 + \frac{(u_{кr}\cos\varphi_2 - u_{ка}\sin\varphi_2)^2}{200}. \qquad (18\text{-}7)$$

Обычно последнее слагаемое в этой формуле невелико. Поэтому там, где нет нужды в особой точности, принимают, что

$$\Delta U = u_{ка}\cos\varphi_2 + u_{кr}\sin\varphi_2. \qquad (18\text{-}8)$$

Мы определили ΔU для номинальной нагрузки. Для какой-нибудь другой нагрузки, определяемой коэффициентом нагрузки $k_{нг} = P_2/P_н$, падение напряжения изменяется практически пропорционально $k_{нг}$ [см. формулу (18-8)].

Из сказанного следует, что при заданных параметрах короткого замыкания падение напряжения зависит от величины и рода нагрузки.

18-8. Численный пример

Для трансформатора, данные которого приведены в § 16-6 и 17-10, определить изменение напряжения ΔU при номинальной нагрузке и $\cos\varphi = 0{,}8$: а) отстающем, б) опережающем.

В § 17-10 было найдено: $u_{ка} = 0{,}825\%$ и $u_{кr} = 7{,}45\%$.

а) При отстающем $\cos\varphi_2 = 0{,}8$, $\sin\varphi_2 = 0{,}6$, согласно (18-7),

$$\Delta U = u_{ка}\cos\varphi_2 + u_{кr}\sin\varphi_2 + \frac{(u_{кr}\cos\varphi_2 - u_{ка}\sin\varphi_2)^2}{200} =$$

$$= 0{,}825\cdot 0{,}8 + 7{,}45\cdot 0{,}6 + \frac{(7{,}45\cdot 0{,}8 - 0{,}825\cdot 0{,}6)^2}{200} = 5{,}16\%.$$

По упрощенной формуле (18-8) получаем $\Delta U = 5{,}13\%$, т. е. ошибка меньше одного %.

б) При опережающем $\cos\varphi_2 = 0{,}8$, $\sin\varphi_2 = -0{,}6$

$$\Delta U = 0{,}825\cdot 0{,}8 - 7{,}45\cdot 0{,}6 + \frac{(7{,}45\cdot 0{,}8 + 0{,}825\cdot 0{,}6)^2}{200} = -3{,}78\%.$$

По упрощенной формуле (18-8) получили бы $\Delta U = -3{,}81\%$.

18-9. Внешняя характеристика трансформатора

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi_2 = \text{const}$ (рис. 18-10). При $I_2 = I_{2н}$, $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ и значениях $u_к = 5{,}5 \div 10{,}5\%$ падение напряжения $\Delta U = 5 \div 8\%$.

18-10. Коэффициент полезного действия (к. п. д.) трансформатора

Под к. п. д. η трансформатора, так же как и всякой другой электрической машины, мы понимаем отношение отдаваемой трансформатором мощности P_2, выраженной в единицах активной мощности, т. е. в киловаттах или ваттах, к подведенной мощности P_1, выраженной в тех же единицах, что P_2. Таким образом,

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}\cdot 100\%. \qquad (18\text{-}9)$$

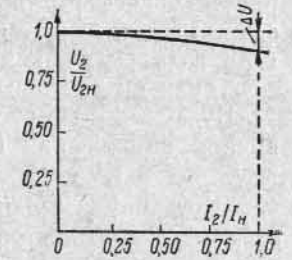


Рис. 18-10. Внешняя характеристика трансформатора

Так как к. п. д. силового трансформатора весьма высок (в трансформаторах большой мощности выше 99%), то метод прямого определения к. п. д. путем непосредственного измерения мощностей P_1 и P_2 не может найти себе применения, поскольку неизбежные погрешности при измерении мощностей P_1 и P_2 могут дать грубую ошибку в определении к. п. д.

В этом отношении несомненное преимущество имеют методы косвенного определения к. п. д., когда та или иная мощность выражается через другую и потери.

Пусть $p_с$ — потери в стали трансформатора и $p_м$ — потери в меди обмоток. Тогда

$$P_1 = P_2 + p_с + p_м$$

и

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + p_с + p_м}\cdot 100\% = \left(1 - \frac{p_с + p_м}{P_2 + p_с + p_м}\right)\cdot 100\%. \qquad (18\text{-}10)$$

При определении всех этих величин мы делаем ряд упрощающих предположений, неизбежно приводящих к некоторым погрешностям, но а) упрощающих определение к. п. д. и б) дающих вполне удовлетворительные конечные результаты, так как допускаемые ошибки сами по себе невелики, относятся к величинам второго порядка и частью взаимно компенсируются.

Мощность P_2 в формуле (18-10) мы будем называть расчетной мощностью трансформатора. Она определяется по формуле

$$P_2 = k_{нг} P_н \cos \varphi_2, \qquad (18\text{-}11)$$

где $k_{нг}$ — коэффициент нагрузки трансформатора.

Расчетная мощность имеет условный характер и не совпадает с той действительной мощностью, которую трансформатор отдает при работе. Напомним (см. § 12-4), что номинальным вторичным напряжением трансформатора называется напряжение при холостом ходе, т. е. $U_{2н} = U_{20}$. Следовательно, номинальная мощность трансформатора на стороне вторичной обмотки составляет $U_{20} I_{2н}$. Действительная мощность, отдаваемая трансформатором при токе $I_{2н}$, составляет $P_2 \sim U_2 I_{2н}$, где U_2 — действительное вторичное напряжение при работе трансформатора. Следовательно, расчетная мощность трансформатора отличается от действительной отдаваемой им мощности в той же мере, в какой напряжение U_{20} отличается от напряжения U_2.

Такой же условный характер носит определение $p_с$ и $p_м$.

Будем считать, что трансформатор работает при номинальном первичном напряжении $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ и номинальной частоте $f = f_н = \text{const}$.

Выше [см. формулу (14-14)] мы видели, что при холостом ходе $p_с \approx P_0$. С другой стороны, при заданной частоте f потери $p_с \sim B^2 \sim E_1^2$. Но $\dot{E}_1 = -(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1)$. Следовательно, изменение э. д. с. $\dot{E}_1$ зависит от падения напряжения в первичной обмотке трансформатора: при индуктивной нагрузке э. д. с. $\dot{E}_1$ с увеличением нагрузки уменьшается, а при емкостной может увеличиться (см. рис. 18-8). Следовательно, при индуктивной нагрузке трансформатора потери в стали будут меньше по сравнению с потерями при холостом ходе, а при емкостной нагрузке могут быть больше. Обычно, если изменение нагрузки происходит в нормальных пределах, изменение э. д. с. не превышает 1,5 — 4%. Следовательно, потери в стали изменяются на 3—8%. Таким изменением можно практически пренебречь и считать, что при указанных нами условиях работы трансформатора потери в его стали не зависят от нагрузки, т. е.

$$p_с = P_0 = \text{const}. \qquad (18\text{-}12)$$

Значения мощности P_0 для силовых масляных трансформаторов при номинальном напряжении и номинальной частоте приводятся в соответствующих ГОСТ.

Равным образом мощность короткого замыкания $P_к$ не совсем точно определяет те потери в меди обмоток, которые имеют место при работе трансформатора под нагрузкой. В самом деле, если мы, поддерживая постоянным вторичный ток, перейдем от режима короткого замыкания

к работе под нагрузкой, то первичный ток изменится, так как $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' + \dot{I}_0$. При индуктивной нагрузке ток $\dot{I}_1$ при таком переходе возрастает, и соответственно увеличиваются потери в меди первичной обмотки, а при емкостной нагрузке имеет место обратное явление (см. рис. 18-5, *а*, *б*). Таким образом, пренебрегая током $\dot{I}_0$, мы преуменьшаем действительные потери в меди при индуктивной нагрузке трансформатора и преувеличиваем эти потери для емкостной нагрузки. Однако, так как влияние тока $\dot{I}_0$ весьма невелико, то и это третье допущение, подобно двум первым, почти не влияет на к. п. д. трансформатора, тем более, что оно частично компенсирует ошибку, допускаемую при определении потерь в стали.

Значения мощности короткого замыкания $P_к$ при номинальных токах в обмотках и $t = 75°$ С приводятся в ГОСТ.

Если нагрузка составляет $k_{нг}$-ю часть от номинальной, то считается, что в такой же степени изменяются токи в обмотках трансформатора. При этом поправка на изменение температуры обмоток не вводится. В этом случае

$$p_м = k_{нг}^2 P_к. \qquad (18\text{-}13)$$

Тогда к. п. д. трансформатора в общем виде пишется следующим образом:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + k_{нг}^2 P_к}{k_{нг} P_н \cos \varphi_2 + P_0 + k_{нг}^2 P_к}\right) \cdot 100. \qquad (18\text{-}14)$$

Так как при заданном $\cos \varphi_2$ единственной переменной величиной в формуле (18-14) является коэффициент нагрузки $k_{нг}$, то можно определить, при каком значении этого коэффициента к. п. д. трансформатора достигает максимума. Для этого достаточно взять первую производную от η по переменной $k_{нг}$ и приравнять ее нулю. Проделав эту операцию, получаем:

$$P_0 = k_{нг}^2 P_к. \qquad (18\text{-}15)$$

т. е. *к. п. д. достигает максимума при такой нагрузке, при которой потери в меди равны потерям в стали, или*, как говорят иначе, *переменные потери равны постоянным.*

18-11. Численный пример

Определим к. п. д. трехфазного трансформатора ТМ-5600/35, рассмотренного в предыдущих численных примерах. Потери холостого хода $P_0 = 18{,}5$ *квт*, потери короткого замыкания $P_к = 57$ *квт*, $\cos \varphi_2 = 0{,}8$.

Расчетные данные сведены в табл. 18-1.

Из таблицы видно, что уже при $^1/_4$ номинальной нагрузки к. п. д. трансформатора весьма высок. По формуле (18-15) находим, что к. п. д. достигает максимума при

$$k_{нг} = \sqrt{\frac{P_0}{P_к}} = \sqrt{\frac{18{,}5}{57}} \approx 0{,}57.$$

Таблица 18-1

$k_{нг}$	$P_2=k_{нг}P_н\cos\varphi_2$	P_0, квт	$k^2_{нг}P_к$, квт	$P_0+k^2_{нг}P_к$, квт	$P_2+P_0+k^2_{нг}P_к$, квт	η, %
1/4	1120	18,5	3,56	22,06	1142,06	98,07
2/4	2240	18,5	14,25	32,75	2272,75	98,56
3/4	3360	18,5	32,1	50,6	3410,6	98,52
4/4	4480	18,5	57,0	75,5	4555,5	98,34

Глава девятнадцатая

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

19-1. Предварительные замечания

При неравенстве токов в фазных обмотках трансформатора в нем возникает ряд добавочных явлений, обычно отрицательно влияющих на работу трансформатора: искажение линейных и фазных напряжений, добавочные потери в стали и в обмотках, значительные местные превышения температуры и т. д.

Эти явления в наибольшей степени сказываются при несимметричных коротких замыканиях, поскольку они представляют собой предельные случаи несимметричной нагрузки. К тому же режимы несимметричных коротких замыканий представляют значительный интерес в эксплуатационном отношении и с этой точки зрения должны быть изучены в первую очередь.

Различают довольно много режимов несимметричных нагрузок и коротких замыканий, но здесь мы рассмотрим только наиболее показательные режимы, а именно:

1) несимметричная нагрузка при соединении обмоток по способу Y/Y — 12, Δ/Y — 11, Y/Y$_0$ — 12 и Δ/Y — 11;

2) однофазное короткое замыкание при соединении обмоток по способу Y/Y$_0$ — 12;

3) то же по способу Δ/Y$_0$ — 11, главным образом чтобы показать влияние способа соединения обмоток;

4) двухфазное короткое замыкание при соединении обмоток по способу Y/Y$_0$ — 12.

19-2. Метод симметричных составляющих

Основным методом анализа несимметричных режимов работы электрических машин и трансформаторов является метод симметричных составляющих, сущность которого изложена в курсе «Теоретические основы электротехники» [10].

Как известно, любую несимметричную трехфазную систему можно в общем случае разложить на три симметричные системы: с прямой,

обратной и нулевой последовательностью фаз, или для краткости, прямую, обратную и нулевую.

На рис. 19-1, *а*, *б*, *в*, *г* показаны все три симметричные системы токов и несимметричная результирующая система.

При обычно принятом направлении вращения векторов против часовой стрелки прямая система токов образует симметричную звезду векторов $\dot I_{A1} - \dot I_{B1} - \dot I_{C1}$, следующих друг за другом в порядке следования соответствующих букв алфавита.

Соответственно обратная система токов образует другую симметричную звезду векторов, следующих друг за другом в порядке $\dot I_{A2} - \dot I_{C2} - \dot I_{B2}$, обратном порядку следования букв алфавита.

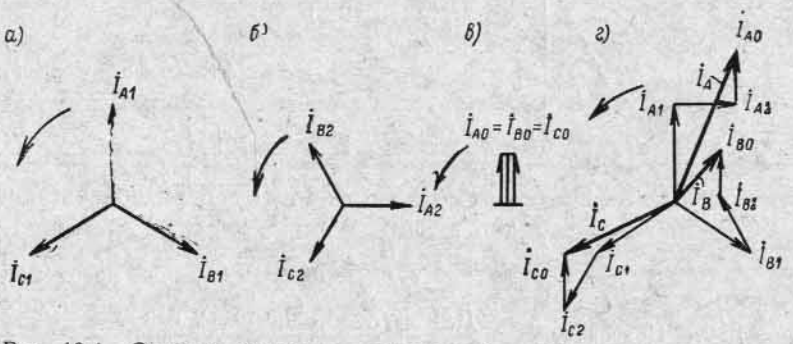


Рис. 19-1. Системы токов: *а* — прямая; *б* — обратная; *в* — нулевая и *г* — результирующая

Нулевая система токов представляет собой три вектора токов $\dot I_{A0}$, $\dot I_{B0}$, $\dot I_{C0}$, равных по величине и совпадающих по фазе.

Согласно рис. 19-1, *г*, имеем:

$$\dot I_A = \dot I_{A1} + \dot I_{A2} + \dot I_{A0}; \qquad (19\text{-}1а)$$

$$\dot I_B = \dot I_{B1} + \dot I_{B2} + \dot I_{B0} \qquad (19\text{-}1б)$$

$$\dot I_C = \dot I_{C1} + \dot I_{C2} + \dot I_{C0}. \qquad (19\text{-}1в)$$

Примем вектор тока $\dot I_{A1}$ за исходный. Тогда векторы токов $\dot I_{B1}$ и $\dot I_{C1}$ можно написать в виде:

$$\dot I_{B1} = a^2 \dot I_{A1} \quad \text{и} \quad \dot I_{C1} = a \dot I_{A1}. \qquad (19\text{-}2)$$

Здесь a — так называемый оператор поворота, т. е. множитель, показывающий, что данный вектор нужно повернуть относительно исходного на угол $120° = 2\pi/3$ по направлению вращения векторов.

По величине

$$a=-0{,}5+j\frac{\sqrt{3}}{2}=\varepsilon^{+j\frac{2\pi}{3}}=\varepsilon^{-j\frac{4\pi}{3}}. \qquad (19\text{-}3)$$

Следовательно,

$$a^2=-0{,}5-j\frac{\sqrt{3}}{2}=\varepsilon^{+j\frac{4\pi}{3}}=\varepsilon^{-j\frac{2\pi}{3}}; \qquad (19\text{-}4)$$

$$a^3=1 \qquad (19\text{-}5а)$$

и

$$1+a+a^2=0; \qquad (19\text{-}5б)$$

тогда (рис. 19-2)

$$1-a=\sqrt{3}\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}; \qquad (19\text{-}5в)$$

$$1-a^2=\sqrt{3}\varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}}. \qquad (19\text{-}5г)$$

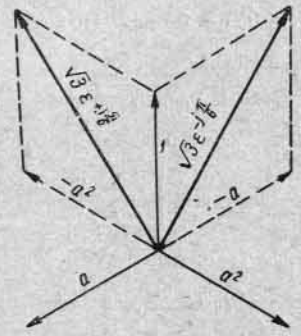


Рис. 19-2. Пояснение к уравнениям (19-5в) и (19-5г)

Соответственно для обратной системы токов имеем:

$$\dot{I}_{B2}=a\dot{I}_{A2} \text{ и } \dot{I}_{C2}=a^2\dot{I}_{A2}. \qquad (19\text{-}6)$$

Для нулевой системы токов

$$\dot{I}_{A0}=\dot{I}_{B0}=\dot{I}_{C0}. \qquad (19\text{-}7)$$

Подставляя эти значения токов в уравнения (19-1а), (19-1б) и (19-1в) и решая их относительно токов I_{A1}, I_{A2} и I_{A0}, получаем:

$$\dot{I}_{A1}=\frac{1}{3}(\dot{I}_A+a\dot{I}_B+a^2\dot{I}_C); \qquad (19\text{-}8а)$$

$$\dot{I}_{A2}=\frac{1}{3}(\dot{I}_A+a^2\dot{I}_B+a\dot{I}_C); \qquad (19\text{-}8б)$$

$$\dot{I}_{A0}=\frac{1}{3}(\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C). \qquad (19\text{-}8в)$$

19-3. Условия анализа несимметричных режимов и коротких замыканий

При анализе несимметричных режимов и коротких замыканий будем считать, что а) сеть, питающая трансформатор, обладает бесконечной мощностью и что соответственно этому система первичных линейных напряжений $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$ и $\dot{U}_{CA}$ остается симметричной независимо от режима работы трансформатора, б) вторичная обмотка приведена к первичной и в) ток холостого хода $I_0=0$.

19-4. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при отсутствии нулевого провода

Несимметрия нагрузочных токов трансформатора вызывает несимметрию его фазных и линейных напряжений, что может отражаться весьма неблагоприятно на работе приемников. Например, при относительно небольшом повышении напряжения на зажимах ламп накаливания срок их службы сильно уменьшается; при понижении напряжения световой к. п. д. ламп резко снижается. Несимметрия напряжений на зажимах асинхронных двигателей создает в них обратновращающееся поле, что ведет к уменьшению их пусковых и максимальных моментов и к снижению к. п. д.

Рассмотрим случаи несимметричной нагрузки трансформаторов, соединения обмоток которых соответствуют ГОСТ, а именно Δ/Y—11, Y/Y_0 — 12 и Δ/Y_0 — 11. Кроме того, рассмотрим случай соединения Y/Y как частный случай соединения Y/Y_0, когда нейтраль не является нагруженной током.

Пусть Z_1, Z_2 и Z_0 — полные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности фаз трансформатора.

В трансформаторе $Z_1=Z_2$, так как при перемене порядка следования фаз изменяется порядок следования токов и напряжений, но внутренние сопротивления не изменяются.

При симметричной нагрузке падения напряжения определяются параметрами короткого замыкания прямого следования фаз:

$$Z_1=Z_к=r_к+jx_к. \qquad (19\text{-}9)$$

При несимметричной нагрузке и при незаземленной нейтрали к составляющим токов и напряжений прямого следования фаз добавляются токи и напряжения обратного следования фаз. Так как $Z_1=Z_2=Z_к$, то падения напряжения от токов прямого и обратного следования фаз будут определяться векторами $\dot{I}_aZ_к$, $\dot{I}_bZ_к$ и $\dot{I}_cZ_к$, где

$$\dot{I}_a=\dot{I}_{a1}+\dot{I}_{a2},\quad \dot{I}_b=\dot{I}_{b1}+\dot{I}_{b2} \text{ и } \dot{I}_c=\dot{I}_{c1}+\dot{I}_{c2}. \qquad (19\text{-}10)$$

Диаграмма напряжений в этом случае может строиться как по методу симметричных составляющих, так и непосредственно по результирующим токам без разложения их на составляющие прямой и обратной последовательности, поскольку токи нулевой последовательности отсутствуют.

19-5. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении обмоток по способу Δ/Y—11

Рассмотрим сначала случай искажения звезды вторичных напряжений при несимметричной нагрузке трансформатора с соединением обмоток Δ/Y — 11, у которого приложенные первичные напряжения $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ являются симметричными (рис. 19-3). Так как на каждом стержне трансформатора при принятых условиях, если намагничивающий ток равен нулю, должно существовать равновесие между

первичной и вторичной н. с., то

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_a,\ \dot{I}_B = -\dot{I}_b \text{ и } \dot{I}_C = -\dot{I}_c.$$

Первичные линейные токи равны геометрической разности фазных токов, т. е.

$$\left.\begin{aligned}
\dot{I}_{Aл} &= \dot{I}_A - \dot{I}_B = -\dot{I}_a + \dot{I}_b = -\dot{I}_{a1} - \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} = \\
&= -\sqrt{3}\dot{I}_{a1}\varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}} - \sqrt{3}\dot{I}_{a2}\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}; \\
\dot{I}_{Bл} &= \dot{I}_B - \dot{I}_C = -\dot{I}_b + \dot{I}_c = -\dot{I}_{b1} - \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} = \\
&= -\sqrt{3}\dot{I}_{b1}\varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}} - \sqrt{3}\dot{I}_{b2}\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}; \\
\dot{I}_{Cл} &= \dot{I}_C - \dot{I}_A = -\dot{I}_{c1} - \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = \\
&= -\sqrt{3}\dot{I}_{c1}\varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}} - \sqrt{2}\dot{I}_{c2}\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}.
\end{aligned}\right\} \quad (19\text{-}11)$$

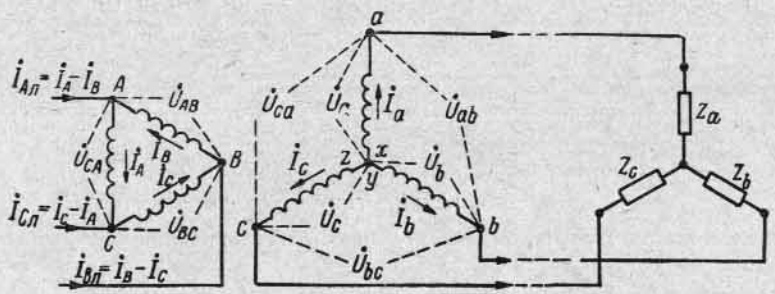


Рис. 19-3. Схема несимметричной нагрузки трансформатора при отсутствии нулевого провода

Вторичные фазные напряжения:

$$\left.\begin{aligned}
\dot{U}_a &= -\dot{U}_{CA} + \dot{I}_A Z_к = -\dot{U}_{CA} - \dot{I}_a Z_к; \\
\dot{U}_b &= -\dot{U}_{AB} + \dot{I}_B Z_к = -\dot{U}_{AB} - \dot{I}_b Z_к; \\
\dot{U}_c &= -\dot{U}_{BC} + \dot{I}_C Z_к = -\dot{U}_{BC} - \dot{I}_c Z_к.
\end{aligned}\right\} \quad (19\text{-}12)$$

Линейные вторичные напряжения равны геометрической разности фазных напряжений и на основании уравнений (19-11) и (19-12) составляют:

$$\left.\begin{aligned}
\dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b = -(\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{AB}) - (\dot{I}_a - \dot{I}_b) Z_к = \\
&= \dot{U}'_{ab} - \sqrt{3}\dot{I}_{a1} Z_к \varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}} - \sqrt{3}\dot{I}_{a2} Z_к \varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}; \\
\dot{U}_{bc} &= \dot{U}_b - \dot{U}_c = -(\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{BC}) - (\dot{I}_b - \dot{I}_c) Z_к = \\
&= \dot{U}'_{bc} - \sqrt{3}\dot{I}_{b1} Z_к \varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}} - \sqrt{3}\dot{I}_{b2} Z_к \varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}; \\
\dot{U}_{ca} &= \dot{U}_c - \dot{U}_a = -(\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{CA}) - (\dot{I}_c - \dot{I}_a) Z_к = \\
&= \dot{U}'_{ca} - \sqrt{3}\dot{I}_{c1} Z_к \varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}} - \sqrt{3}\dot{I}_{c2} Z_к \varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}},
\end{aligned}\right\} \quad (19\text{-}13)$$

где $\dot{U}'_{ab}$, $\dot{U}'_{bc}$ и $\dot{U}'_{ca}$ представляют собой линейные напряжения холостого хода вторичной цепи.

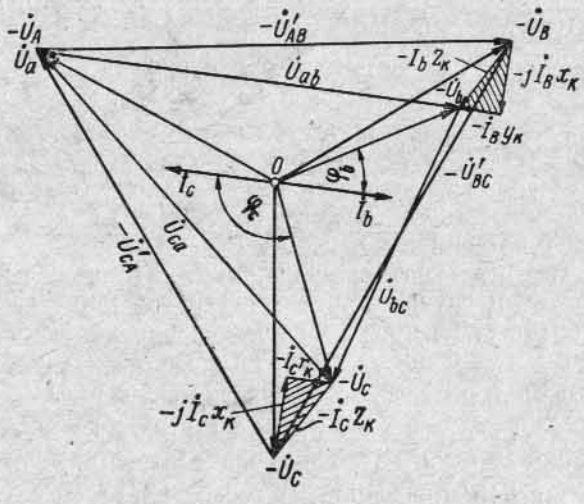


Рис. 19-4. Диаграмма напряжений трехфазного трансформатора при наличии однолечной индуктивной нагрузки

На рис. 19-4 изображена диаграмма напряжений при однолечной индуктивной нагрузке вторичной цепи трансформатора, у которого фаза *a* остается ненагруженной, а в фазах *b* и *c* протекает ток однофазной нагрузки. Звезда линейных напряжений подвергается в этом случае заметному искажению, но смещения нейтральной точки, поскольку отсутствуют в системе токи нулевого следования, не происходит.

19-6. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении обмоток по способу Y/Y без заземления нуля

Замкнем фазы $b - c$ вторичной цепи на нагрузку с сопротивлением Z_c посредством рубильника $P2$ при разомкнутом рубильнике $P1$ (рис. 19-5), оставив фазу a разомкнутой. Тогда, поскольку нейтральная точка не оказывается соединенной с внешней цепью, получится соединение Y/Y без заземления нейтрали. В этом случае $\dot{I}_a = -\dot{I}_A = 0$, $\dot{I}_b = -\dot{I}_B$ и $\dot{I}_c = -\dot{I}_C$. Предположим для простоты, что внешняя нагрузка Z_c — активная, тогда ток $\dot{I}_B$ будет совпадать с линейным напряжением $\dot{U}_{bc} = \overline{BC}$ (рис. 19-6). Так как ток нулевой последовательности $\dot{I}_0 = 0$, то нейтральная точка системы не смещается; поэтому потенциалы точек A, B и C являются заданными и соответственно фазные первичные напряжения при нагрузке не изменяются. В данном случае вторичные фазные и линейные напряжения можно получить, не производя разложения несимметричной системы двухфазного тока на симметричные составляющие. Для этого нужно сложить вектор фазного напряжения $\overline{OB}$ с вектором напряжений $-\dot{I}_B r_к$ и $-j\dot{I}_B x_к$, а вектор $\overline{OC}$ — с векторами $-\dot{I}_C r_к$ и $-j\dot{I}_C x_к$ и получить таким образом новое значение вектора вторичного линейного напряжения $\overline{C'B'}$ (рис. 19-6). В рассматриваемом случае фазное напряжение U_B возрастает, а фазное напряжение U_C уменьшается. При $\dot{I}_B = \dot{I}_н$ изменение напряжений остается в пределах нескольких процентов.

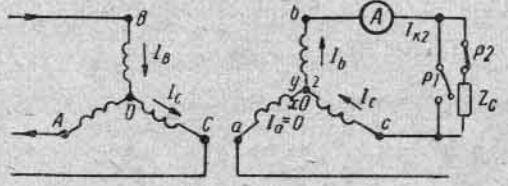


Рис. 19-5. Двухфазная нагрузка и короткое замыкание трансформатора при соединении обмоток по способу Y/Y

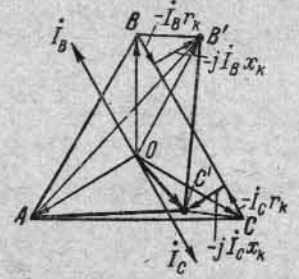


Рис. 19-6. Диаграмма напряжений при двухфазной нагрузке трансформатора

19-7. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при наличии заземленного нулевого провода при соединении обмоток по схеме Y/Y_0

Рассмотрим случай несимметричной нагрузки трансформатора с соединением обмоток $Y/Y_0 - 12$, соответствующий распределительным трансформаторам, имеющим нагруженную током заземленную

нейтраль на вторичной стороне (рис. 19-7), вследствие чего во вторичной цепи могут протекать токи не только прямой и обратной, но и нулевой последовательности.

В этом случае для токов вторичной системы имеем:

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = \dot{I}'_a + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0} = \dot{I}'_b + \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{a1}\varepsilon^{j\frac{4\pi}{3}} + \dot{I}_{a2}\varepsilon^{j\frac{2\pi}{3}} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0} = \dot{I}'_{c0} + \dot{I}_{c0} = \dot{I}_{a1}\varepsilon^{j\frac{2\pi}{3}} + \dot{I}_{a2}\varepsilon^{j\frac{4\pi}{3}} + \dot{I}_{a0}, \end{aligned}\right\} \quad (19\text{-}14)$$

где $\dot{I}'_a$, $\dot{I}'_b$ и $\dot{I}'_c$ представляют собой геометрические суммы токов прямой и обратной последовательности соответствующих фаз. Складывая уравнения (19-14), получаем:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_{a0}. \quad (19\text{-}15)$$

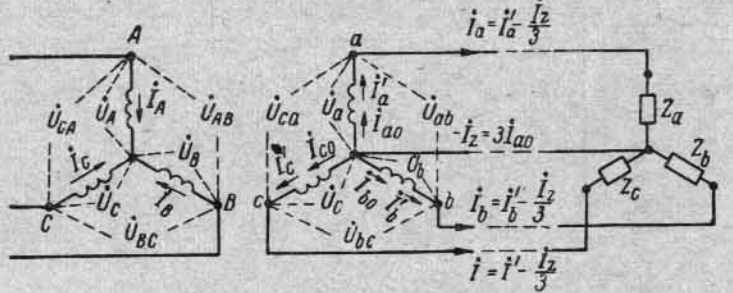


Рис. 19-7. Схема несимметричной нагрузки трансформатора при наличии нулевого провода

Для вторичной цепи на основании первого закона Кирхгофа имеем, принимая во внимание уравнение (19-15):

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c + \dot{I}_z = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c - 3\dot{I}_{a0} = 0, \quad (19\text{-}16)$$

где $\dot{I}_z$ — ток в нулевом проводе. Следовательно,

$$\dot{I}_{a0} = -\dot{I}_z/3. \quad (19\text{-}17)$$

Для первичной цепи

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (19\text{-}18)$$

Для результирующих н. с. контуров $a-b$ и $b-c$, состоящих из среднего и крайних стержней, пренебрегая намагничивающим током, можно написать уравнения:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_a - \dot{I}_B - \dot{I}_b = 0 \text{ и } \dot{I}_B + \dot{I}_b - \dot{I}_C - \dot{I}_c = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_A + \dot{I}_a = \dot{I}_B + \dot{I}_b = \dot{I}_C + \dot{I}_c. \quad (19\text{-}19)$$

Складывая уравнения (19-16) и (19-18) и принимая во внимание уравнения (19-19), получаем:

$$3(\dot{I}_A+\dot{I}_a)-3\dot{I}_{a0}=0,$$

откуда

$$\left.\begin{aligned}
\dot{I}_A &= -\dot{I}_a+\dot{I}_{a0}=-\dot{I}_{a1}-\dot{I}_{a2}-\dot{I}_{a0}+\dot{I}_{a0}=\\
&=-\dot{I}_{a1}-\dot{I}_{a2}=-\dot{I}'_a;\\
\dot{I}_B &= -\dot{I}_b+\dot{I}_{b0}=-\dot{I}_{b1}-\dot{I}_{b2}=-\dot{I}'_b;\\
\dot{I}_C &= -\dot{I}_c+\dot{I}_{c0}=-\dot{I}_{c1}-\dot{I}_{c2}=-\dot{I}'_c.
\end{aligned}\right\} \quad (19\text{-}20)$$

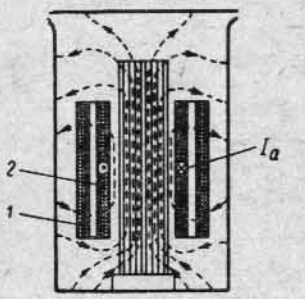


Рис. 19-8. Картина поля, созданного током нулевой последовательности

Отсюда следует, что вторичная система токов может быть разложена на две системы: первую

$$\left.\begin{aligned}
\dot{I}'_a &= \dot{I}_a-\dot{I}_{a0}=\dot{I}_a+\frac{\dot{I}_z}{3};\\
\dot{I}'_b &= \dot{I}_b-\dot{I}_{b0}=\dot{I}_b+\frac{\dot{I}_z}{3};\\
\dot{I}'_c &= \dot{I}_c-\dot{I}_{c0}=\dot{I}_c+\frac{\dot{I}_z}{3},
\end{aligned}\right\} \quad (19\text{-}21)$$

для которой действительно соотношение

$$\dot{I}'_a+\dot{I}'_b+\dot{I}'_c=0, \quad (19\text{-}22)$$

и вторую — систему токов нулевой последовательности

$$\dot{I}_{a0}=-\dot{I}_z/3; \quad \dot{I}_{b0}=-\dot{I}_z/3; \quad \dot{I}_{c0}=-\dot{I}_z/3.$$

При соединении первичной обмотки звездой составляющие нулевой последовательности $\dot{I}_{a0}$ не уравновешиваются первичной н. с., и поэтому создаваемые ими потоки Φ_0 в стержневом трансформаторе с магнитносвязанной системой должны замкнуться от ярма к ярму через окружающее пространство и корпус бака (рис. 19-8).

Для фазовых напряжений имеем:

$$\left.\begin{aligned}
\dot{U}_a &= -\dot{U}_A-\dot{I}_{a1}Z_1-\dot{I}_{a2}Z_2-\dot{I}_{a0}Z_0=-\dot{U}_A-\dot{I}'_aZ_к-\dot{I}_{a0}Z_0;\\
\dot{U}_b &= -\dot{U}_B-\dot{I}_{b1}Z_1-\dot{I}_{b2}Z_2-\dot{I}_{b0}Z_0=-\dot{U}_B-\dot{I}'_bZ_к-\dot{I}_{b0}Z_0;\\
\dot{U}_c &= -\dot{U}_C-\dot{I}_{c1}Z_1-\dot{I}_{c2}Z_2-\dot{I}_{c0}Z_0=-\dot{U}_C-\dot{I}'_cZ_к-\dot{I}_{c0}Z_0.
\end{aligned}\right\} \quad (19\text{-}23)$$

Для линейных напряжений

$$\left.\begin{aligned}
\dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a-\dot{U}_b=-\dot{U}_{AB}-(\dot{I}'_a-\dot{I}'_b)Z_к=\\
&=-\dot{U}_{AB}-\sqrt{3}\dot{I}_{a1}Z_к\varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}}-\sqrt{3}\dot{I}_{a2}Z_к\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}};\\
\dot{U}_{bc} &= \dot{U}_b-\dot{U}_c=-\dot{U}_{BC}-(\dot{I}'_b-\dot{I}'_c)Z_к=\\
&=-\dot{U}_{BC}-\sqrt{3}\dot{I}_{b1}Z_к\varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}}-\sqrt{3}\dot{I}_{b2}Z_к\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}};\\
\dot{U}_{ca} &= \dot{U}_c-\dot{U}_a=-\dot{U}_{CA}-(\dot{I}'-\dot{I}'_a)Z_к=\\
&=-\dot{U}_{CA}-\sqrt{3}\dot{I}_{c1}Z_к\varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}}-\sqrt{3}\dot{I}_{c1}Z_к\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}.
\end{aligned}\right\} \quad (19\text{-}24)$$

В отличие от ранее рассмотренного случая Δ/Y — 11, здесь построение диаграммы напряжения необходимо производить с учетом

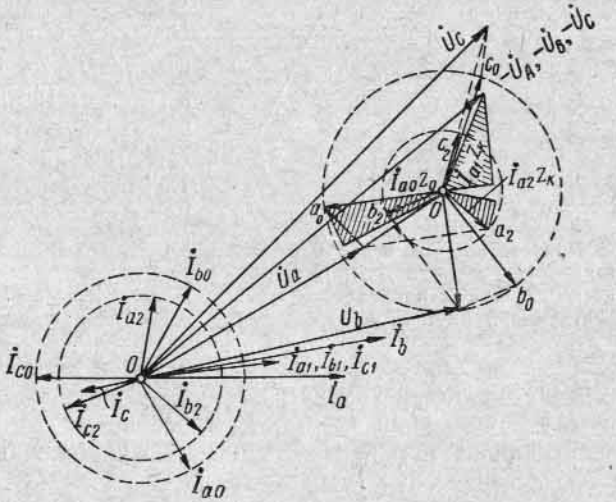


Рис. 19-9. Совмещенная векторная диаграмма трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке

падений напряжения от токов нулевой последовательности, для чего может быть применен метод совмещенной диаграммы. За исходные векторы при этих построениях берутся векторы прямой последовательности для каждой из фаз, и по отношению к ним размещаются векторы обратной и нулевой последовательности. Легко видеть, что при совмещении векторов прямой последовательности векторы обратной последовательности размещаются в порядке прямой последовательности, а векторы нулевой последовательности — в порядке обратной последовательности (рис. 19-9).

На совмещенной диаграмме падения напряжения $\dot{I}_{a1}Z_к$, $\dot{I}_{b1}Z_к$ и $\dot{I}_{c1}Z_к$ совпадут, и к ним должны быть добавлены падения напряжения $\dot{I}_{a2}Z_к$, $\dot{I}_{b2}Z_к$, $\dot{I}_{c2}Z_к$ и $\dot{I}_{a0}Z_0$, $\dot{I}_{b0}Z_0$, $\dot{I}_{c0}Z_к$. Для этого добавляем к концу вектора $\dot{I}_{a1}Z_к$ сначала падения напряжения $\dot{I}_{a2}Z_к$ и $\dot{I}_{a0}Z_0$, затем проводим окружности радиусами, равными соответствующим падениям напряжения, и размещаем на них концы векторов $\dot{I}_{b2}Z_к$ и $\dot{I}_{c2}Z_к$ в порядке прямой последовательности, а концы векторов $\dot{I}_{b0}Z_0$ и $\dot{I}_{c0}Z_0$ — в порядке обратной последовательности. Затем строим геометрические суммы $\dot{I}_{a2}Z_к + \dot{I}_{a0}Z_0$, $\dot{I}_{b2}Z_к + \dot{I}_{b0}Z_0$ и $\dot{I}_{c2}Z_к + \dot{I}_{c0}Z_0$; после этого, соединив полученные концы векторов с началом координат, можно найти векторы фазных напряжений $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$ и $\dot{U}_c$. Поворачивая вектор $\dot{U}_b$ на 120° вправо, а $\dot{U}_c$ — на 120°влево, получаем действительную диаграмму напряжений (рис. 19-10), из которой легко находятся также и векторы линейных напряжений $\dot{U}_{ab}$, $\dot{U}_{bc}$ и $\dot{U}_{ca}$.

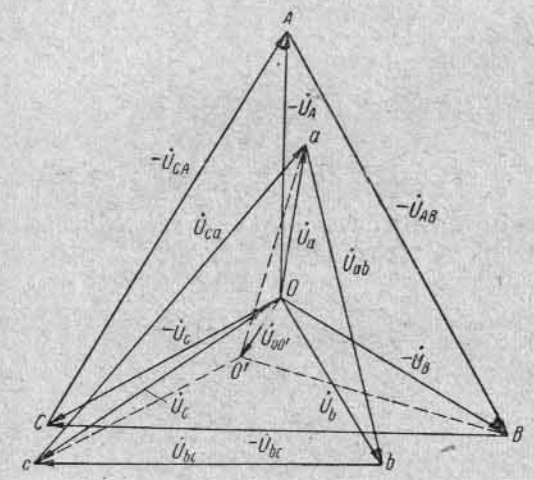


Рис. 19-10. Действительная векторная диаграмма напряжений трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке, соответствующая рис. 19-9

Падения напряжения от совпадающих по фазе токов нулевой последовательности при несимметричной нагрузке еще более увеличивают несимметрию вторичных напряжений трансформатора; кроме того, происходит сдвиг нейтральной точки, равный падению напряжения от токов нулевой последовательности $\overline{OO'}$:

$$\dot{U}_{OO'} = \dot{I}_{a0}Z_0 = \dot{I}_{b0}Z_0 = \dot{I}_{c0}Z_0.$$

19-8. Двухфазное короткое замыкание трехфазного трансформатора при стандартном соединении Y/Y$_0$

Когда в пределе внешнее сопротивление $Z_с = 0$ (рубильник P_1 на рис. 19-5 замкнут), то получается случай двухфазного короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по способу Y/Y. Каждая система токов определяется сопротивлением трехфазного короткого замыкания $Z_к = r_к + jx_к$. Для упрощения примем, что $r_к = 0$ и что, следовательно, ток $\dot{I}_B$ сдвинут по фазе относительно

напряжения $\dot{U}_{BC} = \overline{BC}$ на 90° (рис. 19-11, *а*). Пользуясь формулами (19-8а), (19-8б) и (19-8в), разлагаем несимметричную систему токов $\dot{I}_B = -\dot{I}_C$ (при $\dot{I}_A = 0$) на прямую и обратную системы токов $\dot{I}_{A1}$, $\dot{I}_{B1}$, $\dot{I}_{C1}$ и $\dot{I}_{A2}$, $\dot{I}_{B2}$, $\dot{I}_{C2}$ (рис. 19-11, *б*, *в*). На основании (19-8а), (19-8б), (19-5в) и (19-5г) находим:

$$\dot{I}_{B1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{\dot{I}_B}{3}(1-a) = \frac{\dot{I}_B}{\sqrt{3}}\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}; \qquad (19\text{-}25а)$$

$$\dot{I}_{B2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{\dot{I}_B}{3}(1-a^2) = \frac{\dot{I}_B}{\sqrt{3}}\varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}}; \qquad (19\text{-}25б)$$

$$\dot{I}_{C1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_C + a^2\dot{I}_B) = \frac{\dot{I}_C}{3}(1-a^2) = \frac{\dot{I}_C}{\sqrt{3}}\varepsilon^{+j\frac{\pi}{6}}; \qquad (19\text{-}26а)$$

$$\dot{I}_{C2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_C + a\dot{I}_B) = \frac{\dot{I}_C}{3}(1-a) = \frac{\dot{I}_C}{\sqrt{3}}\varepsilon^{-j\frac{\pi}{6}}. \qquad (19\text{-}26б)$$

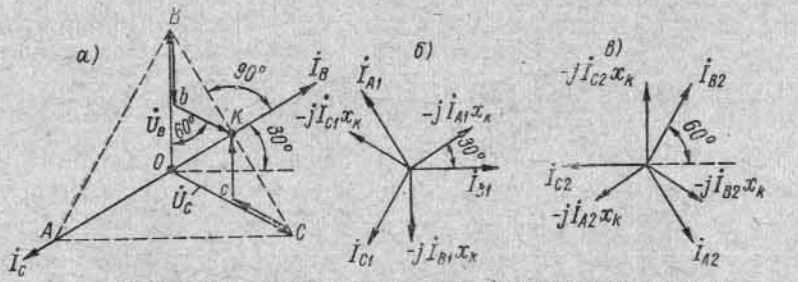


Рис. 19-11. Диаграмма двухфазного короткого замыкания трансформатора

Каждый из этих токов создает соответствующую э. д. с. рассеяния, сдвинутую от тока на 90°.

Ток $\dot{I}_{B1}$ создает э. д. с. $-j\dot{I}_{B1}x_к = \overline{Bb}$, находящуюся в противофазе с напряжением $\dot{U}_B$; ток $\dot{I}_{B2}$ создает э. д. с. $-j\dot{I}_{B2}x_к$, равную по величине напряжению $\overline{Bb}$ и опережающую его на угол 60° соответственно углу 60° между векторами $\dot{I}_{B1}$ и $\dot{I}_{B2}$. Поэтому треугольник напряжений BbK — равнобедренный с углом $BbK = 120°$, а треугольник ObK — равносторонний. Таким образом, $\overline{Bb} = OB/2 = U_ф/2$ и, следовательно,

$$\overline{Bb} = \dot{I}_{B1}x_к = \frac{\dot{I}_B}{\sqrt{3}}x_к = \frac{U_ф}{2},$$

откуда

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{к2} = \frac{U_ф\sqrt{3}}{2x_к}. \qquad (19\text{-}27)$$

У трансформаторов с несвязанной магнитной системой соединение Y/Y никогда не применяется из-за появления в магнитных потоках значительной третьей гармонической.

19-9. Однофазное короткое замыкание трехфазного трансформатора при соединении обмоток по способу Y/Y_0

Предположим, что фаза a замкнута накоротко, а фазы c и b разомкнуты (рис. 19-12). Соответственно этому имеем несимметричную систему вторичных токов: $\dot{I}_a = \dot{I}_{к1}$, $\dot{I}_b = 0$ и $\dot{I}_c = 0$.

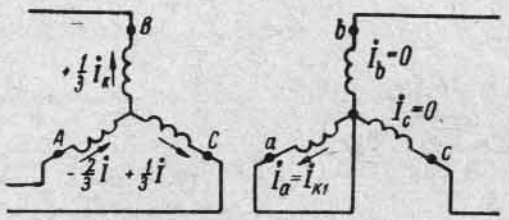


Рис. 19-12. Однофазное короткое замыкание при соединении обмоток по способу Y/Y_0 — 12

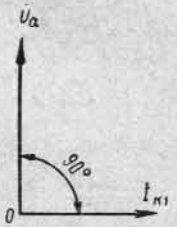


Рис. 19-13. Ток однофазного короткого замыкания при $r_к = 0$

Предположим для простоты, что $r_к = 0$ и что, следовательно, ток $I_{к1}$ отстает от $\dot{U}_a$ на 90° (рис. 19-13).

Пользуясь формулами (19-8а), (19-8б) и (19-8в), разложим несимметричную систему вторичных токов на три симметричные: прямой

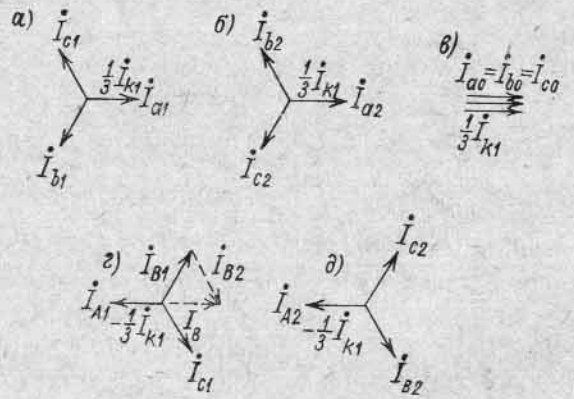


Рис. 19-14. Разложение тока однофазного короткого замыкания при соединении обмоток по способу Y/Y — 12

последовательности $\dot{I}_{a1}$, $\dot{I}_{b1}$, $\dot{I}_{c1}$, обратной — $\dot{I}_{a2}$, $\dot{I}_{c2}$, $\dot{I}_{b2}$ и нулевой — $\dot{I}_{a0}$, $\dot{I}_{b0}$, $\dot{I}_{c0}$ (рис. 19-14). По величине каждый из токов любой системы равен $\dot{I}_{к1}/3$.

Системам токов прямой и обратной последовательности во вторичной обмотке соответствуют такие же системы токов в первичной обмотке. Но нулевой системы токов в первичной обмотке нет, так как эта обмотка не имеет выведенной нейтральной точки. Как известно, в этом случае $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ и, следовательно [см. формулу (19-8в)],

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = 0.$$

Таким образом, однофазное короткое замыкание трансформатора, соединенного по способу Y/Y_0, можно рассматривать как результат наложения трех режимов, а именно двух симметричных режимов трехфазного короткого замыкания прямой и обратной системы токов и третьего режима однофазного тока во вторичной обмотке.

Прямая и обратная системы токов образуют нормальные трехфазные системы, в пределах каждой из которых первичные и вторичные н. с. взаимно уравновешены. Поэтому первичные и вторичные токи показаны на рис. 19-14, *а*, *г* и 19-14, *б*, *д* в противофазе, а по величине они равны между собой, поскольку вторичная обмотка, согласно условию, приведена к первичной.

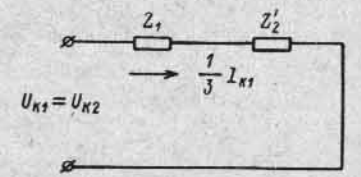


Рис. 19-15. Схема замещения для токов прямой и обратной последовательности

Складывая геометрически токи прямой и обратной последовательности в фазах первичной обмотки (сложение токов $\dot{I}_{B1}$ и $\dot{I}_{B2}$ в фазе B показано на рис. 19-14, *г* штриховой линией), получим:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = -\frac{2}{3}\dot{I}_{к1}; \qquad (19\text{-}28)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = \frac{1}{3}\dot{I}_{к1} \qquad (19\text{-}29)$$

и

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} = \frac{1}{3}\dot{I}_{к1}. \qquad (19\text{-}30)$$

Обе трехфазные системы токов имеют одну и ту же схему замещения с сопротивлением короткого замыкания $Z_к = Z_1 + Z'_2$ (рис. 19-15), аналогичную схеме замещения на рис. 17-3. Это объясняется тем, что трансформатор представляет собой аппарат, в котором, в противоположность вращающимся электрическим машинам, порядок следования фаз $A—B—C$ или $A—C—B$ безразличен.

Токи нулевой системы $\dot{I}_{a0}$, $\dot{I}_{b0}$ и $\dot{I}_{c0}$, текущие только по вторичной обмотке, равны по величине и совпадают по фазе; следовательно, все они должны протекать по этой обмотке в одном направлении, т. е. от начала фазных обмоток к их концам или в обратном направлении. Соответственно этому можно представить себе, что вторичные фазные обмотки соединены последовательно по схеме $(a—x) — (b—y) — (c—z)$ и образуют цепь, по которой течет ток $\dot{I}_{0n} = \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} =$

$= I_{c0} = I_{к1}/3$ от источника однофазного тока номинальной частоты с напряжением U_{0n} (рис. 19-16).

Соответственно этой схеме имеем:

$$\dot{I}_{0n} = \frac{\dot{U}_{0n}}{3Z_{0n}}, \qquad (19\text{-}31)$$

где $Z_{0n} = r_{0n} + jx_{0n}$ — полное сопротивление нулевой последовательности.

Проходя по обмоткам, ток $I_{0n} = I_{к1}/3$ создает три равные по величине и совпадающие по фазе н. с. $\dot{F}_{0n} = \dot{I}_{0n}w_1 = \frac{1}{3}\dot{I}_{к1}w_1$. Действие этой н. с. зависит целиком от конструкции магнитной системы трансформатора. В трехстержневом трансформаторе н. с. F_{0n}, будучи направлены одинаково во всех трех стержнях (на рис. 19-17 н. с. F_{0n} направлены все вверх), действуют по контуру каждой пары стержней встречно и создают однофазный поток Φ_{0n}, замыкающийся от ярма к ярму в среде, окружающей трансформатор (штриховые тонкие линии на рис. 19-17).

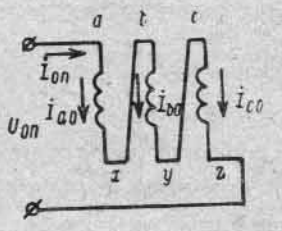


Рис. 19-16. Токи нулевой последовательности

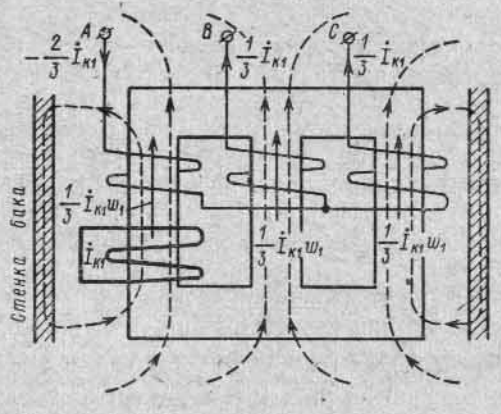


Рис. 19-17. Однофазный поток в трехстержневом трансформаторе при соединении обмоток по способу Y/Y_0

Так как магнитное сопротивление этой среды велико, то при заданном значении тока I_{0n} поток Φ_{0n} относительно невелик. Наоборот, в групповом трансформаторе поток Φ_{0n} замыкается по сердечнику каждого из однофазных трансформаторов, т. е. по пути основного потока (рис. 19-18); поэтому даже очень небольшой ток $\dot{I}_{0n}$ — порядка тока холостого хода — создает поток Φ_{0n}, соизмеримый по величине с основным потоком трансформатора.

Чтобы показать действие потока Φ_{0n}, строим диаграмму (рис. 19-19). Здесь ABC — треугольник первичных линейных напряжений $\dot{U}_{AB} = \overline{AB}$, $\dot{U}_{BC} = \overline{BC}$ и $\dot{U}_{CA} = \overline{CA}$; точка O — нейтральная точка обеих обмоток; $\overline{OA} = \dot{U}_A$, $\overline{OB} = \dot{U}_B$ и $\overline{OC} = \dot{U}_C$ — фазные напряжения при симметричной нагрузке.

Так как, согласно условию, трансформатор питается от сети бесконечной мощности, то потенциалы точек A, B и C заданы и не зависят от режима работы трансформатора.

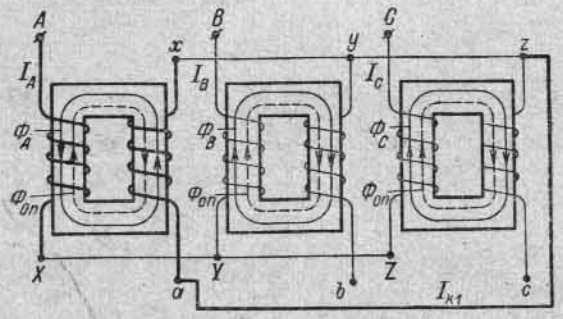


Рис. 19-18. Однофазный поток в групповом трансформаторе при соединении обмоток по способу Y/Y_0

Ток $\dot{I}_{к1}$, а стало быть, и ток $\dot{I}_{0n} = \frac{1}{3}\dot{I}_{к1}$ отстает от напряжения $\dot{U}_{}$ короткозамкнутой фазы на 90° ($r_к = 0$). Поток Φ_{0n}, создаваемый н. с. $\dot{I}_{0n}w_1 = \frac{1}{3}\dot{I}_{к1}w_1$, совпадает по фазе с током $\dot{I}_{к1}$ и наводит

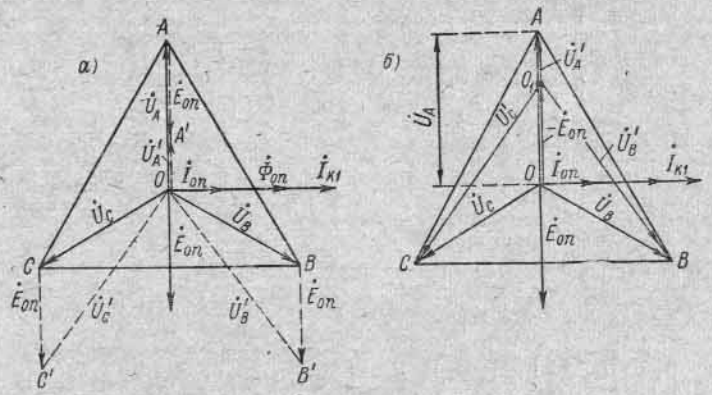


Рис. 19-19. Действие однофазного потока Φ_{0n} при соединении обмоток по способу Y/Y_0

в каждой фазной обмотке трансформатора э. д. с. $\dot{E}_{0n}$, отстающую от потока $\dot{\Phi}_{0n}$ на 90°. Складываясь с напряжениями $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$, э. д. с. $\dot{E}_{0n}$ стремится изменить потенциалы точек A, B и C так, как это показано на рис. 19-19, *а* штриховыми линиями. Но, как было указано выше, потенциалы этих точек зафиксированы. Поэтому действие э. д. с. E_{0n} состоит в смещении нейтральной точки на величину

э. д. с.— $\dot{E}_{0n}$ (рис. 19-19, *б*). Мы видим, что $\dot{E}_{0n}$ уменьшает фазное напряжение короткозамкнутой обмотки A и увеличивает фазные напряжения двух других обмоток. При этом в трехстержневом трансформаторе, имеющем связанную магнитную систему, смещение нейтральной точки ограничено (рис. 19-19, *б*) в соответствии с ограниченным значением потока Φ_{0n} (см. рис. 19-17). Наоборот, в трансформаторах, имеющих независимые магнитные системы — броневые, пятистержневые, групповые, поток Φ_{0n} достигает значений, соизмеримых со значением основного потока Φ уже при значениях тока $I_{0n} \approx I_0$, т. е. при ничтожной несимметрии нагрузки. В этом случае нейтральная точка на рис. 19-19, *б* практически совмещается с точкой A, соответственно чему имеем фазные напряжения обмоток: $\dot{U}'_A = 0$ и $\dot{U}'_B = \dot{U}'_C = U_л$. Такое искажение фазных напряжений совершенно недопустимо и поэтому трансформаторы с независимой магнитной системой не применяются при соединении обмоток Y/Y_0.

19-10. Диаграмма однофазного короткого замыкания трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Y/Y_0

При построении этой диаграммы будем, как и раньше, пренебрегать активными сопротивлениями. В этом случае $Z_к = jx_к$ и $Z_{0n} = jx_{0n}$.

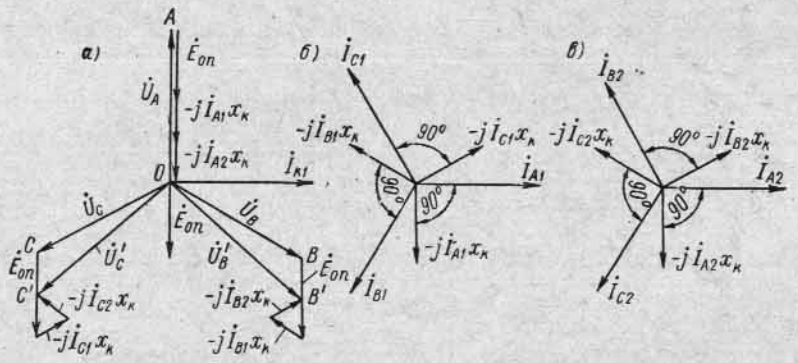


Рис. 19-20. Диаграмма однофазного короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по способу Y/Y_0

Диаграмма приведена на рис. 19-20, где фазные напряжения $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$, ток $\dot{I}_{к1}$ и э. д. с. $\dot{E}_{0n}$ построены, как на рис. 19-19. Токи прямой и обратной последовательности создают э. д. с. рассеяния — $j\dot{I}_{A1}x_к$, — $j\dot{I}_{A2}x_к$ и т. д., показанные на рис. 19-20, *б*, *в* соответственно каждому фазному току.

Так как фаза A замкнута накоротко, то действующие в этой фазе э. д. с. взаимно уравновешены.

Следовательно,

$$\dot{U}_A + \dot{E}_{0n} - j\dot{I}_{A1}x_к - j\dot{I}_{A2}x_к = 0.$$

Фазные обмотки B и C не замкнуты накоротко. Поэтому на их зажимах имеются напряжения $\dot{U}'_B$ и $\dot{U}'_C$, соответственно чему уравнения э. д. с. для этих обмоток пишутся в виде:

$$\dot{U}_B + \dot{E}_{0n} - j\dot{I}_{B1}x_к - j\dot{I}_{B2}x_к = \dot{U}'_B$$

и

$$\dot{U}_C + \dot{E}_{0n} - j\dot{I}_{C1}x_к - j\dot{I}_{C2}x_к = \dot{U}'_C.$$

Геометрическое сложение векторов э. д. с., соответствующее написанным уравнениям, показано на рис. 19-20, *а* (масштаб э. д. с. рассеяния уменьшен примерно вдвое).

Если учесть активные сопротивления обмоток, то для фазы A имеем:

$$\dot{U}_A + \dot{E}_{0n} - \dot{I}_{A1}Z_к - \dot{I}_{A2}Z_к = 0. \qquad (19\text{-}32)$$

Э. д. с. E_{0n} определяется по схеме на рис. 19-16, а именно:

$$\dot{E}_{0n} = \frac{1}{3}\dot{U}_{0n} = -\dot{I}_{0n}Z_{0n} = -\frac{1}{3}\dot{I}_{к1}Z_{0n}.$$

Кроме того, $\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \frac{1}{3}\dot{I}_{к1}$. Следовательно,

$$U_A - \frac{1}{3}\dot{I}_{к1}Z_{0n} - \frac{1}{3}\dot{I}_{к1}Z_к - \frac{1}{3}\dot{I}_{к1}Z_к = 0,$$

откуда

$$I_{к1} = \frac{3U_A}{Z_{0n} + 2Z_к}. \qquad (19\text{-}33)$$

Здесь $U_A = U_ф = U_л/\sqrt{3}$; сопротивление $Z_к$ определяется из опыта короткого замыкания, а для определения Z_{0n} ставится особый опыт.

19-11. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Δ/Y_0—11

Рассмотрим теперь случай несимметричной нагрузки трансформатора при соединении его обмоток Δ/Y_0 — 11, соответствующий повышающему трансформатору с заземленной нейтралью.

В этом случае токи нулевой последовательности, протекающие во вторичной цепи, трансформируют в первичной цепи токи, совпадающие по фазе и замыкающиеся внутри треугольника первичной цепи подобно токам третьей гармонической (рис. 19-21). Протекающие в первичной и вторичной цепях токи нулевой последовательности будут преодолевать сопротивление короткого замыкания $Z_{к0}$ меньшее, чем Z_0, получавшееся при включении первичной обмотки

звездой. Для вторичной цепи будут иметь место уравнения (19-14) и (19-16), выведенные для трансформатора с соединением $Y/Y_0 - 12$. Для фазных напряжений будет действительно уравнение (19-23), в которое вместо величины Z_0 войдет $Z_{к0}$, а для линейных напряжений получается уравнение (19-13), выведенное для трансформатора с соединением обмоток $\Delta/Y - 11$. Построение диаграммы напряжений при несимметричной нагрузке в этом случае принципиально такое же, как для трансформатора с соединением обмоток $Y/Y_0 - 12$, но

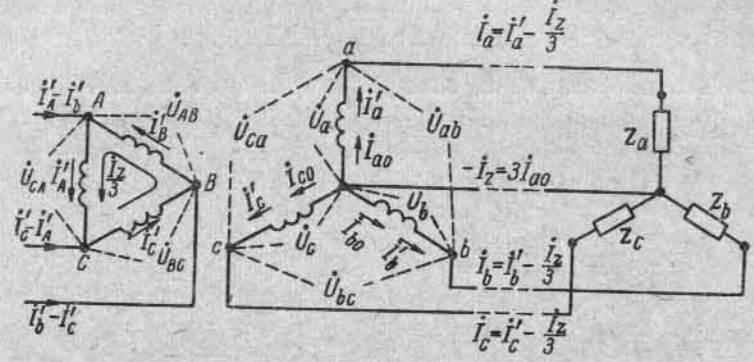


Рис. 19-21. Схема несимметричной нагрузки повышающего трансформатора с соединением обмоток $\Delta/Y_0 - 11$ с заземленной нейтралью

так как $Z_{к0} < Z_0$, то искажение симметрии вторичных напряжений, вносимое токами нулевой последовательности, будет меньше, и с этой точки зрения система Δ/Y_0 имеет по сравнению с системой Y/Y_0 лучшие характеристики.

19-12. Однофазное короткое замыкание трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Δ/Y_0

В случае работы трансформатора на однофазную нагрузку при соединении обмоток Δ/Y_0 (рис. 19-22) в нем возникает, так же как и при соединении обмоток Y/Y_0, ток нулевой последовательности I_{0n}.

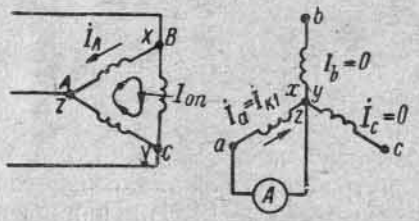


Рис. 19-22. Однофазное короткое замыкание при соединении обмоток по способу Δ/Y_0

Но в данном случае ток I_{0n} существует не только со стороны вторичной обмотки, но течет и по контуру первичного треугольника $A—X—B—Y—C—Z$. Таким образом, в обеих обмотках трансформатора при соединении их по способу Δ/Y_0 текут токи всех трех последовательностей. Создаваемые каждой из этих систем токов н. с. взаимно почти уравновешиваются, вследствие чего однофазный поток Φ_{0n} и создаваемый им сдвиг нейтральной точки O, хотя и существуют, но почти незаметны. Поэтому $\dot{I}_A \approx \dot{I}_a = \dot{I}_{к1}$, $\dot{I}_B \approx 0$, $\dot{I}_C \approx 0$. Фазные напряжения искажаются значительно меньше, чем в системе Y/Y_0. Этот вывод был уже сделан при рассмотрении условий работы трансформатора под нагрузкой (см. § 19-5).

19-13. Определение сопротивления нулевой последовательности

Здесь мы будем иметь в виду только трехстержневой трансформатор как единственно применяемый в схемах Y/Y_0. Чтобы определить сопротивление Z_{0n} этого трансформатора, нужно соединить последовательно или параллельно между собой все три фазы обмоток ВН или НН; вторая обмотка остается разомкнутой (на рис. 19-23 показано только последовательное соединение фаз обмотки НН). Измерив напряжение, ток и мощность на фазу $U_{0nф}$, $I_{0nф}$ и $P_{nф}$, получаем:

$$Z_{0n} = U_{0nф}/I_{0nф}; \quad (19\text{-}34)$$

$$r_{0n} = P_{0nф}/I^2_{0nф} \quad (19\text{-}35)$$

и

$$x_{0n} = \sqrt{Z^2_{0n} - r^2_{0n}}. \quad (19\text{-}36)$$

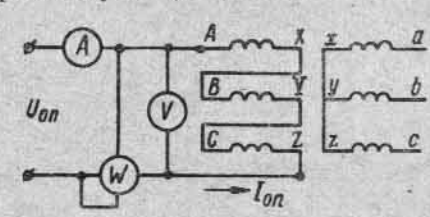


Рис. 19-23. Схема для определения Z_{0n}

Опыт показывает, что а) индуктивная составляющая нулевого сопротивления x_{0n} значительно больше активной составляющей r_{0n}, так что $Z_{0n} \approx x_{0n}$; б) на величину сопротивлений x_{0n} и r_{0n} оказывает большое влияние бак масляного трансформатора, куда попадают линии потока Φ_{0n} (см. рис. 19-17); в) сопротивление Z_{0n} значительно больше сопротивления $Z_к$ (на рис. 19-20, *а* для ясности масштабы не соблюдены). Так, например, при испытании трехфазного масляного трансформатора мощностью 100 *ква*, 6300/220 *в* по схеме рис. 19-23 были получены следующие результаты: а) для трансформатора, вынутого из бака, $Z_{0n} = 0{,}20$ *ом*, $r_{0n} = 0{,}022$ *ом* и $x_{0n} = 0{,}199$ *ом*; б) для трансформатора в баке $Z_{0n} = 0{,}31$ *ом*, $r_{0n} = 0{,}055$ *ом* и $x_{0n} = 0{,}30$ *ом*; при этом $Z_к = 0{,}028$ *ом*; $r_к = 0{,}0127$ *ом* и $x_к = 0{,}0248$ *ом*.

19-14. Работа трехфазного трансформатора при открытом треугольнике

Чтобы получить открытый треугольник, достаточно иметь два однофазных трансформатора и присоединить их к первичной сети так, как это показано на рис. 19-24, *в*. Сравним условия работы трансформаторных групп с закрытым и открытым треугольником. Предположим, что а) первичные линейные напряжения $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$ и $\dot{U}_{CA}$ образуют симметричную систему и не зависят от нагрузки трансформатора;

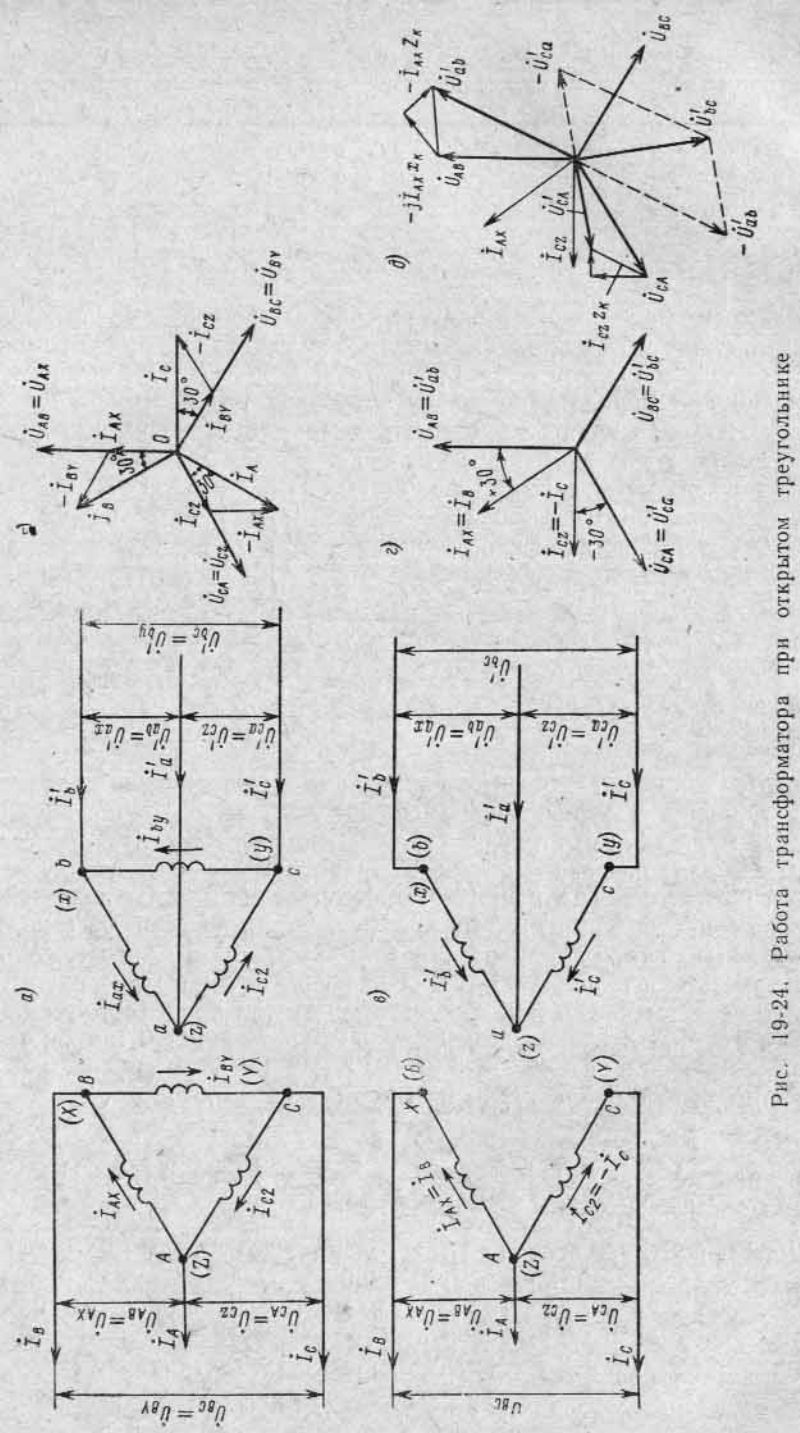


Рис. 19-24. Работа трансформатора при открытом треугольнике

б) вторичная обмотка приведена к первичной; в) ток холостого хода $I_0 = 0$; г) при закрытом треугольнике (рис. 19-24, *а*) нагрузка распределена равномерно и является активной; д) падения напряжения в трансформаторе пока не учитываются.

Тогда диаграмма напряжений и токов при з а к р ы т о м треугольнике имеет вид, показанный на рис. 19-24, *б*. Здесь векторы $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$ и $\dot{U}_{CA}$ представляют собой симметричную систему первичных линейных напряжений. В то же время эти векторы изображают и фазные первичные напряжения $\dot{U}_{AX}$, $\dot{U}_{BY}$, $\dot{U}_{CZ}$. При активной нагрузке фазные токи $\dot{I}_{AX}$, $\dot{I}_{BY}$ и $\dot{I}_{CZ}$ совпадают с соответствующими им фазными напряжениями, а линейные токи представляют собой геометрическую разность двух фазных токов, а именно $\dot{I}_B = \dot{I}_{AX} - \dot{I}_{BY}$, $\dot{I}_C = \dot{I}_{BY} - \dot{I}_{CZ}$ и $\dot{I}_A = \dot{I}_{CZ} - \dot{I}_{AX}$. Та же картина напряжений и токов имеет место и во вторичной обмотке и во вторичной цепи.

Посмотрим теперь, как изменится режим работы трансформатора, когда мы откроем первичный и вторичный треугольники (удалена фаза $BY - by$). Так как, согласно условию, первичные линейные напряжения $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$ и $\dot{U}_{CA}$ и соответственно фазные напряжения $\dot{U}_{AX}$ и $\dot{U}_{CZ}$ не изменяются, то, по условию равновесия э. д. с., не могут изменяться ни первичные э. д. с. фаз $A—X$ и $C—Z$, ни магнитные потоки, необходимые для создания этих э. д. с. При отсутствии падений напряжений имеем $\dot{U}'_{ab} = \dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}'_{ca} = \dot{U}_{CA}$, т. е. вторичные напряжения $\dot{U}'_{ab}$ и $\dot{U}'_{ca}$ тоже не изменяются ни по величине, ни по фазе. Так как $\dot{U}'_{ab} + \dot{U}'_{bc} + \dot{U}'_{ca} = 0$ и, следовательно, $\dot{U}'_{bc} = -(\dot{U}'_{ab} + \dot{U}'_{ca})$, то напряжение $\dot{U}'_{bc}$, так же как и напряжения $\dot{U}'_{ab}$ и $\dot{U}'_{ca}$, не претерпевает каких-либо изменений (рис. 19-24, *г*).

Таким образом, если во вторичной цепи находятся какие-нибудь приемники, то при открытом треугольнике и отсутствии падений напряжения они продолжают оставаться под тем же напряжением, как и при закрытом. Поэтому линейные вторичные и соответственно первичные токи остаются без изменения, но фазные токи изменяются как по величине, так и по фазе. Сопоставив распределение токов при закрытом и открытом треугольниках на рис. 19-24, *а* и 19-24, *в*, мы видим, что токи $\dot{I}_{AX}$ в фазах $A—X$ закрытого и открытого треугольников текут в одном направлении, а ток $\dot{I}_{CZ}$ в фазе $C—Z$ открытого треугольника изменяет свой знак по отношению к току $\dot{I}_{CZ}$ при закрытом треугольнике. Поэтому в открытом треугольнике $\dot{I}_{AX} = \dot{I}_B$ и $\dot{I}_{CZ} = -\dot{I}_C$, т. е. ток $\dot{I}_{AX}$ опережает напряжение $\dot{U}_{AB}$ на 30°, а ток $\dot{I}_{CZ}$ отстает от напряжения $\dot{U}_{CA}$ на 30° (рис. 19-24, *г*). Мощность системы, в согласии со сказанным раньше, остается без изменения, так как $3U_\phi I_\phi = 2U_\phi I_\phi \sqrt{3}\cos 30°$. Но при этом обмотки трансформатора в схеме с открытым треугольником оказываются перегруженными по

току в $\sqrt{3}$ раза. Чтобы не допустить перегрева обмоток, необходимо снизить нагрузку по току в $\sqrt{3}$ раза, т. е. до $100/\sqrt{3} = 58\%$ от номинального тока трансформаторной группы.

Несимметрия фазных токов вызывает некоторую несимметрию вторичных напряжений. Сложив геометрически векторы напряжений $\dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}_{CA}$ с соответствующими им векторами э. д. с. $\dot{I}_{AX} Z_к$ и $\dot{I}_{CZ} Z_к$, получаем в результате векторы вторичных напряжений $\dot{U}'_{ab}$ и $\dot{U}'_{cA}$ (рис. 19-24, *д*). Напряжение $\dot{U}'_{bc} = -(\dot{U}'_{ab} + \dot{U}'_{ca})$. Получающаяся несимметрия вторичных линейных напряжений зависит от величины и рода нагрузки и параметров короткого замыкания, т. е. от величины $u_к$. При $u_к = 5{,}5\%$ схема открытого треугольника дает практически симметричные напряжения вплоть до нагрузки каждого из трансформаторов номинальным током.

Работа трехстержневого трансформатора с открытыми первичным и вторичным треугольниками практически не отличается от работы группы, которую мы только что рассмотрели.

Работа трансформатора при открытом треугольнике используется на линиях передачи в начале их эксплуатации, когда они еще слабо нагружены или когда при выходе из строя одного из трех трансформаторов группы все же нужна непрерывная работа при уменьшенной нагрузке. Кроме того, по схеме открытого треугольника включаются измерительные трансформаторы.

Глава двадцатая

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

20-1. Условия параллельной работы трансформаторов

Если по соображениям технической или экономической целесообразности представляется желательным дробление общей трансформаторной мощности, то трансформаторы включаются на параллельную работу.

Параллельно включенные трансформаторы работают наилучшим образом, если соблюдены следующие условия параллельной работы трансформаторов:

1) номинальные первичные напряжения и соответственно номинальные вторичные напряжения всех параллельно работающих трансформаторов должны быть равны, т. е.

$$U_{11} = U_{12} = U_{13} = \ldots = U_{1n} \qquad (20\text{-}1)$$

и

$$U_{21} = U_{22} = U_{23} = \ldots = U_{2n}. \qquad (20\text{-}2)$$

Практически первое условие сводится к требованию, чтобы были равны коэффициенты трансформации, т. е. чтобы было

$$k_1 = k_2 = \ldots = k_n; \qquad (20\text{-}3)$$

2) параллельно работающие трансформаторы должны принадлежать к одной группе;

3) активные и индуктивные составляющие напряжения короткого замыкания всех трансформаторов должны быть равны, т. е.

$$u_{ка1} = u_{ка2} = \ldots = u_{кап} \qquad (20\text{-}4)$$

и

$$u_{кr1} = u_{кr2} = \ldots = u_{крn}. \qquad (20\text{-}5)$$

Практически третье условие сводится к требованию, чтобы были равны напряжения короткого замыкания, т. е. чтобы было

$$u_{к1} = u_{к2} = \ldots = u_{кn}. \qquad (20\text{-}6)$$

Если трансформаторы удовлетворяют всем поставленным выше условиям, то векторные диаграммы их работы под нагрузкой, построенные в относительных единицах, совпадают (рис. 20-1). В этом случае все трансформаторы нагружаются пропорционально их номинальным мощностям, а нагрузочные токи трансформаторов арифметически складываются.

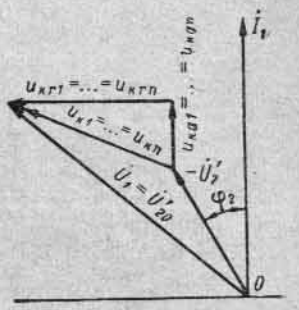


Рис. 20-1. Векторная диаграмма трансформаторов, работающих в наивыгоднейших условиях

На практике должно быть безусловно выполнено только второе условие; первое и третье условия выполняются с известными отступлениями, для которых необходимо установить практически допустимые границы.

20-2. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации

А. Параллельная работа двух трансформаторов при холостом ходе. Предположим, что два параллельно включенных трансформатора *1* и *2* удовлетворяют второму и третьему условиям, но не удовлетворяют первому условию, причем $k_1 < k_2$. Для выяснения сущности явления достаточно рассмотреть параллельную работу однофазных трансформаторов или соответствующих фаз двух трехфазных трансформаторов (рис. 20-2). Будем считать, что напряжение первичной сети равно номинальным первичным напряжениям каждого из параллельно включенных трансформаторов, т. е. $U_1 = U_{1н1} = U_{1н2}$. Тогда

$$U_{21} = \frac{U_1}{k_1} > U_{22} = \frac{U_1}{k_2},$$

причем векторы $\dot{U}_{21} = \overline{OA}_1$ и $\dot{U}_{22} = \overline{OA}_2$ совпадают по фазе (рис. 20-3). Под действием разности напряжений $\dot{U}_{21} - \dot{U}_{22} = \Delta\dot{U} = \overline{OD}$ в трансформаторах *1* и *2* возникает уравнительный ток $I_у$, мгновенное распределение которого в трансформаторах *1* и *2* показано на рис. 20-2 стрелками. Мы видим, что по отношению к току $I_у$ трансформаторы *1* и *2* находятся в режиме короткого замыкания, причем этот ток течет по обмоткам трансформаторов в про-

тивоположных направлениях; соответственно этому на рис. 20-3 уравнительный ток показан двумя векторами: $\dot{I}_{y1}$ в трансформаторе *1* и $\dot{I}_{y2} = -\dot{I}_{y1}$ в трансформаторе *2*.

Если $Z_{к1}$ и $Z_{к2}$ — полные сопротивления короткого замыкания трансформаторов *1* и *2*, то

$$\dot{I}_y = \frac{\Delta\dot{U}}{Z_{к1} + Z_{к2}} = \frac{\dot{U}_1\left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right)}{Z_{к1} + Z_{к2}} = \frac{\dot{U}_1 \frac{k_2 - k_1}{k_1 k_2}}{Z_{к1} + Z_{к2}}. \qquad (20\text{-}7)$$

Чтобы преобразовать эту формулу, примем, что $k_1 k_2 = k^2$ и $U_1/k = U_{2н}$. Здесь k — средний коэффициент трансформации обоих трансформаторов и $U_{2н}$ — среднее значение вторичного номинального напряжения. Так как $u_{ка1} = u_{ка2}$ и $u_{кr1} = u_{кr2}$ (третье условие), то

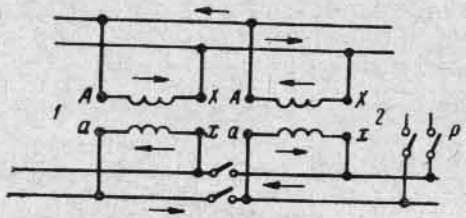


Рис. 20-2. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации

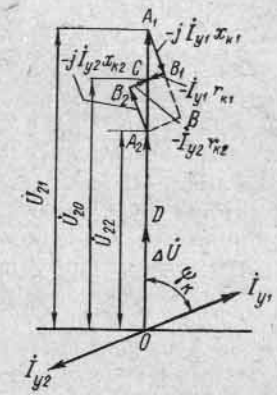


Рис. 20-3. Диаграмма напряжений и уравнительных токов при холостом ходе трансформаторов при $k_1 < k_2$

$$I_y = \frac{\frac{U_1}{k}\frac{k_2 - k_1}{k}}{Z_{к1} + Z_{к2}} = \frac{U_{2н}\frac{k_2 - k_1}{k}\cdot 100}{\frac{Z_{к1} I_{2н1}}{I_{2н1}}\cdot 100 + \frac{Z_{к2} I_{2н2}}{I_{2н2}}\cdot 100} =$$

$$= \frac{\Delta k}{\frac{Z_{к1} I_{2н1}}{U_{2н}}\frac{100}{I_{2н1}} + \frac{Z_{к2} I_{2н2}}{U_{2н}}\frac{100}{I_{2н2}}} = \frac{\Delta k}{\frac{u_{к1}}{I_{2н1}} + \frac{u_{к2}}{I_{2н2}}}. \qquad (20\text{-}8)$$

Здесь $\Delta k = \frac{k_2 - k_1}{k}\cdot 100$ — разность коэффициентов трансформации, выраженная в процентном отношении от их среднего значения; $I_{2н1}$ и $I_{2н2}$ — номинальные значения вторичных токов трансформаторов *1* и *2*.

Обычно ток I_y выражают в процентном отношении от номинального тока одного из трансформаторов, например от $I_{2н1}$ трансформатора *1*.

Тогда

$$I_{y[\%]} = \frac{I_{y1}}{I_{2н1}}\cdot 100 = \frac{\Delta k\cdot 100}{u_{к1} + u_{к2}\frac{I_{2н1}}{I_{2н2}}} = \frac{\Delta k\cdot 100}{u_{к1} + u_{к2}\frac{P_{н1}}{P_{н2}}}, \qquad (20\text{-}9)$$

где $P_{н1}$ и $P_{н2}$ — номинальные мощности трансформаторов *1* и *2*. Пусть, например, $\Delta k = 1\%$; $u_{к1} = u_{к2} = 5{,}5\%$ и $P_{н1}/P_{н2} = 100/100$, 100/320 и $100/\infty = 0$. Тогда $I_{y1} = 9{,}1\%$, 14% и 18,3%.

По фазе ток $\dot{I}_{y1}$ смещен относительно ΔU на угол

$$\psi_к = \operatorname{arctg}\frac{x_{к1} + x_{к2}}{r_{к1} + r_{к2}}. \qquad (20\text{-}10)$$

Токи $\dot{I}_{y1}$ и $\dot{I}_{y2}$ создают в трансформаторах *1* и *2* э. д. с.— $jI_{y1}x_{к1}$, $-I_{y1}r_{к1}$, $-jI_{y2}x_{к2}$ и $-I_{y2}r_{к2}$, геометрически складывающиеся с напряжением U_{21} и соответственно U_{22}.

Если номинальные мощности трансформаторов равны, т. е. $P_{н1} = P_{н2}$, то при $u_{к1} = u_{к2}$ (условие третье) имеем $Z_{к1} = Z_{к2}$. В этом случае треугольники короткого замыкания A_1B_1C и A_2B_2C равны по величине и отрезок A_1A_2 делится в точке C пополам. Таким образом, в данном случае ток $\dot{I}_{y1}$ снижает напряжение $\dot{U}_{21}$ до общего на вторичных шинах напряжения $\dot{U}_{20} = \overline{OC}$, а ток $\dot{I}_{y2}$ повышает напряжение $\dot{U}_{22}$ до того же напряжения $\dot{U}_{20} = \overline{OC}$. В этом именно и состоит роль уравнительного тока.

Если трансформаторы разной мощности, например $P_{н1} < P_{н2}$, то при одинаковых напряжениях $u_{к1}$ и $u_{к2}$ сопротивления $r_к$ и $x_к$ обратно пропорциональны мощностям, т. е. $r_{к1} > r_{к2}$ и $x_{к1} > x_{к2}$. Соответственно этому треугольник A_1B_1C на рис. 20-3 становится больше треугольника A_2B_2C, но остается ему подобным. Следовательно, точка C перемещается вниз по отрезку A_1A_2. В пределе, когда $P_{н2} \gg P_{н1}$, точка C совпадает с точкой A_2 и треугольник A_1B_1C займет положение треугольника A_1BA_2. В этом случае $U_{20} = U_{22} = \overline{OA_2}$.

Б. Параллельная работа двух трансформаторов под нагрузкой. Будем по-прежнему считать, что $k_1 < k_2$, $P_{н1} < P_{н2}$ и что второе и третье условия параллельной работы трансформаторов выполнены.

В основу изучения рассматриваемого режима кладется *метод наложения* двух режимов. Действительно, наличие уравнительного тока обеспечивает равенство вторичных напряжений обоих трансформаторов напряжению $\overline{OC}$ (рис. 20-3). Поэтому когда появляется внешняя нагрузка, то внешний нагрузочный ток распределяется между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. Таким образом, все происходит так, как если бы в каждом из трансформаторов существовали два тока — *уравнительный* I_y и *нагрузочный* ток $I_{нг}$, соответствующий внешней нагрузке. В действительности существует только результирующий ток, представляющий собой геометрическую сумму обоих токов.

Так как при нагрузке вторичные напряжения обоих трансформаторов снижаются практически на одну и ту же величину, то напряжения и соответственно уравнительные токи I_{y1} и I_{y2} в пределах обычных нагрузок не зависят от режима работы трансформаторов.

На рис. 20-4 для уравнительных токов повторено построение рис. 20-3. Нагрузочные токи $\dot{I}_{нг1}$ и $\dot{I}_{нг2}$ трансформаторов *1* и *2* изображены векторами $\overline{OA}$ и $\overline{OB}$ для случая, когда $\frac{\overline{OA}}{\overline{OB}} = \frac{\dot{I}_{нг1}}{\dot{I}_{нг2}} = \frac{P_{н1}}{P_{н2}} = 2$. Векторы $\overline{OA}$ и $\overline{OB}$ сдвинуты относительно вектора напряжения $\dot{U}_2$, например отстают от него, на один и тот же угол φ_2, определяемый параметрами внешней цепи. Результирующие токи трансформаторов 1 и *2* определяются векторами $\overline{OC} = \dot{I}_{нг1} + \dot{I}_{y1} = \dot{I}_{21}$ и $\overline{OD} = \dot{I}_{нг2} + \dot{I}_{y2} = \dot{I}_{22}$.

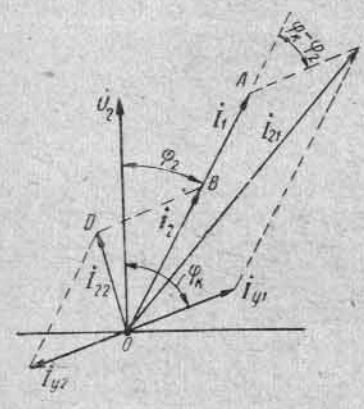


Рис. 20-4. Диаграмма токов при нагрузке для $k_1 < k_2$

Из треугольников OAC и OBD имеем:

$$I_{21} = \sqrt{I_{нг1}^2 + I_y^2 + 2I_{нг1} I_y \cos(\varphi_к - \varphi_2)} \qquad (20\text{-}11)$$

и

$$I_{22} = \sqrt{I_{нг2}^2 + I_y^2 + 2I_{нг2} I_y \cos(\varphi_к + \varphi_2)}\,. \qquad (20\text{-}12)$$

Мерой нагруженности трансформаторов уравнительным током могут служить отношения:

$$\frac{I_{21}}{I_{н1}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{нг1}}\right)^2 + 2\frac{I_y}{I_{нг1}}\cos(\varphi_к - \varphi_2)} \qquad (20\text{-}13)$$

и

$$\frac{I_{22}}{I_{н2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{нг2}}\right)^2 + 2\frac{I_y}{I_{нг2}}\cos(\varphi_к + \varphi_2)}\,. \qquad (20\text{-}14)$$

Из последних выражений видно, что степень перегрузки или недогрузки трансформаторов зависит, во-первых, от величин I_y и $\varphi_к$, определяемых параметрами трансформаторов, и, во-вторых, от угла φ_2, определяемого параметрами внешней цепи.

В частном случае при индуктивной нагрузке и $\varphi_2 = \varphi_к$ имеем:

$$\frac{I_{21}}{I_{нг1}} = 1 + \frac{I_y}{I_{нг1}} \qquad (12\text{-}15а)$$

и

$$\frac{I_{22}}{I_{нг2}} = 1 - \frac{I_y}{I_{нг2}}\,. \qquad (20\text{-}15б)$$

При этом трансформатор *1* перегружен, а трансформатор *2* недогружен.

При емкостной нагрузке и $\varphi_2 = -\frac{\pi}{2} + \varphi_к$

$$\frac{I_{21}}{I_{нг1}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{нг1}}\right)^2} \qquad (20\text{-}16а)$$

и

$$\frac{I_{22}}{I_{нг2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_y}{I_{нг2}}\right)^2}\,, \qquad (20\text{-}16б)$$

т. е. оба трансформатора перегружены.

Пусть, например, $P_{н1} = 100$ *кв·а*; $P_{н2} = 320$ *кв·а*; $I_y/I_{н1} = 0{,}14$; $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ и $\varphi_к = 75°$; тогда $I_{21}/I_{нг1} = 1{,}115$ и $I_{22}/I_{нг2} = 0{,}955$, т. е. за счет уравнительного тока трансформатор *1* перегружен на 11,5%, а трансформатор *2* недогружен на 4,5%.

До сих пор мы предполагали, что $k_1 < k_2$. При обратном отношении коэффициентов трансформации векторы уравнительных токов I_{y1} и I_{y2} поменялись бы своими местами (рис. 20-4). В этом случае был бы перегружен второй, более мощный трансформатор, но если иметь в виду те же численные соотношения, что и выше, то его перегрузка не превышала бы 5%, тогда как трансформатор *1* был бы недогружен.

Эти условия более благоприятны, чем первые. Правда, они изменяются, если перейти к емкостной нагрузке, но такой случай встречается относительно редко. Поэтому при неравенстве коэффициентов трансформации следует предпочесть, чтобы трансформатор меньшей мощности имел больший коэффициент трансформации. Так как трансформаторы нельзя перегружать во избежание перегрева, то, очевидно, необходимо снизить внешнюю нагрузку так, чтобы поставить перегруженный трансформатор в нормальные условия работы. При этом второй трансформатор будет недогружен и система хуже использована. Соответственно приведенным выше данным трансформатор *1* перегружен примерно на 11,5%. Следовательно, на столько же нужно уменьшить внешний нагрузочный ток, чтобы полный ток первого трансформатора не превосходил своего номинального значения.

Из сказанного следует, что сколько-нибудь значительное неравенство коэффициентов трансформации недопустимо. Согласно ГОСТ, для трансформаторов с коэффициентом трансформации меньше 3 и трансформаторов для собственных нужд подстанций $\Delta k \leqslant 1\%$, для всех прочих трансформаторов $\Delta k \leqslant 0{,}5\%$.

20-3. Параллельная работа трехфазных трансформаторов с различными группами соединения обмоток

При параллельном включении двух трехфазных трансформаторов, имеющих одинаковые коэффициенты трансформации, но принадлежащих к различным группам, между зажимами $a_1 - a_2$, $b_1 - b_2$ и $c_1 - c_2$ всегда будет действовать напряжение $\Delta\dot{U} = \dot{U}_{021} - \dot{U}_{022}$, обусловленное углом сдвига α между вторичными напряжениями трансформаторов (рис. 20-5). При равенстве вторичных напряжений

$\dot{U}_{021} = \dot{U}_{022} = \dot{U}_{02}$ величина напряжений $\Delta\dot{U}$ определяется из равнобедренного треугольника Oa_1a_2 как

$$\Delta U = 2U_{02}\sin\frac{\alpha}{2}.$$

Под действием этого напряжения в обмотках трансформаторов появится уравнительный ток I_y, величина которого определяется по уравнению (20-7), а именно:

$$I_y = \frac{\Delta U}{\frac{u_{к1}U_{02}}{I_{21}\cdot 100} + \frac{u_{к2}U_{02}}{I_{22}\cdot 100}} = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2}}{\frac{u_{к1}}{I_{21}\cdot 100} + \frac{u_{к2}}{I_{22}\cdot 100}}. \qquad (20\text{-}17)$$

Из § 15-8 известно, что наименьшее значение угла α может быть $\pi/6$, когда один трансформатор принадлежит, например, к группе Y/Y — 12, а второй — к группе Δ/Y — 11. При равенстве мощностей трансформаторов ($P_1 = P_2$, $I_{21} = I_{22} = I_2$) и при равенстве их напряжений короткого замыкания ($u_{к1} = u_{к2} = u_к$), т. е. в наиболее благоприятном случае — при параллельном включении трансформаторов, даже при холостом ходе уравнительный ток I_y будет

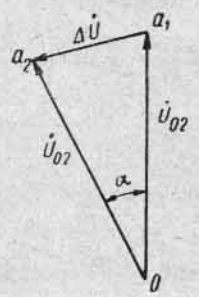


Рис. 20-5. Диаграмма напряжений в случае параллельного включения трехфазных трансформаторов с различными группами соединения обмоток

$$I_y = \frac{2\sin\frac{\pi}{12}}{2\,\frac{u_к}{I_2\cdot 100}}$$

и отношение

$$\frac{I_y}{I_2} = \frac{100\sin\frac{\pi}{12}}{u_к}.$$

При обычном значении $u_к = 5{,}5\%$ для трансформаторов на 6—10 *кв* получим:

$$\frac{I_y}{I_2} = \frac{100\sin\frac{\pi}{12}}{5{,}5} = 4{,}7.$$

Из этого ясно, что параллельная работа трансформаторов, принадлежащих к различным группам, практически невозможна.

Однако она становится возможной, если в обмотках сделать пересоединения, а в некоторых случаях просто перемаркировать зажимы. При этом можно руководствоваться данными табл. 20-1.[1]

[1] Электрические машины. Под ред. проф. Г. Н. Петрова. Госэнергоиздат, 1940.

Для параллельного соединения трансформатора основной группы, например 12, с трансформатором производной группы, например 4, необходимо последний путем круговой перемаркировки зажимов предварительно превратить в трансформатор основной группы.

Таблица 20-1

Группа	12 (4,8)	6 (10,2)	5 (9,1)	11 (3,7)
12 (4,8)	Да	Нет	Нет	Нет
6 (10,2)	Нет	Да	Нет	Нет
5 (9,1)	Нет	Нет	Да	(Да)
11 (3,7)	Нет	Нет	(Да)	Да

Примечания. 1. «Да» — параллельная работа возможна. «Нет» — параллельная работа невозможна.

2. Параллельная работа трансформаторов 5-й и 11-й групп возможна только при соединении зажимов в следующем порядке:

Группа	ВН	НН
5	*ABC*	*abc*
11	*ACB* *CBA* *BAC*	*cba* *bac* *acb*

20-4. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания

Предположим, что первое и второе условия параллельной работы выполнены, но $u_{к1} \neq u_{к2}$. Говоря о напряжениях короткого замыкания, следует иметь в виду, что они могут отличаться друг от друга как по величине, так и в отношении своих составляющих. Сначала рассмотрим влияние второго фактора. Возьмем, например, трансформаторы мощностью 10 и 100 *кв·а*. Согласно ГОСТ, трансформатор на 10 *кв·а* имеет: $u_к = 5{,}5\%$, $u_{ка} = 3{,}35\%$ и $u_{кr} = 4{,}36\%$; соответственно трансформатор на 100 *кв·а* имеет: $u_к = 5{,}5\%$, $u_{ка} = 2{,}4\%$ и $u_{кr} = 4{,}95\%$. Совместив гипотенузы треугольников короткого замыкания AB_1C и AB_2C, получим диаграмму на рис. 20-6. Если пренебречь током холостого хода, то можно считать, что с составляющей $\overline{CB}_1$ совпадает по фазе ток $\dot{I}_{21}$, а с составляющей $\overline{CB}_2$ — ток $\dot{I}_{22}$; следовательно, токи $\dot{I}_{21}$ и $\dot{I}_{22}$ смещены относительно друг друга по фазе на угол $\Delta\varphi_к = \varphi_{к2} - \varphi_{к1}$ и $\dot{I}_c = \dot{I}_{21} + \dot{I}_{22}$. Но, как это видно из диаграммы на рис. 20-6, даже при относительно большой разнице между составляющими $u_{ка}$ и $u_{кr}$ взятых нами трансформаторов угол $\Delta\varphi_к$ весьма невелик, и поэтому можно считать, что токи $\dot{I}_{21}$ и

I_{22} складываются арифметически, т. е.

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{21} + \dot{I}_{22}. \qquad (20\text{-}18)$$

Этот вывод имеет достаточно общий характер, т. е. его можно распространять на любое число трансформаторов.

Теперь предположим, что $u_{к1} \neq u_{к2}$. Так как при параллельной работе трансформаторов первичные и вторичные напряжения совпадают как по величине, так и по фазе, то падения напряжения во всех трансформаторах должны быть равны, т. е.

$$\dot{I}_1 Z_{к1} = \dot{I}_2 Z_{к2} = \ldots = \dot{I}_m Z_{км} = \ldots = \dot{I}_n Z_{кп}.$$

Следовательно,

$$I_1 : I_2 : \ldots : I_m : \ldots I_n = P_1 : P_2 : \ldots : P_m : \ldots : P_n = \\ = \frac{1}{Z_{к1}} : \frac{1}{Z_{к2}} : \ldots : \frac{1}{Z_{км}} : \ldots : \frac{1}{Z_{кп}}, \qquad (20\text{-}19)$$

где $P_1, P_2, \ldots, P_m, \ldots, P_n$ — мощность каждого из параллельно работающих трансформаторов.

Из формулы (20-19) следует, что

$$\frac{P_m}{\sum_1^n P_m} = \frac{\frac{1}{Z_{км}}}{\sum_1^n \frac{1}{Z_{км}}} = \frac{1}{Z_{км}\sum_1^n \frac{1}{Z_{км}}} = \\ = \frac{1}{\frac{I_{нм} Z_{км}}{U_1} \cdot 100 \sum_1^n \frac{\frac{I_{нм}}{I_{им} Z_{км}}}{U_1} \cdot 100} = \frac{1}{\frac{u_{км}}{P_{нм}} \sum_1^n \frac{P_{нм}}{u_{км}}}.$$

Следовательно, мощность m-го трансформатора будет

$$P_m = \frac{\sum_1^n P_m}{\sum_1^n \frac{P_{нм}}{u_{км}}} \frac{P_{нм}}{u_{км}}. \qquad (20\text{-}20)$$

Пусть, например, даны три трехфазных масляных трансформатора по 100 *кв·а*, причем $u_{к1} = 3{,}5\%$, $u_{к2} = 4{,}0\%$ и $u_{к3} = 5{,}5\%$. Общая нагрузка $\sum_1^n P_m = 300$ *кв·а*.

Согласно формуле (20-20), имеем:

$$\sum_1^n \frac{P_{нм}}{u_{км}} = \frac{100}{3{,}5} + \frac{100}{4} + \frac{100}{5{,}5} = 71{,}8.$$

Следовательно,

$$P_1 = \frac{300}{71{,}8} \cdot \frac{100}{3{,}5} = 119{,}5 \text{ кв·а};$$

$$P_2 = \frac{300}{71{,}8} \cdot \frac{100}{4} = 104{,}5 \text{ кв·а}$$

и

$$P_3 = \frac{300}{71{,}8} \cdot \frac{100}{5{,}5} = 76 \text{ кв·а},$$

т. е. первый трансформатор перегружен на 19,5%, а третий недогружен на 24%.

Уменьшая внешнюю нагрузку на 19,5%, мы получим новое распределение нагрузок на трансформаторы: $P_1 = 100$ *кв·а*, $P_2 = 87{,}2$ *кв·а* и $P_3 = 63{,}5$ *кв·а*. В этом случае первый трансформатор будет нормально нагружен, но два других недогружены. Такие условия параллельной работы нельзя признать удовлетворительными. Поэтому ГОСТ требует, чтобы трансформаторы, предназначенные для параллельной работы, имели напряжения короткого замыкания $u_к$, отклоняющиеся от их арифметического среднего значения не более чем на $\pm$ 10%.

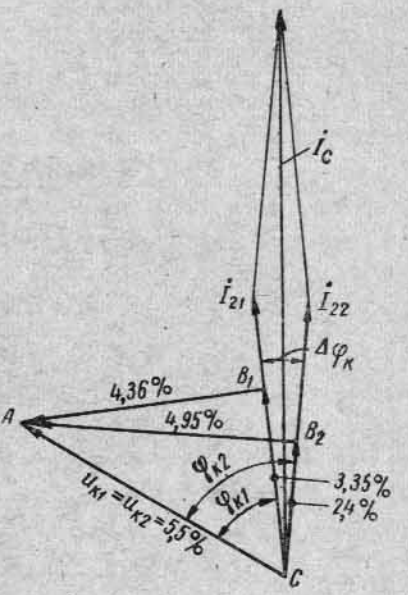


Рис. 20-6. Диаграмма токов при $u_{к1} = u_{к2}$; $u_{ка1} \neq u_{ка2}$; $u_{кr1} \neq u_{кr2}$

Если параллельно работают трансформаторы разной мощности, то лучше, если трансформатор меньшей мощности имеет большее напряжение $u_к$. Действительно, при нагрузке он окажется недогруженным, но это не представляет большого неудобства, так как недогрузка трансформатора меньшей мощности сказывается на общей мощности системы слабее, чем недогрузка большего трансформатора. Наоборот, если бы меньший трансформатор имел меньшее напряжение $u_к$, то он лимитировал бы работу всей системы, поскольку ее нужно было бы разгрузить так, чтобы меньший трансформатор не оказался перегруженным.

Возможные отступления от наиболее благоприятных условий работы тем больше, чем больше разница между мощностями параллельно работающих трансформаторов. Поэтому ГОСТ рекомендует, чтобы для параллельно соединенных трансформаторов отношение наибольшей мощности к наименьшей не превышало 3 : 1.

Глава двадцать первая

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

21-1. Классификация переходных режимов

При всяком изменении одной или нескольких величин, определяющих работу трансформатора: напряжения, частоты, нагрузки и т. д., происходит переход от одного установившегося состояния к другому. Обычно этот переход длится очень короткое время, но тем не менее он может сопровождаться весьма значительными и опасными для трансформатора эффектами — возникновением очень больших механических усилий между обмотками или частями их, крайне неравномерным распределением напряжения между отдельными частями обмоток или даже отдельными витками, резким перегревом обмоток и т. д. Эти эффекты имеют особенно важное значение в современных мощных трансформаторах высокого напряжения. Поэтому современное трансформаторостроение разработало ряд мер, направленных на увеличение механической, электрической и термической прочности трансформаторов.

Смотря по тому, какой фактор — ток или напряжение — определяет в основном переходный режим, различают две главные группы явлений: а) явления сверхтоков и б) явления перенапряжений. Исследование этих явлений имеет весьма важное эксплуатационное значение.

21-2. Сверхтоки

В наиболее отчетливой форме сверхтоки возникают: а) при включении трансформатора на сеть вхолостую и б) при коротком замыкании.

А. Ток включения. Будем считать, что вторичная обмотка трансформатора разомкнута. Мы знаем, что при установившемся режиме работы ток холостого хода силового трансформатора не превышает 10%. Но при включении трансформатора на сеть под напряжение, близкое к номинальному, могут наблюдаться резкие броски тока, во много раз превышающие номинальные значения тока холостого хода. Физически такие броски тока объясняются следующим образом. При установившемся режиме холостого хода данному значению подводимого напряжения $u_1 = ab$ (рис. 21-1) соответствует значение установившегося потока $\Phi_{уст} = ac$. Но если не считаться с потоком остаточного намагничивания, то в момент включения трансформатора на сеть ток i_0 и создаваемый им поток Φ_0 должны быть равны нулю. Поэтому при включении трансформатора на сеть в нем возникает такой по величине свободный поток $\Phi_{св}$, чтобы было $\Phi_{уст} + \Phi_{св} = 0$. Если бы активное сопротивление системы первичной обмотки было равно нулю ($r_1 = 0$), то электромагнитная энергия, соответствующая потоку $\Phi_{св}$, не могла бы рассеяться и поток $\Phi_{св}$ оставался бы постоянным по величине и знаку в течение неопределенного времени (штриховая прямая на рис. 21-1), налагаясь на периодически изменяющийся поток установившегося режима $\Phi_{уст}$. В моменты, когда оба потока направлены по контуру сердечника трансформатора одинаково и, следовательно, арифметически складываются, сталь сердечника может оказаться насыщенной гораздо сильнее, чем при установившемся режиме холостого хода, соответственно чему растет и ток холостого хода, определяемый по кривой намагничивания трансформатора.

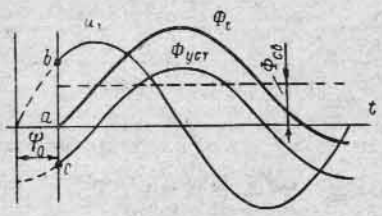


Рис. 21-1. Магнитные потоки при включении трансформатора на сеть

В действительности $r_1 \neq 0$, и поэтому поток $\Phi_{св}$ постепенно затухает.

Будем считать, что подводимое напряжение изменяется синусоидально и не зависит от режима работы трансформатора. В этом случае уравнение э. д. с. при

включении трансформатора можно написать в виде:

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_0) = i_0 r_1 + w_1 \frac{d\Phi_t}{dt}. \qquad (21\text{-}1)$$

Здесь ψ_0 — фаза включения, т. е. фазовый угол, определяющий значение u_1 в момент включения трансформатора на сеть (рис. 21-1).

Так как зависимость $\Phi_t = f_1(i_0)$ носит сложный характер, определяемый кривой намагничивания трансформатора, то решение уравнения (21-1) возможно только при упрощающем предположении, что поток Φ_t является линейной функцией тока i_0, т. е. $\Phi_t w_1 = L_1 i_0$, где L_1 — постоянная индуктивность, соответствующая всему потоку, сцепленному с первичной обмоткой. Тогда уравнение (21-1) приобретает вид:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi_0) = \frac{\Phi_t w_1}{L_1} r_1 + w_1 \frac{d\Phi_t}{dt}$$

или

$$\frac{\Phi_t}{L_1} r_1 + \frac{d\Phi_t}{dt} = \frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \psi_0). \qquad (21\text{-}2)$$

Это уравнение решается обычным путем [10]. Поток Φ_t выражается в виде суммы двух потоков — периодического потока $\Phi_{уст}$, соответствующего установившемуся режиму, и свободного потока $\Phi_{св}$, соответствующего переходному режиму. Таким образом,

$$\Phi_t = \Phi_{уст} + \Phi_{св}. \qquad (21\text{-}3)$$

Поток $\Phi_{уст}$ отстает от подводимого к трансформатору напряжения u_1 почти на 90° (см. рис. 14-7). Поэтому

$$\Phi_{уст} = \Phi_m \sin\left(\omega t + \psi_0 - \frac{\pi}{2}\right) = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi_0), \qquad (21\text{-}4)$$

где Φ_m — амплитуда потока при установившемся режиме работы.

Для определения потока $\Phi_{св}$ приравниваем правую часть уравнения (21-2) нулю и, решая полученное таким образом уравнение, находим:

$$\Phi_{св} = C\varepsilon^{-\frac{r_1}{L_1}t}, \qquad (21\text{-}5)$$

где C — постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий. В момент включения трансформатора на сеть, т. е. при $t = 0$, в сердечнике существует только поток остаточного намагничивания $\pm \Phi_{ост}$. В этом случае уравнение (21-3) напишется в виде:

$$\Phi_t = \pm \Phi_{ост} = -\Phi_m \cos\psi_0 + C,$$

откуда

$$C = \Phi_m \cos\psi_0 \pm \Phi_{ост}.$$

Подставляя это значение C в уравнение (21-5), находим:

$$\Phi_{св} = \Phi_m \cos\psi_0 \varepsilon^{-\frac{r_1}{L_1}t} \pm \Phi_{ост}\varepsilon^{-\frac{r_1}{L_1}t}. \qquad (21\text{-}6)$$

Тогда

$$\Phi_t = \Phi_{уст} + \Phi_{св} = -\Phi_m\left[\cos(\omega t + \psi_0) - \cos\psi_0 \varepsilon^{-\frac{r_1}{L_1}t}\right] \pm \Phi_{ост}\varepsilon^{-\frac{r_1}{L_1}t}. \qquad (21\text{-}7)$$

Наиболее благоприятные условия включения имеют место при $\psi_0 = \pi/2$ и $\Phi_{ост} = 0$. В этом случае

$$\Phi_{уст} = -\Phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin\omega t, \quad \Phi_{св} = 0,$$

т. е. в трансформаторе сразу устанавливается поток, соответствующий установившемуся режиму.

Наименее благоприятны условия включения при $\psi_0 = 0$, т. е. когда $u_1 = 0$ и поток $\Phi_{св}$ противоположен по знаку потоку $\Phi_{уст}$ (рис. 21-2). В этом случае

$$\Phi_t = -\Phi_m \cos \omega t + \Phi_m \varepsilon^{-\frac{r_1}{L_1} t} \pm \Phi_{ост} \varepsilon^{-\frac{r_1}{L_1} t}. \qquad (21\text{-}8)$$

Обычно $\Phi_{ост} = (0{,}2 \div 0{,}3)\,\Phi_{уст}$. В этом случае через полупериод, т. е. при $\omega t = \frac{2\pi}{T}\frac{T}{2} = \pi$, имеем:

$$\Phi_t = \Phi_m + \Phi_m \varepsilon^{-\frac{r_1}{L_1} t} + (0{,}2 \div 0{,}3)\Phi_m \varepsilon^{-\frac{r_1}{L_1} t}.$$

Так как, согласно сказанному выше, $r_1 \ll \omega L_1$, то

$$\varepsilon^{-\frac{r_1}{\omega L_1}\pi} \approx 1$$

и

$$\Phi_{tm} = \Phi_m + \Phi_m + (0{,}2 \div 0{,}3)\,\Phi_m = (2{,}2 \div 2{,}3)\,\Phi_m.$$

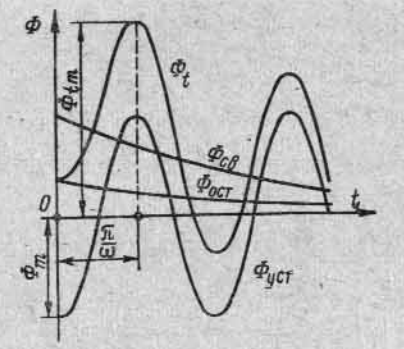


Рис. 21-2. Магнитные потоки при включении трансформатора в момент, когда $\Phi_{св} = -\Phi_{уст}$

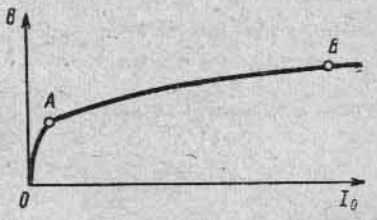


Рис. 21-3. Кривая намагничивания

Намагничивающий ток i_0, необходимый для создания такого потока, определяется по кривой намагничивания. На рис. 21-3 точки A и B на кривой соответствуют нормальному и двойному значению магнитной индукции силовых трансформаторов, т. е. нормальному и двойному значению потока $\Phi_{уст}$. Мы видим, что амплитуда тока включения i_{0m} может превысить амплитуду установившегося тока холостого хода I_{0m} во много раз. Осциллографические записи показывают, что при $B = 1{,}4$ *тл* отношение $i_{0m}/I_{0m} = 50 \div 80$, а при бо́льших индукциях доходит до $100 \div 120$. Если иметь в виду, что ток $I_0 \approx 5\%$ от $I_н$, то ясно, что ток включения может превысить номинальный в 4—6 раз.

На рис. 21-4, *а* показана осциллограмма тока включения при $u_1 = 0$.

Для сравнения на рис. 21-4, *б* показан установившийся ток холостого хода. Так как $r_1 \ll \omega L_1$, то кривая тока включения затухает медленно: еще спустя 1 *сек* после включения трансформатора ток включения в три раза превышает ток i_0. Полное затухание происходит через 6—8 *сек*. Но в мощных трансформаторах высокого напряжения процесс затухает иногда в течение 20 *сек* и более.

Ток включения не представляет опасности непосредственно для трансформатора, но он может привести к выключению его из сети.

Поэтому защитная аппаратура должна быть так рассчитана, чтобы можно было избежать неправильных отключений трансформатора.

Все наши рассуждения относились к однофазному трансформатору. При включении трехфазных трансформаторов всегда следует ожидать более или менее значительных толчков тока, так как всегда будет фаза, напряжение которой в момент включения близко к нулю.

Б. Ток внезапного короткого замыкания. При внезапном коротком замыкании трансформатора, так же как и при испытании его в режиме короткого замыкания, мы можем пренебречь током холостого хода. В этом случае схема замещения трансформатора представляет собой элементарную электрическую цепь с общим активным сопротивлением $r_к = r_1 + r_2'$ и общим индуктивным сопротивлением $x_к = x_1 + x_2' = \omega L_{\sigma 1} + \omega L_{\sigma 2}' = \omega L_к$ (см. рис. 17-3), где $L_к$ — индуктивность рассеяния трансформатора. Так как потоки рассеяния распределяются главным образом в немагнитной среде, то $L_к = \text{const}$. В этом случае уравнение э. д. с. при внезапном коротком замыкании пишется в виде:

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_к) = i_к r_к + L_к \frac{di_к}{dt}. \qquad (21\text{-}9)$$

Здесь $\psi_к$ — фаза включения трансформатора при коротком замыкании, аналогичная фазе включения ψ_0 при холостом ходе (см. рис. 21-1).

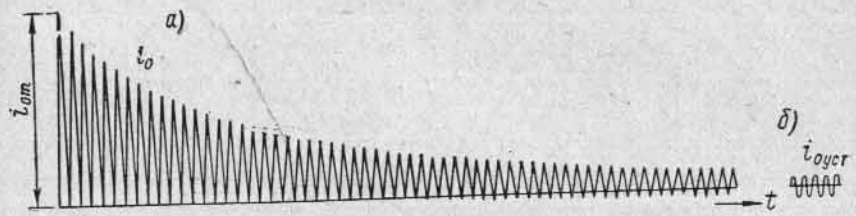


Рис. 21-4. Ток включения холостого хода силового трансформатора

Решая уравнение (21-9) относительно тока $i_к$ и считая, что

$$\varphi_к = \operatorname{arctg}\frac{x_к}{r_к} \approx 90°,$$

получаем:

$$i_к = i_{к.\,уст} + i_{к.\,св} = -\frac{U_{1m}}{\sqrt{r_к^2 + (\omega L_к)^2}} \cos(\omega t + \psi_к) + \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_к^2 + (\omega L_к)^2}} \cos\psi_к \varepsilon^{-\frac{r_к}{L_к} t} = -I_к\sqrt{2}\cos(\omega t + \psi_к) + I_к\sqrt{2}\cos\psi_к \varepsilon^{-\frac{r_к}{L_к} t}. \qquad (21\text{-}10)$$

Здесь $i_{к.\,уст}$ и $i_{к.\,св}$ — мгновенные значения установившегося и свободного токов короткого замыкания; $I_к\sqrt{2} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_к^2 + (\omega L_к)^2}}$ — амплитуда установившегося тока короткого замыкания.

Наименее благоприятные условия короткого замыкания, которые следует учитывать при проектировании трансформаторов, имеют место, когда $\psi_к = 0$, т. е. когда $u_1 = 0$; в этом случае

$$i_{к(\psi_к = 0)} = -I_к\sqrt{2}\cos\omega t + I_к\sqrt{2}\varepsilon^{-\frac{r_к}{L_к} t}. \qquad (21\text{-}11)$$

Если короткое замыкание происходит при номинальном напряжении на зажимах трансформатора, то $I_к\sqrt{2} = \frac{100\cdot\sqrt{2}}{u_к} I_н$, где $u_к$ — напряжение короткого замыкания, выраженное в процентах; $I_н$ — номинальный ток.

В предельном случае, при $r_к/L_к = 0$, ток $i_{св}$ не затухает (штриховая горизонтальная линия на рис. 21-5) и, следовательно, через полупериод от момента внезапного короткого замыкания амплитуда $i_{mк}$ тока внезапного короткого замыкания достигает двойного значения амплитуды установившегося тока короткого замыкания, т. е.

$$\frac{i_{кm}}{I_к\sqrt{2}} = k_к = 2.$$

В реальных трансформаторах ток $i_{к.св}$ затухает тем быстрее, чем больше отношение $r_к/L_к$.

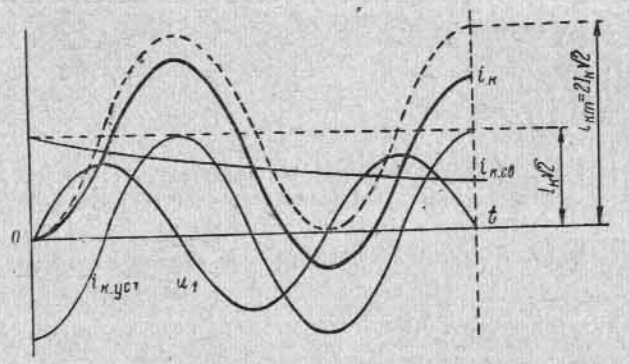


Рис. 21-5. Ток внезапного короткого замыкания при $u_1 = 0$

В трансформаторах малой мощности, для которых $\frac{r_к}{\omega L_к} = \frac{1}{2} \div \frac{1}{3}$, процесс затухает за один-два периода, т. е. $k_к = 1{,}2 \div 1{,}3$.

В трансформаторах большой мощности, где $\frac{r_к}{\omega L_к} < \frac{1}{10}$, $k_к = 1{,}7 \div 1{,}85$.

21-3. Термические явления при коротком замыкании

Хотя короткое замыкание трансформатора длится обычно очень недолго, тем не менее температура его обмоток может достигнуть значений, непосредственно угрожающих целости изоляции.

В настоящее время еще нет установленных пределов для кратковременного нагрева обмоток. Допустимыми считают температуры 200—250° С, но лучше не переходить за предел, определяемый первым значением. Согласно приближенным подсчетам, время t в секундах, в течение которого температура обмотки достигает 250° С, определяется следующей формулой [26]:

$$t \approx 2{,}5\left(\frac{u_к}{j_{ср}}\right)^2. \qquad (21\text{-}12)$$

Здесь $u_к$ — напряжение короткого замыкания и $j_{ср}$ — средняя плотность тока.

Время нагревания обмотки до предельной температуры обычно не превышает 5—25 *сек*. Но время остывания обмотки до рабочей температуры после отключения короткого замыкания часто исчисляется десятками минут. Это объясняется относительно слабой интенсивностью процесса отведения тепла с поверхности обмоток в окружающую среду.

21-4. Механические усилия при внезапном коротком замыкании

Между проводниками, по которым ток протекает в противоположные стороны, как это практически имеет место при коротком замыкании трансформатора, возникают механические усилия $F_1 = -F_2$, показанные на рис. 21-6. Обе силы мы можем разложить на радиальные составляющие F_{x1} и F_{x2} и осевые F_{y1} и F_{y2}. Первые стремятся растянуть наружную обмотку и сжать внутреннюю, вторые — сместить обмотки в осевом направлении. Так как при коротком замыкании $i_1 = i_2' = i_к$, то силы F_1 и F_2 пропорциональны $i_к^2$ и, следовательно, носят периодически переменный характер.

Кроме усилий F_x и F_y, между витками одной и той же обмотки действуют усилия Fi, которые стремятся сжать обмотку по высоте.

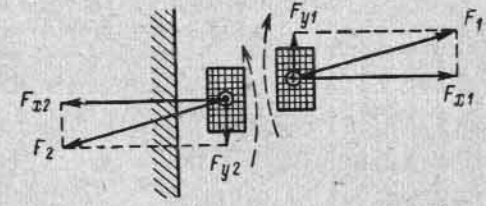


Рис. 21-6. Механические усилия в обмотках трансформатора

На рис. 21-7, *а*, *б* и *в* показаны три типичных случая усилий, действующих при коротком замыкании. Эти усилия имеют место и в обычных условиях работы, но тогда они невелики и не представляют опасности, тогда как при коротком замыкании они увеличиваются в сотни раз и могут повести к аварии трансформатора.

Чтобы рассчитать механические усилия при коротком замыкании, будем исходить из электромагнитной энергии обмоток, соответствующей потоку рассеяния.

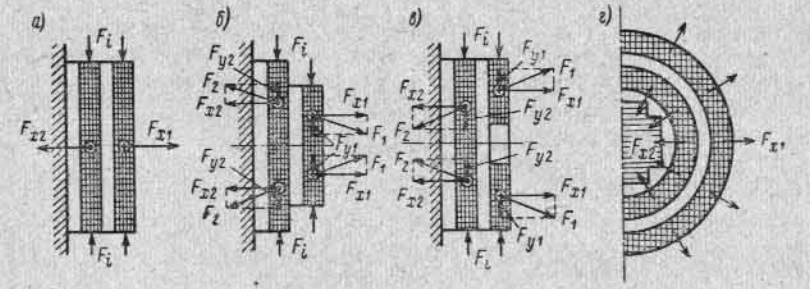


Рис. 21-7. Осевые, радиальные и внутренние силы: *а* — при одинаковой высоте обмоток, *б* — при двустороннем укорочении обмоток; *в* — при регулировочных ответвлениях по средней высоте обмоток; *г* — поперечное сечение обмоток

Пусть $i_к$ — мгновенное значение тока короткого замыкания и $L_к$ — индуктивность рассеяния трансформатора.

Предположим, что за время dt ток $i_к$ не изменяется, а одна из обмоток под действием силы F_x перемещается относительно второй обмотки на расстояние dx по направлению оси X (рис. 21-8). При этом производится механическая работа $dA_x = F_x dx$. С другой стороны, перемещение обмотки вызывает изменение индуктивности $L_к$ и соответственно изменение электромагнитной энергии поля рассеяния на величину $dW_x = \frac{1}{2} i_к^2 \frac{\partial L_к}{\partial x} dx$. Но то же перемещение обмотки ведет к изменению полного потока рассеяния на величину $d\psi_x = i_к dL_к =$

$= i_к \frac{\partial L_к}{\partial x} dx$, соответственно чему в обмотке возникает э. д. с.

$$e_x = -\frac{\partial \psi_x}{\partial t} = -i_к \frac{\partial L_к}{\partial x} \frac{dx}{dt}.$$

Если, пренебрегая падением напряжения, считать, что э. д. с. уравновешивается напряжением u_x, т. е. $u_x = -e_x$, то из сети, питающей трансформатор, будет подведена энергия $dW_с = u_x i_к dt = i_к^2 \frac{\partial L_к}{\partial x} dx$. Эта энергия расходуется на совершение работы dA_x и изменение энергии поля рассеяния на величину dW_x, т. е.

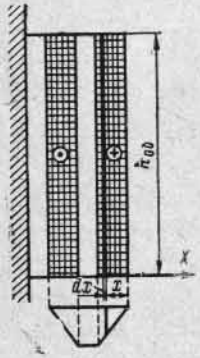


Рис. 21-8. К расчету механических усилий в обмотках

$$dW_с = dA_x + dW_x$$

или

$$i_к^2 \frac{\partial L_к}{\partial x} dx = F_x dx + \frac{1}{2} i_к^2 \frac{\partial L_к}{\partial x} dx,$$

откуда

$$F_x = \frac{1}{2} i_к^2 \frac{\partial L_к}{\partial x}. \qquad (21\text{-}13)$$

Применим эту формулу для определения силы F_x в простейшей обмотке, показанной на рис. 21-7, *а*.

По формуле (17-16) имеем:

$$L_к = \mu_0 w^2 \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}} \delta'.$$

Так как обмотка перемещается по направлению оси абсцисс, т. е. по ширине канала δ, то

$$\frac{\partial L_к}{\partial x} = \frac{\partial L_к}{\partial \delta} = \mu_0 w^2 \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}}.$$

Следовательно,

$$F_x = \frac{\mu_0}{2} (i_к w)^2 \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}}. \qquad (21\text{-}14)$$

Ток $i_к$ достигает наибольшего значения при внезапном коротком замыкании в момент, когда $u_1 = 0$. В этом случае

$$i_к = k_к \frac{100}{u_к} I_{к.ф} \sqrt{2},$$

где $k_к = 1{,}5 \div 1{,}9$ в трансформаторах большой мощности и $k_к = 1{,}2 \div 1{,}3$ в трансформаторах малой мощности. Поэтому

$$F_{xm} = \mu_0 \left(\frac{10^2 k_к I_{к.ф} w}{u_к} \right)^2 \frac{C_{ср} k_\sigma}{h_{об}}. \qquad (21\text{-}15)$$

Эту формулу можно написать в более удобном виде, если принять что $u_к = u_{кх}$ и подставить значение $u_{кг}$ из формулы (17-18).

В окончательном виде

$$F_{xm} = 14{,}5 k_к^2 \frac{k_{ст} P_н}{f u_к \delta'}. \qquad (21\text{-}16)$$

Если $P_н$ выражается в *кв·а*, δ' — в *см*, а F_{xm} мы хотим получить в ньютонах (*н*), то

$$F_{xm} = 148 \cdot 9{,}81 k_к^2 \frac{k_{ст} P_н}{f u_к \delta'} \cdot 10^3. \qquad (21\text{-}17)$$

Так, например, в трансформаторе МТЗ имеем:

$$P_н = 5600 \text{ кв·а}; \; U_1 = 35 \text{ кв}; \; k_{ст} = 1/3; \; f = 50 \text{ гц};$$
$$u_к = 7{,}3\%; \; \delta' = 6{,}15 \text{ см}.$$

Для трансформатора такой мощности $k_к = 1{,}55$. Тогда

$$F_{xm} = 148 \cdot 1{,}55^2 \cdot 9{,}81 \frac{5600}{3 \cdot 50 \cdot 7{,}3 \cdot 6{,}15} \cdot 10^3 = 2894 \cdot 10^3 \text{ н}.$$

Как мы уже говорили, эта сила, направленная по оси витка в обе стороны от любого сечения его, стремится разорвать внешнюю обмотку. Если w — число витков данной обмотки и S — площадь поперечного сечения витка, то разрывающее усилие на единицу этой площади будет

$$F_{рз} = \frac{F_{xm}}{2\pi w S}. \qquad (21\text{-}18)$$

Во взятом выше трансформаторе $w_1 = 571$ и $S_1 = 2{,}07$ *мм*^{2}; следовательно, $F_{рз} = 39{,}8$ *н/мм*^{2}. Обычно допускают $F_{рз} < 5 \div 60$ *н/мм*^{2}.

Так как в трансформаторах нормальной конструкции силы F_y и F_t обычно гораздо меньше, чем сила F_x, то расчет этих сил здесь не приводится.

21-5. Причины и характер перенапряжений в трансформаторах

Перенапряжением в трансформаторе может быть названо всякое повышение напряжения сверх наибольшего рабочего напряжения.[1] Но обычно под перенапряжениями понимают кратковременные процессы, имеющие характер отдельных коротких импульсов, носящих периодический или апериодический характер.

Причинами перенапряжения могут быть:

1) явления атмосферного характера: прямые удары молнии в линию передачи, явления электромагнитной индукции в линии при разрядах облаков и электростатической индукции от заряженных облаков, электризации проводов линии ветром при участии мелких частиц пыли, снега и т. д.;

2) коммутационные процессы — включение, выключение, быстрые изменения нагрузок и т. д., сопровождающиеся резким изменением электромагнитной энергии системы;

3) процессы аварийного характера: короткие замыкания и отключения, повторные заземляющие дуги и т. д.

Характер процессов, происходящих в трансформаторе при перенапряжениях, зависит от формы электромагнитной волны. Различают: а) апериодические волны простые (рис. 21-9, *а*) и сложные (рис. 21-9, *б*), из которых первые чаще всего наблюдаются при атмосферных перенапряжениях, и б) периодические волны (рис. 21-9, *в*), наблюдаемые при коммутационных процессах.

Исследования показали, что а) перенапряжения, вызываемые процессами включения и выключения, могут превышать номинальное фазное напряжение в 2—5 раз; б) перенапряжения аварийного порядка — в 7—8 раз и в) перенапряжения, вызываемые атмосферными причинами,— в 7—12 раз. *Перенапряжения, превышающие рабочее напряжение линии в 2$^1/_2$ раза, считаются безопасными; при превышении его в 3 $^1/_2$ раза они являются уже опасными.*

---

[1] Установлены следующие наибольшие рабочие напряжения трансформаторов в зависимости от напряжения, на которое рассчитана изоляция обмоток:

Напряжение, на которое рассчитана изоляция обмоток, *кв*	3	6	10	15	20	35	110	154	220
Наибольшее рабочее напряжение, *кв*	3,5	6,9	11,5	17,5	23	40,5	121	169	242

Достигающие зажимов трансформаторов перенапряжения могут быть ограничены теми или иными мерами защиты. Гораздо опаснее те перенапряжения, которые возникают внутри трансформатора при распределении электромагнитной волны вдоль обмотки и при которых напряжения между отдельными катушками или даже отдельными витками обмотки могут во много раз превысить нормальные напряжения между ними при установившемся режиме работы трансформатора. Опыт показывает, что чаще всего повреждаются витки, ближайшие к выводам трансформатора, но, вообще говоря, перенапряжения и соответственно пробои изоляции могут возникнуть в любой точке обмотки в зависимости главным образом от ее характеристик. Пробой изоляции влечет за собой выход трансформатора из строя и нарушение нормальных условий эксплуатации данной установки. С этой точки зрения понятно, что перенапряжения в трансформаторах служили объектом многочисленных исследований и наблюдений.

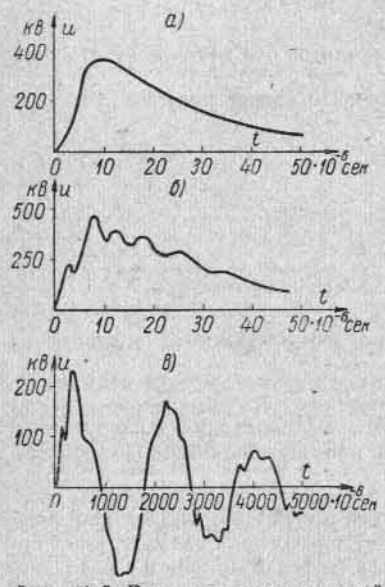


Рис. 21-9. Волны перенапряжений

Следует, однако, иметь в виду, что процессы, сопровождающие распространение волны перенапряжения в трансформаторе, отличаются чрезвычайной сложностью и в полном объеме не поддаются математическому анализу. Приходится делать ряд упрощающих предположений, которые дают возможность свести явление к относительно простому виду и выяснить его основной характер. Тем не менее полученные результаты позволили сделать ряд ценных выводов и послужили толчком к развитию новых точек зрения на перенапряжения и, в частности, к развитию нового, так называемого грозоупорного типа трансформатора.

21-6. Схема замещения трансформатора при перенапряжениях

Мы рассмотрим только простейший случай перенапряжений в трансформаторе, когда имеется лишь одна обмотка ВН трансформатора, на которую набегает волна перенапряжения со стороны линейного зажима A (рис. 21-10), причем другой зажим X (нейтраль) может быть или изолирован, или заземлен.

При установившемся режиме работы ток протекает практически только по обмотке трансформатора, встречая на своем пути активные и индуктивные сопротивления. Но при перенапряжениях картина явления коренным образом изменяется. Действительно, процессы, связанные с перенапряжениями, протекают с чрезвычайной быстротой и воспринимаются трансформатором как колебательные процессы весьма высокой частоты. В этом случае индуктивное сопротивление трансформатора становится весьма большим, тогда как емкостное сопротивление, наоборот, уменьшается. В пределе можно считать, что при перенапряжениях ток протекает только по емкостным сопротивлениям (емкости C данной части обмотки, например катушки, относительно соседней части и емкости обмоток на землю $C_з$). Для упрощения анализа емкости между отдельными обмотками не учитываются. В этих условиях эквивалентная схема трансформатора имеет вид, показанный на рис. 21-10.

Так как емкости C соединены последовательно, то емкость по длине обмотки составляет

$$C_{об} = \frac{1}{n} C, \qquad (21\text{-}19а)$$

где n — число элементов (катушек), из которых состоит обмотка.

Емкости на землю $C_з$ соединены параллельно, поэтому емкость обмотки относительно земли

$$C_{з1} = nC_з. \qquad (21\text{-}19б)$$

Емкости $C_{об}$ и $C_{з1}$ можно заменить одной эквивалентной, или так называемой входной емкостью:

$$C_{вх} = \sqrt{C_{об} C_{з1}}. \qquad (21\text{-}19в)$$

При анализе процессов, происходящих в трансформаторе при перенапряжении, мы будем исходить из предположения, что на трансформатор набегает бесконечно длинная волна с прямоугольным фронтом. Как известно, волна перенапряжения распространяется вдоль линии со скоростью $v = 1/\sqrt{LC_л}$, где L и $C_л$ — индуктивность и емкость на единицу длины линии; для воздушных линий эта скорость близка к скорости распространения света. При этом одной из основных характеристик линии является ее волновое сопротивление $z = \sqrt{L/C_л}$; для воздушных линий $z \approx 350 \div 450$ *ом*; для кабельных линий вследствие значительно большей их емкости $z \approx 50$ *ом*. Волновое сопротивление трансформаторов в несколько раз больше, чем сопротивление воздушных линий, причем оно изменяется в зависимости от характера или частоты колебаний.

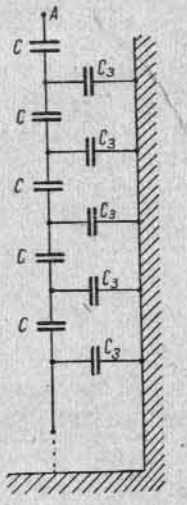


Рис. 21-10. Упрощенная схема замещения обмотки ВН при волновом процессе в трансформаторе

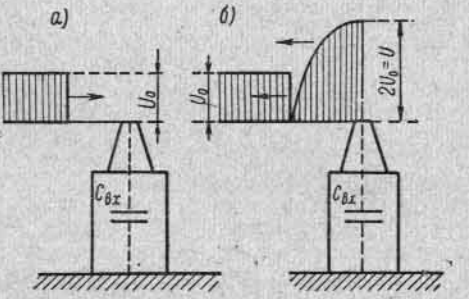


Рис. 21-11. Отражение волны с прямоугольным фронтом

Как известно [10], при переходе волны напряжения из цепи с меньшим волновым сопротивлением — в данном случае из линии — в цепь с бóльшим волновым сопротивлением — в трансформатор — напряжение на зажимах трансформатора увеличивается и в пределе может удвоиться (рис. 21-11, *а*, *б*). Время, за которое напряжение U_0 на входном зажиме трансформатора возрастает до двойного значения $2U_0 = U$, весьма невелико — порядка 0,1 *мксек*. За это время, т. е. практически мгновенно, емкостная цепь трансформатора (см. рис. 21-10) заряжается, и создается картина начального распределения напряжения вдоль обмотки. Эта картина может весьма резко отличаться от картины распределения напряжения в обмотке при установившемся режиме.

Поскольку в последующем течении процесса обмотка представляет собой сложное сочетание емкостей и индуктивностей, переход от ее начального состояния к равновесию происходит путем колебательного процесса, постепенно затухающего из-за активного сопротивления обмотки и проводимости изоляции.

21-7. Начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора

Рассмотрим схему на рис. 21-10, считая, что конец X обмотки заземлен. Если бы емкостей на землю не было ($C_з = 0$), то все емкости C были бы соединены последовательно между собой и по всей такой цепи шел бы ток одной и той же величины. При равенстве емкостей C мы получили бы равномерное распределение напряжения по длине обмотки, т. е. такое же, как и при установившемся режиме работы. На рис. 21-12, *а* такое распределение изображается наклонной прямой, соединяющей точки M и N, отвечающие соответственно входному зажиму обмотки, находящемуся под напряжением U, и концу ее, имеющему потенциал, равный нулю.

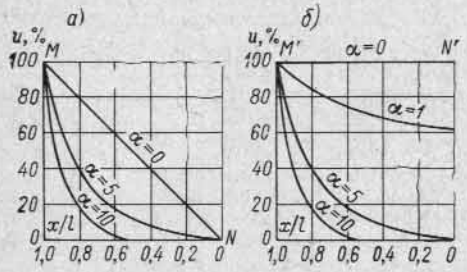


Рис. 21-12. Распределение напряжений в начальный момент в трансформаторах: *а* — с заземленной нейтралью; *б* — с изолированной нейтралью

Наоборот если бы не было емкостей C ($C = 0$), то ток протекал бы из линии на землю только через первую от начала обмотки емкость $C_з$. Физически это значит, что все напряжение сосредоточивается на первом витке, который поэтому является весьма перенапряженным. На рис. 21-12, *а* такое распределение напряжения изображается вертикальной прямой, соединяющей точку M и начало координат.

Действительное распределение напряжения по длине обмотки лежит между этими двумя параллельными картинами распределения. Выясним характер распределения напряжения на частном примере. Предположим, что обмотка ВН

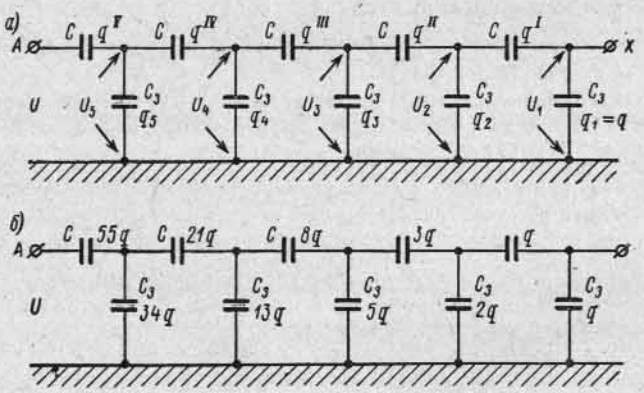


Рис. 21-13. Начальное распределение напряжения вдоль обмоток трансформатора

состоит из $n = 5$ звеньев и что $C = C_з$ (рис. 21-13, *а*). Пусть $U_1, U_2, \ldots, U_5$ — напряжения на зажимах конденсаторов $C_з$, причем счет элементов и соответствующих им емкостей поведем от конца обмотки X к ее началу A. Тогда $U_1 = q_1/C_з = q/C_з$, где $q_1 = q$ — заряд первого от конца обмотки конденсатора $C_з$. Так как конденсаторы $C_з$ и C соединены последовательно, то заряд $q^{I} = q$. В этом случае напряжение $U_2 = q_2/C_з$, но так как $U_2 = U_1 + q^{I}/C_з = q/C_з + q/C_з = 2q/C_з$, то $q_2 = 2q$. Соответственно $q^{II} = q_2 + q^{I} = 2q + q = 3q$. Это позволяет определить заряд q_3, а именно: $U_3 = q_3/C_з$ или $U_3 = U_2 + q^{II}/C_з = 2q/C_з + 3q/C_з = 5q/C_з$; следовательно, $q_3 = 5q$. Продолжая дальше подсчет зарядов, получаем цепочку на рис. 21-13, *б*, причем $q^{III} = q_3 + q^{II} = 5q + 3q = 8q$; $q_4 = q^{III} + q_3 = 13q$; $q^{IV} = q_4 + q^{III} = 21q$; $q_5 = q^{IV} + q_4 = 34q$ и $q^{V} = q_5 + q^{IV} = 55q$.

Более подробный математический анализ показывает, что напряжение вдоль цепочки, заменяющей обмотку, распределяется по закону гиперболических функций, причем напряжение u_x относительно земли в любой точке, находящейся на расстоянии x от конца обмотки, определяется выражениями:

а) при заземленной нейтрали

$$u_x = \frac{U \operatorname{sh} \frac{\alpha x}{l}}{\operatorname{sh} \alpha}; \qquad (21\text{-}20)$$

б) при изолированной нейтрали

$$u_x = \frac{U \operatorname{ch} \frac{\alpha x}{l}}{\operatorname{ch} \alpha}. \qquad (21\text{-}21)$$

Здесь U — напряжение на выводах трансформатора (см. рис. 21-11, *б*); $\alpha = \sqrt{C_{з1}/C_{об}}$; l — полная длина обмотки трансформатора. В современных трансформаторах $\alpha = 5 \div 15$; поэтому выражения (21-20) и (21-21) дают практически одну и ту же картину начального распределения напряжения для обоих рассматриваемых случаев, т. е. как для заземленной нейтрали, так и для изолированной нейтрали (см. рис. 21-12, *а* и *б*). В рассмотренном нами выше частном случае имеем: $C_{з1} = 5C$, $C_{об} = C/5 = C_з/5$ и $\alpha = \sqrt{C_{з1}/C_{об}} = 5$. Нетрудно убедиться, что кривая распределения напряжения, соответствующая цепочке на рис. 21-13, *б*, практически точно совпадает с кривой для $\alpha = 5$, построенной по формулам (21-20) или (21-21) на рис. 21-12, *а* и *б*.

Для расчета электрической прочности обмотки необходимо знать градиент напряжения между двумя соседними элементами (катушками, витками) обмотки. Из кривых на рис. 21-12, *а* и *б* видно, что в первый момент времени наибольший градиент напряжения имеет место в начале обмотки на ее первых витках, т. е. при $x = l$. По величине этот градиент определяется первой производной $\partial u_x/\partial x$. Определяя из выражений (21-20) и (21-21) значения этой производной и учитывая, что при $\alpha \geqslant 3$ имеем $\operatorname{th} \alpha \approx \operatorname{cth} \alpha \approx 1$, получаем в обоих случаях:

$$\left[\frac{\partial u_x}{\partial x}\right]_{x=l} = \frac{U}{l}\alpha. \qquad (21\text{-}22)$$

Первый множитель в выражении (21-22) дает величину градиента напряжения при равномерном распределении напряжения вдоль обмотки, а второй показывает, что в начальный момент времени ближайшие ко входу A элементы обмотки находятся под напряжением, в $\alpha = 10 \div 15$ раз бóльшим, чем при равномерном распределении напряжения. Это заставляет принимать меры для защиты изоляции обмотки от пробоя.

21-8. Переходный процесс и конечное распределение напряжения

Показанные на рис. 21-12, *а* и *б* кривые распределения напряжения при $\alpha = 10$ соответствуют начальному моменту процесса, т. е. $t = 0$. После этого начинается переходный процесс, в конце которого — через достаточный промежуток времени — волна напряжения распределяется равномерно вдоль обмотки. При заземленной нейтрали конечное распределение напряжения изображается наклонной линией MN на рис. 21-14, *а*, а при изолированной нейтрали вся обмотка приобретает в конечный момент времени один и тот же потенциал, изобра-

женный на рис. 21-14, *б* прямой $M'N'$, параллельной оси абсцисс. Как мы уже говорили выше, переход от начального распределения напряжения к конечному совершается путем колебаний, протекающих во времени и пространстве. Анализ процесса на этой стадии представляет значительную сложность, так как приходится учитывать влияние существующих между частями обмотки связей, которые не могут быть выражены каким-либо простым законом.

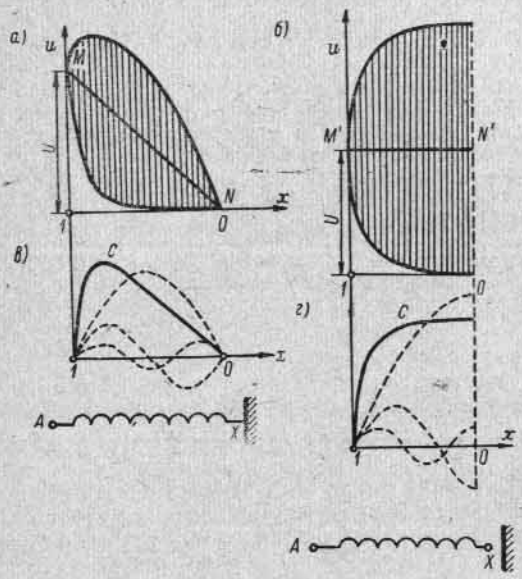


Рис. 21-14. Переходный процесс в трансформаторе: *а* и *в* — с заземленной нейтралью; *б* и *г* — с изолированной нейтралью

В зависимости от того или иного допущения, которое мы делаем относительно указанных связей, получается то или иное выражение для закона протекания колебания в обмотке трансформатора. При самых простых допущениях искомое выражение получается как интеграл дифференциального уравнения в частных производных не ниже четвертого порядка. Подробный анализ дает следующие результаты: а) процесс, происходящий в обмотке, является периодическим и затухает по закону экспоненциальной функции; напряжение изменяется в пространстве по координате x, т. е. по длине обмотки, и во времени в каждой точке последней; б) конечное распределение напряжения (линии MN и $M'N'$ на рис. 21-14, *а* и *б*) можно рассматривать, как оси, относительно которых происходит колебательный процесс; пределы возможных колебаний лежат в заштрихованных областях на рис. 21-14, *а* и *б*; в) разность между конечным и начальным распределениями напряжения можно разложить в ряд гармонических, причем для трансформаторов с заземленной нейтралью получается ряд, состоящий из одной, двух, трех и т. д. полуволн (рис. 21-14, *в*), а для трансформаторов с изолированной нейтралью — ряд, состоящий из $^1/_4$, $^3/_4$, $^5/_4$ и т. д. волны (рис. 21-14, *г*); во времени высшие гармонические пульсируют с частотой f_n, пропорциональной порядку гармонической ν.

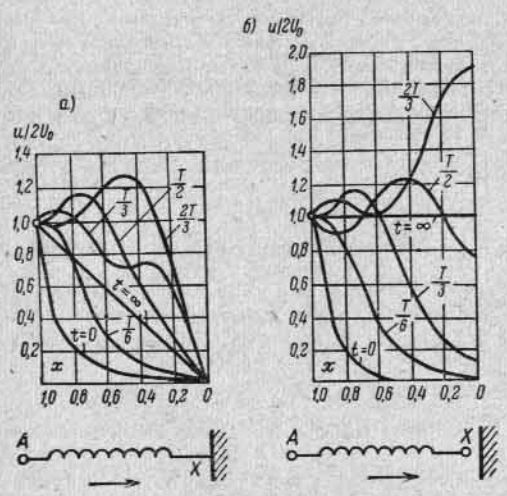


Рис. 21-15. Распределение напряжения вдоль обмотки в различные моменты времени: *а* — при заземленной нейтрали; *б* — при изолированной нейтрали

Гармонические напряжения разных порядков распространяются вдоль обмотки

с разными скоростями, поэтому проникающая в обмотку волна непрерывно деформируется. Рис. 21-15, *а* для заземленной и рис. 21-15, *б* для изолированной нейтрали показывают примерное распределение напряжения вдоль обмотки в различные моменты времени, причем на кривых обозначено время в долях периода колебания с момента установления начального распределения напряжения. Кроме того, анализ позволяет заключить, что волновое сопротивление обмотки трансформатора не является величиной постоянной, но представляет собой функцию от порядка гармонической. Как в отношении деформации волны, так и волнового сопротивления трансформатор резко отличается от линии передачи, по которой волна распределяется почти без искажения, причем линия имеет постоянное волновое сопротивление для всех волн и импульсов.

Аналогичным образом ведется рассмотрение более сложных явлений при набегании на трансформатор апериодического импульса любой формы. Если импульс имеет характер высокочастотного колебания, то возникает опасность резонанса импульса данной частоты и одной из гармонических. В результате можно считать, что в трансформаторе могут возникнуть значительные градиенты напряжения как между обмоткой трансформатора в данной ее точке и землей, так и между соседними частями обмотки. В каждом из этих случаев трансформатор может потерпеть аварию, часто надолго выводящую его из строя.

21-9. Защита трансформаторов от перенапряжений

Меры защиты трансформатора от перенапряжений бывают двух родов — внешние и внутренние. Меры внешней защиты имеют целью в необходимой степени обезвредить набегающую на трансформатор волну, снизив ее амплитуду и сделав ее более пологой. К мерам внешней защиты относятся: правильный выбор трассы линии электропередачи, устройство заземляющих тросов, установка разрядников разного рода, а также координация изоляции всей системы с помощью специальных искровых промежутков, называемых *координаторами* с таким расчетом, чтобы изоляция обмоток оказалась сильнейшей во всей системе.

Применявшиеся ранее в качестве защитных мероприятий реактивные катушки и конденсаторы в настоящее время не используются, так как опыт показал, а затем анализ подтвердил, что эффективность такой защиты недостаточна.

Внутренними мерами защиты трансформатора от перенапряжений являются: необходимое *усиление изоляции входных и концевых катушек*, где, как это мы видели выше, могут появиться наибольшие градиенты напряжения; *емкостная защита* трансформаторов.

В настоящее время выполняемые в СССР силовые трансформаторы (масляные) на напряжения до 38,5 *кв* включительно имеют защиту от перенапряжений только в виде усиленной изоляции концевых катушек обмотки ВН. Нормальные катушки таких трансформаторов имеют изоляцию толщиной 0,5 *мм* на обе стороны, тогда как катушки с усиленной изоляцией имеют соответственно 1,4 *мм*. Так как в этом случае ухудшается отвод тепла, то плотность тока в катушках с усиленной изоляцией на 20—30% меньше, чем в нормальных катушках. Число катушек с усиленной изоляцией составляет 5—7% от общего числа катушек обмотки.

В трансформаторах на 110 *кв* и выше наряду с усилением изоляции концевых катушек применяется емкостная защита, выполняемая так, чтобы импульсы перенапряжения распределялись вдоль обмотки приблизительно так же, как и при конечном распределении напряжения, т. е. достаточно равномерно. В такой обмотке не могут иметь места сильные колебательные процессы и, следовательно, не могут возникнуть чрезмерные градиенты напряжения между частями обмотки. Трансформаторы, снабженные такой защитой, называются *нерезонирующими* или *грозоупорными*.

Идея емкостной защиты состоит в следующем. Если бы можно было выполнить обмотку так, чтобы емкость на землю $C_{з1} = 0$, то мы имели бы $\alpha = \sqrt{C_{з1}/C_{об}} = 0$; в этом случае, как это следует из кривых на рис. 21-12, *а* и *б*, распределение напряжения вдоль обмотки сразу, т. е. с первого момента подхода волны перенапряжения к трансформатору, приобрело бы равномерный

характер. Физически невозможно устранить емкости на землю, но можно скомпенсировать токи, необходимые для заряда этих емкостей, токами, протекающими из линии через систему присоединенных к обмотке экранирующих защитных емкостей $C_э$.

Конструктивно защитные емкости могут быть осуществлены по-разному. На рис. 21-16, *а* показана система с заземленной нейтралью, в которой защитная емкость осуществляется посредством особого экранирующего щита, выполненного из изолирующего материала с металлизированной поверхностью и присоединенного к линейному концу обмотки. При соответствующем подборе защитных емкостей ток, необходимый для заряда данной емкости на землю, например ток I_2 для заряда емкости на землю C_{32}, подается непосредственно через защитную емкость $C_{э2}$, минуя цепь последовательно соединенных емкостей C между катушками C. Поэтому схему на рис. 21-16, *а* можно заменить схемой на рис. 21-16, *б*. Левая часть ее состоит из емкостей и, следовательно, представляет собой нерезонирующую систему. Правую часть той же схемы образуют

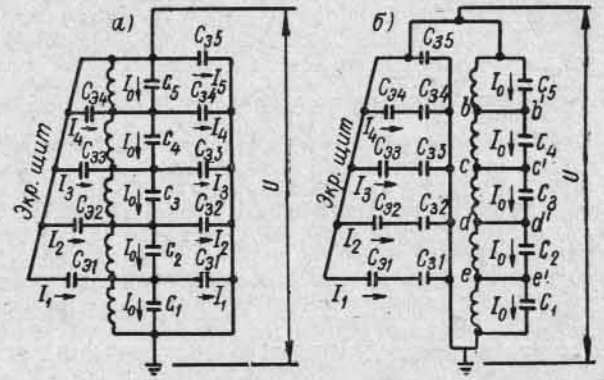


Рис. 21-16. Схемы замещения нерезонирующего трансформатора

две параллельные ветви, одна из которых состоит из ряда последовательно соединенных индуктивностей, а другая — из такого же ряда последовательно соединенных емкостей между катушками. Все звенья каждой цепи одинаковы; поэтому на каждое звено в каждой цепи приходится одно и то же напряжение, а по каждой цепи течет по всей ее длине ток данной величины. В перемычках bb', cc' и т. д. токов нет, т. е. все происходит так, как если бы обе цепи были электрически независимы друг от друга. Следовательно, правая часть схемы, так же как и левая, представляет собой нерезонирующую систему.

Емкостная защита в форме экранирующих щитов осложняет конструкцию трансформатора. Поэтому на МТЗ была разработана оригинальная система частичной емкостной защиты (авторы С. И. Рабинович, С. Ю. Кронгауз, А. М. Чертин и А. Г. Перлин). В схематическом виде эта защита показана на рис. 21-17. Защитные приспособления состоят из а) катушки A, имеющей усиленную изоляцию толщиной 3,5—5 *мм* на сторону; *б*) катушки B с такой же, как у катушки A, усиленной изоляцией и прибандажированным к катушке емкостным экраном $ЕЭ$ и в) четырех катушек C, имеющих нормальную изоляцию и защищенных каждая емкостным экраном $ЕЭ$.

Катушки с усиленной изоляцией выполняются из проводников в 1,5—2 раза большего сечения, чем остальные катушки с соответственно меньшей допускаемой в них плотностью тока.

Емкостные экраны выполняются из медных проводников того же сечения, что и катушка, которую они защищают, и присоединяются к линейному концу

обмотки, т. е. имеют потенциал линии. Проводник экрана надежно изолируется от катушки слоем изоляции толщиной 5 *мм* на сторону. Расстояние между катушкой и экраном определяет необходимую величину защитной емкости. Емкостный экран должен быть разомкнут (чтобы избежать образования замкнутого на себя витка) и охватывает катушку по длине, составляющей примерно $^2/_3$ длины ее окружности.

Так как градиенты напряжения достигают наибольшей величины на входной катушке, то существенно важно по возможности равномерно распределить напряжение между ее витками. С этой целью в современных мощных трансформаторах в дополнение к емкостным экранам применяют емкостное кольцо, которое может быть выполнено из спрессованного электрокартона и представляет собой шайбу толщиной 8—10 *мм* со скругленными краями, обмотанную медной

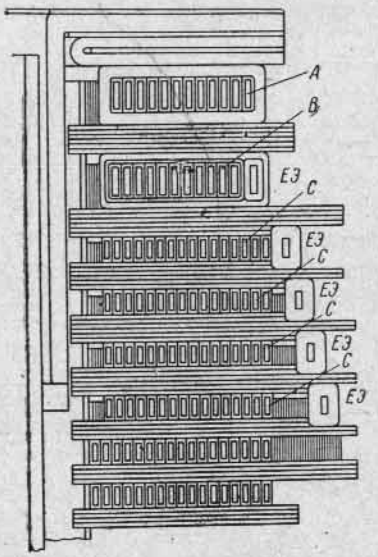


Рис. 21-17. Защита обмотки от перенапряжения посредством емкостных экранов

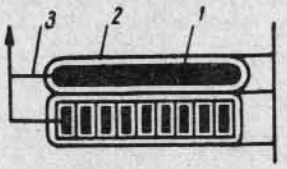


Рис. 12-18. Емкостное кольцо

1 — емкостное кольцо; *2* — изоляция емкостного кольца; *3* — присоединение к вводу

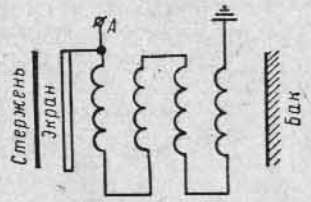


Рис. 21-19. Схема экранированной многослойной обмотки

лентой с наложенной поверх нее изоляцией (рис. 21-18). Медная лента соединяется с помощью специального кабеля с линейным или нейтральным концом обмотки. Емкостное кольцо, так же как емкостный экран, должно быть электрически разомкнутым.

Опыт эксплуатации свидетельствует, что трансформаторы, защищенные описанным выше способом, устойчивы в отношении наиболее опасных по своему характеру атмосферных перенапряжений; поэтому такие трансформаторы часто называют грозоупорными.

С той же целью защиты трансформаторов от перенапряжений применяется многослойная цилиндрическая обмотка (рис. 21-19). В этой конструкции емкость между слоями $C_{об}$ значительно больше емкости относительно земли $C_{э1}$. Следовательно, коэффициент $\alpha = \sqrt{C_{э1}/C_{об}}$ невелик и начальное распределение напряжения мало отличается от установившегося. Для выравнивания емкости между слоями и устранения влияния емкости обмотки на стержень применяют один или два цилиндрических экрана по схеме на рис. 21-19.

Глава двадцать вторая

НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

22-1. Предварительные замечания

Проблема нагревания и охлаждения трансформаторов принципиально та же, что и для вращающихся машин, с той разницей, что у трансформатора не имеется вращающихся частей, как в электрических машинах, что влияет на вентиляцию и соответственно на нагревание последних. Так же как и в машинах, потери, выделяющиеся в сердечнике и обмотках трансформатора при его работе, преобразовываются в тепловую энергию и вызывают нагревание соответствующих частей трансформатора. От места своего выделения тепло направляется под действием тепловых градиентов к тем местам, где оно может быть передано охлаждающей среде, т. е. воздуху или воде в зависимости от способа охлаждения трансформатора. Рассеяние тепла происходит так же, как в электрических машинах, путем лучеиспускания и конвекции.

Теория нагревания и охлаждения твердого тела, лежащая в основе анализа теплового режима работы электрических машин, распространяется и на трансформаторы. В дальнейшем будем иметь в виду масляный трансформатор как основной тип силового трансформатора. По сравнению с тепловым режимом вращающихся машин тепловой режим этого трансформатора имеет ряд специфических особенностей, нуждающихся в дополнительном рассмотрении.

22-2. Способы охлаждения масляных трансформаторов

Тепловой режим масляного трансформатора в сильной степени зависит от способа его охлаждения. Различают трансформаторы: а) с естественным масляным охлаждением; б) с форсированным воздушным охлаждением — дутьем; в) с принудительной циркуляцией масла и охлаждением последнего с помощью водяных или воздушных охладителей.

Отечественные трансформаторы в единицах мощностью до 7500 *кв·а* выполняются с естественным масляным охлаждением, на бóльшие мощности — с дутьем и в специальных случаях — с принудительной циркуляцией масла.

22-3. Тепловые потоки и условия рассеяния тепла в масляном трансформаторе

Будем считать, что тепловой процесс трансформатора установился и что, следовательно, все части трансформатора имеют постоянную температуру и постоянное превышение температуры относительно температуры ϑ_0 охлаждающей среды.

Картина распределения тепловых потоков и температура в различных частях масляного трансформатора носит сложный характер

и с трудом поддается исследованию. Для облегчения расчета трансформатора в тепловом отношении весь путь теплового потока от нагретой части до охлаждающей среды делят на ряд естественных участков, а именно: а) от внутренних наиболее нагретых точек данной активной части сердечника или обмотки до их наружных поверхностей, омываемых маслом; б) от наружной поверхности данной части трансформатора в омывающее ее масло; в) от масла к стенке охладителя, например бака, и г) от стенки бака к охлаждающей среде — воздуху или воде.

На участке 1 перенос тепла происходит путем теплопроводности, на участках 2 и 3 — путем конвекции масла и на участке 4 — путем лучеиспускания и конвекции.

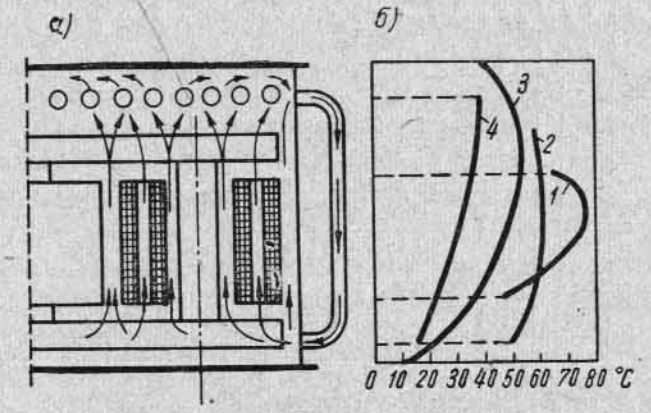


Рис. 22-1. Конвекция масла (*а*) и кривые (*б*) распределения превышений температуры в трансформаторе с трубчатым баком

1 — обмотка; *2* — сердечник; *3* — масло; *4* — поверхность трубы

Из числа этих участков важнейшее значение имеет участок 3. На рис. 22-1, *а* показан путь конвекционных потоков масла в трансформаторе с трубчатым баком (естественное масляное охлаждение). Исследования показали, что при средней рабочей температуре масла $\vartheta = 50 \div 60°$ С и соответствующей этой температуре вязкости масла коэффициент теплопередачи конвекцией масла

$$\lambda_{\text{кв. м}} = 40{,}3 \sqrt[4]{\frac{\tau}{H}}. \qquad (22\text{-}1)$$

Здесь τ — превышение температуры поверхности относительно температуры масла, °С; H — высота теплорассеивающей поверхности, *м*.

Если считать, что в среднем $\tau = 20°$ С и $H = 0{,}5 \div 1$ *м*, то

$$\lambda_{\text{кв. м}} = 80 \div 100 \ \text{вт}/(\text{град}\cdot\text{м}^2).$$

Эти значения примерно в 10 раз превышают коэффициент конвекции в воздухе. В этом и состоит ценная положительная роль масла как теплопроводящей среды.

При рассмотрении распределения температур в сердечнике и обмотках принимают для упрощения, что между сердечником и обмотками, а равно и между обмотками нет теплообмена, поскольку они отделены друг от друга масляными каналами.

22-4. Нагревание сердечника трансформатора

А. Внутренний перепад температуры. Тепло, возникающее в сердечнике масляного трансформатора, может передаваться по трем направлениям: а) по оси сердечника y вдоль листа стали (рис. 22-2); б) в плоскости поперечного сечения сердечника вдоль пакета, т. е. в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа; в) в той же плоскости поперек пакета, т. е. в направлении оси x.

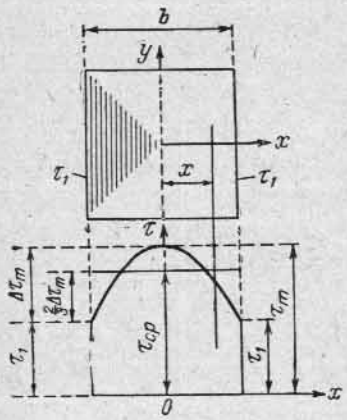


Рис. 22-2. Кривая распределения температуры внутри сердечника

Тепловые перепады от потоков по пп. «а» и «б» обычно не принимаются в расчет, так как благодаря большой теплопроводности стали температура в сердечнике по оси y и вдоль пакета распределяется практически равномерно (см., например, кривую *2* на рис. 22-1, *б*).

Наоборот, поток третьего рода встречает на своем пути изоляцию между листами, теплопроводность которой в десятки раз меньше теплопроводности стали.

Чтобы определить распределение превышений температур в плоскости поперечного сечения сердечника в направлении оси x, предполагают, что а) теплопроводность стали бесконечно велика по сравнению с теплопроводностью изоляции; б) превышения температуры поверхности сердечника относительно температуры масла по обе стороны пакета одинаковы (рис. 22-2); потери в единице массы стали $p_1 = \text{const}$.

Анализ, производимый в этих условиях, показывает, что превышение температуры τ_x, в точке, находящейся на расстоянии x от оси сердечника, выражается формулой:

$$\tau_x = \tau_1 + \frac{p_1 b^2}{8\lambda_{\text{пр}}}\left[1 - \left(\frac{2x}{b}\right)^2\right] = \tau_1 + \Delta\tau_m\left[1 - \left(\frac{2x}{b}\right)^2\right]. \qquad (22\text{-}2)$$

Здесь b — ширина пакета; $\lambda_{\text{пр}}$ — средняя теплопроводность сердечника в направлении оси x и $\Delta\tau_m$ — перепад температуры в пакете, равный

$$\Delta\tau_m = \frac{p_1 b^2}{8\lambda_{\text{пр}}}.$$

Таким образом, распределение превышения температуры по ширине пакета следует закону квадратичной параболы.

Наибольшее превышение температуры имеет место по оси сердечника ($x = 0$) и составляет

$$\tau_m = \tau_1 + \Delta\tau_m. \qquad (22\text{-}3)$$

Б. Отвод тепла (теплосъем) с поверхности сердечника. В расчет теплосъема с поверхности сердечника вводят среднее превышение температуры сердечника $\tau_{\text{ср}}$, причем принимают, что

$$\tau_{\text{ср}} = \tau_1 + \frac{2}{3}\Delta\tau_m = \tau_1 + \frac{p_1 b^2}{12\lambda_{\text{пр}}}. \qquad (22\text{-}4)$$

Обычно $\tau_{\text{ср}} = 12 \div 20°$ С. Так как в масле $\lambda_{\text{кв. м}} = 80 \div 100$ *вт/(град·м²)*, то теплосъем q_0 с 1 *м²* теплорассеивающей (т. е. на занятой распорками, рейками и т. д.) поверхности сердечника при естественном масляном охлаждении составляет $1000 \div 2000$ *вт/(град·м²)*. При принудительной циркуляции масла $q_0 = 2500 \div 3000$ *вт/(град·м²)* и более.

При значительной ширине пакета перепад $\Delta\tau_m \sim b^2$ может достигнуть чрезмерной величины. В этом случае в сердечнике устраивают охлаждающие каналы — продольные и поперечные.

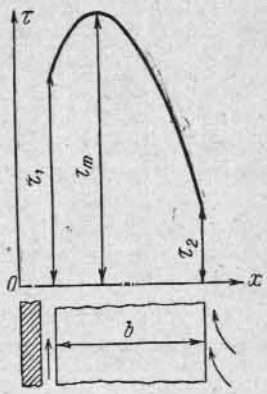


Рис. 22-3. Кривая распределения температуры внутри обмотки

22-5. Нагревание обмотки трансформатора

А. Перепады температуры по ширине и высоте обмотки. Условия распределения тепла в обмотках значительно сложнее, чем в сердечнике, и зависят от целого ряда факторов, из которых наибольшее значение имеют: тип обмотки, число, размеры и устройство охлаждающих каналов и способ охлаждения. В основном перепад температуры по ширине обмотки подчиняется тому же закону квадратичной параболы, что и в сердечнике (рис. 22-2). Но так как условия охлаждения внутренней и наружной поверхностей обмотки трансформатора чаще всего неодинаковы ($\tau_1 \neq \tau_2$), то наиболее нагретый участок ее сдвигается от середины обмотки к ее краю. На рис. 22-3 показан внутренний перепад температур в одном из сечений обмотки, с одной стороны которой имеется узкий масляный канал, а с другой масло течет свободно.

Также неравномерно распределяется превышение температуры по высоте обмотки (кривая *1* на рис. 22-1, *б*). Это объясняется тем, что при перемещении масла вверх температура его повышается (кривая *3* на рис. 22-1, *б*), а с другой стороны, сказывается влияние торцевых частей обмотки. В первом приближении можно считать, что разница между средней температурой обмотки, определенной по методу сопротивления, и наибольшей ее температурой составляет 10° С.

Б. Теплосъем с поверхности обмотки. Так как распределение температуры по ширине и высоте обмотки неравномерно, то в расчет вводят

среднее превышение температуры обмотки относительно масла $\tau_{о.м}$. Экспериментальные исследования показывают, что $\tau_{о.м}$ может быть выражено следующей эмпирической формулой:

$$\tau_{о.м} = kq_0^n. \qquad (22\text{-}5)$$

Здесь k и n — экспериментально установленные постоянный коэффициент и показатель степени в зависимости от конструкции обмотки и способа охлаждения; q_0 — удельная тепловая нагрузка обмотки, т. е. количество тепла, которое отводится в масло единицей поверхности обмотки в единицу времени при установившемся тепловом режиме. Обычно q_0 выражается в ваттах на 1 $м^2$.

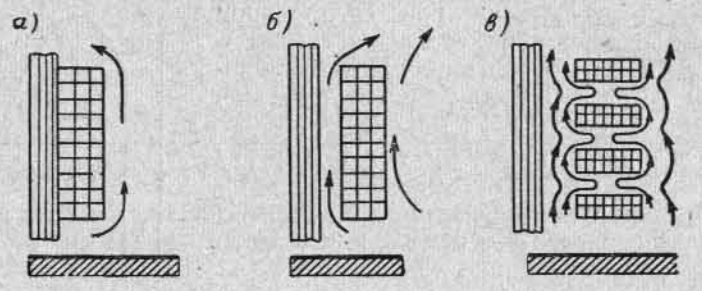


Рис. 22-4. Поверхности охлаждения обмоток различных типов

Если $p_м$ — все количество тепла, которое выделяется в обмотке, S_0 — теплорассеивающая поверхность обмотки, то

$$q_0 = p_м/S_0. \qquad (22\text{-}6)$$

Величина $p_м$ определяется с большой степенью точности; наоборот, величина активной охлаждающей поверхности может быть определена только приблизительно. Если, например, обмотки выполнены так, как это показано на рис. 22-4, *а, б, в*, то в первом случае (рис. 22-4,*а*) величина охлаждающей поверхности определяется только наружной поверхностью обмотки, обычно без учета торцевых поверхностей; во втором случае (рис. 22-4, *б*) в расчет вводится поверхность обмотки с обеих сторон S_0 с учетом места, занятого крепежными и распорными деталями и составляющего обычно 60—70% от S_0; наконец, в третьем случае (рис. 22-4, *в*) при ширине канала $b_к \geqslant 5$ *мм* можно считать активной всю наружную поверхность катушки с учетом части поверхности ее, занятой крепежными деталями.

В трансформаторах с естественным охлаждением допускают $\tau_{о.м} = 25 \div 30°$ С, соответственно чему $q_0 = 1200 \div 1600$ *вт/м²*; в трансформаторах с дутьевым охлаждением $q_0 = 2000 \div 2500$ *вт/м²*; в трансформаторах с принудительной циркуляцией масла $q_0 = 2500 \div 3000$ *вт/м²*.

22-6. Роль масла и бака в охлаждении трансформатора

При установившемся режиме работы все выделяющееся в сердечнике и обмотках тепло Σp отводится путем конвекции масла через наружную поверхность бака в воздух. Очевидно, чем меньше поверхность бака $S_б$, тем больше будет удельная тепловая нагрузка бака $q_б = \Sigma p/S_б$ и, следовательно, тем больше превышение температуры масла относительно температуры воздуха $\tau_{м.в}$. Примерное распределение превышения температуры масла относительно температуры воздуха на поверхности бака и труб (перепадом температуры в стенках бака обычно пренебрегают) показано на рис. 22-1, *б* (кривые *3* и *4*). Согласно ГОСТ, предельно допускаемое превышение температуры масла относительно температуры воздуха (в верхних слоях) $\tau_{м.в.пр} = 60°$ С. В расчет вводят среднее превышение температуры масла относительно температуры воздуха $\tau_{м.в}$. Учитывая неравномерное распределение температуры масла по высоте бака (кривая *3* на рис. 22-1, *б*), принимают в качестве верхнего предела: а) для трансформаторов с естественным охлаждением $\tau_{м.в} = 40°$ С; б) для трансформаторов с обдуванием $\tau_{м.в} = 45°$ С.

Соответственно этим значениям $\tau_{м.в}$ можно определить теплосъем с 1 $м^2$ охлаждающей поверхности бака, т. е. удельную тепловую нагрузку бака $q_б$, в зависимости от конструкции бака и способа его охлаждения.

А. Трансформаторы с естественным охлаждением и гладким баком. В этом случае охлаждающая поверхность бака рассеивает тепло как через лучеиспускание, так и через конвекцию. Следовательно, 1 $м^2$ такой поверхности при превышении ее температуры относительно температуры воздуха на 1° С рассеивает

$$\lambda_{лк} = \lambda_{лч} + \lambda_{кв} = 6 + 8 = 14 \ вт/(град \cdot м^2).$$

При условии, что отвод от трансформатора происходит свободно, имеем:

$$q_б = \tau_{м.в}\lambda_{лк} = 40 \cdot 14 = 560 \ вт/м^2.$$

Современные силовые масляные трансформаторы с естественным охлаждением и гладким баком могут быть выполнены на мощность, не превышающую 20—30 *ква*. В трансформаторах большей мощности должны быть приняты меры к улучшению условий теплорассеяния.

Б. Трансформаторы с естественным охлаждением баков трубчатого и радиаторного типа. В трансформаторе с трубчатым баком или с радиаторами лучеиспускание происходит только с поверхности, соответствующей внешней периферии бака; обычно поверхность, рассеивающая тепло лучеиспусканием, составляет всего 15—20% от общей охлаждающей поверхности бака. Поэтому в расчет вводят эквивалентный коэффициент теплорассеяния $\lambda_э = 10 \div 12{,}5$ *вт/(град·м²)*. Принимая $\tau_{м.в} = 40°$ С, получаем:

$$q_б = 40\,(10 \div 12{,}5) = 400 \div 500 \ вт/м^2.$$

В. Трансформатор с дутьевым охлаждением. В настоящее время применяется форсированное охлаждение радиаторов с помощью не-

больших вентиляторов, установленных на каждом радиаторе. По сравнению с естественным охлаждением бака обдув увеличивает теплорассеяние на 50—60%; следовательно, $\lambda_э = 15 \div 20$ *вт/(град·м²)*; допуская $\tau_{м.в} = 45°$ С, имеем:

$$q_б = 45\,(15 \div 20) = 675 \div 900 \text{ вт/м}^2.$$

Г. Трансформаторы с принудительной циркуляцией масла. Скорость, с которой происходит естественная циркуляция масла, весьма невелика — порядка нескольких миллиметров в секунду. Исследование вопроса показывает, что если мы увеличим скорость циркуляции масла

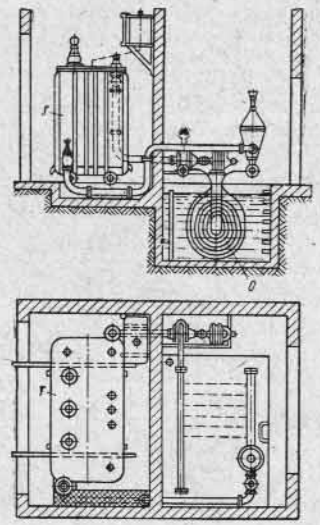


Рис. 22-5. Трансформатор с принудительной циркуляцией масла

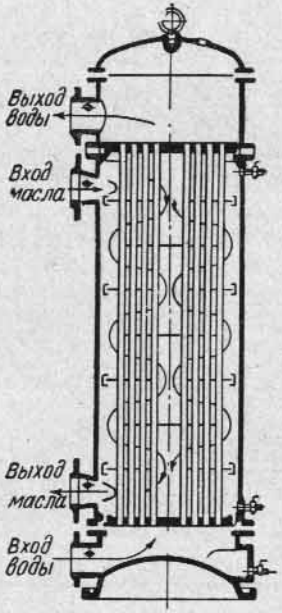


Рис. 22-6. Трубчатый охладитель, работающий на принципе противотока

в m раз, то мощность трансформатора при тех же превышениях температуры обмотки возрастет в $\sqrt[4]{m}$ раз. Если, например, $m = 3$, то мощность трансформатора увеличивается примерно на 30%. Чрезмерное увеличение скорости циркуляции масла неприемлемо, так как это сопряжено с большими потерями энергии в насосной установке.

Чтобы охладить масло, его заставляют циркулировать через специальный маслоохладитель. Различают маслоохладители: а) с естественным воздушным охлаждением, б) с добавочным обдувом и в) с водяным охлаждением.

В маслоохладителях с естественным воздушным охлаждением количество циркулирующего масла составляет 10—12 *л/мин* на 1 *квт* потерь.

При обдувании охладителя мощность трансформатора возрастает примерно в той же степени, что и при обдувании бака.

В трансформаторах с водяным охлаждением циркулирующего масла применяются змеевики (рис. 22-5) и трубчатые охладители, работающие на принципе противотока (рис. 22-6). Поверхность охладителя на 1 *квт* потерь составляет 0,18 — 0,25 *м²*. Количество циркулирующего масла также на 1 *квт* потерь равно примерно 6—8 *л/мин*, воды — около 1,5 *л/мин*. Разность температур входящей и выходящей воды обычно выбирают около 10° С.

22-7. Наибольшие допускаемые превышения температуры

Согласно ГОСТ, номинальными условиями охлаждающей среды являются:

1) естественно изменяющаяся температура охлаждающего воздуха в местностях, где ее максимальное значение не превышает + 35° С, при воздушном охлаждении трансформатора;

2) естественно изменяющаяся температура охлаждающей воды с максимальным значением, не превышающим + 25° С, при водяном охлаждении трансформатора.

Превышения температуры частей трансформатора сверх температуры охлаждающей среды при сколь угодно длительно поддерживаемых во время испытания потерях холостого хода и потерях короткого замыкания, приведенных к 75° С, не должны превосходить значений, указанных в табл. 22-1.

Таблица 22-1

Часть трансформатора	Наибольшее превышение температуры, °С	Метод измерения
Обмотка	70	По изменению сопротивления
Сердечник (на поверхности)	75	По термометру
Масло (в верхних слоях)	60	То же

22-8. Влияние температуры на срок службы трансформатора

Из всех частей трансформатора, перечисленных в табл. 22-1, наибольшее значение имеет обмотка, поскольку ее тепловой режим неразрывно связан с процессом теплового износа (старения) изоляции и тем самым определяет эксплуатационный срок службы трансформатора. Однако в табл. 22-1 приводится только допускаемое среднее превышение температуры обмотки относительно температуры воздуха $\tau_{о.в}$, тогда как работа изоляции и происходящие процессы ее старения зависят от температуры наиболее нагретой зоны обмотки ϑ_m. По этой температуре и следовало бы вести расчеты старения изоляции. Но такие расчеты отличаются относительной сложностью; поэтому их условились вести по средней температуре обмотки $\vartheta_{об.ср}$, соот-

ветствующим образом учитывая разницу между ϑ_m и $\vartheta_{об.\,ср}$. Если ϑ_0 — температура окружающего воздуха, то

$$\vartheta_{об.\,ср} = \tau_{об.\,ср} + \vartheta_0 = \tau_{о.\,м} + \tau_{м.\,в} + \vartheta_0. \qquad (22\text{-}7)$$

Будем считать, что режим работы трансформатора задан и остается постоянным. В этом случае количество выделяющегося в обмотке тепла $Q_{об}$, а стало быть, и средний перегрев обмотки $\tau_{об.\,ср}$ остаются постоянными. Но температура обмотки изменяется в соответствии с изменением температуры воздуха в течение суток и в зависимости от времени года. Если $\tau_{об.\,ср} = 70°$ С, а $\vartheta_0 = \pm 35°$ С, то $\vartheta_{об} = 70 \pm 35°$ С $= 105 \div 35°$ С. Таким образом, температура обмотки изменяется в относительно широких пределах, в соответствии с чем изменяется и скорость старения изоляции: последняя, естественно, изнашивается тем быстрее, чем выше температура обмотки и, стало быть, температура изоляции.

Каждому классу изоляции соответствует определенная допустимая предельная температура нагревания $\vartheta_{пр}$, при которой изоляция может надежно работать в течение достаточно длительного промежутка времени, оправдываемого условиями эксплуатации электромашины. Имеющийся в этом отношении опыт и произведенные исследования показали, что, например, срок службы изоляции класса А может быть выражен формулой вида

$$t_{из} = Ae^{-a\vartheta} = 7{,}15 \cdot 10^4 e^{-0{,}088\vartheta}.$$

Для масляных трансформаторов с $A = 1{,}5 \cdot 10^4$, если время $t_{из}$ определяется в годах, а $\vartheta_{об}$ — средняя по сопротивлению температура обмотки,

$$t_{из} = 1{,}5 \cdot 10^4 e^{-0{,}088\vartheta_{об}}. \qquad (22\text{-}8)$$

Из формулы (22-8) следует, что для обеспечения нормального износа изоляции, в течение 20—17 лет, наибольшая температура обмотки $\vartheta_{об\,m}$ не должна превосходить 85—90° С, причем каждое увеличение температуры на 8° уменьшает срок службы изоляции вдвое. Так как обычно $\vartheta_{об\,m} - \vartheta_{об.\,ср} \approx 10°$ С, то средняя температура обмотки не должна превышать 75—80° С. Предполагая, что трансформаторы устанавливаются в умеренном климатическом поясе со средней годовой температурой 5—10° С, найдем, что среднее за год превышение температуры обмотки трансформатора составляет

$$\tau_{об.\,ср} = (75 \div 80) - (5 \div 10) = 70° \text{ С},$$

т. е. получается как раз то значение, которым определяется среднее по сопротивлению допускаемое превышение температур обмотки согласно табл. 22-1. Отсюда можно сделать весьма важный для эксплуатации трансформатора вывод, что *для обеспечения нормального срока службы 17—20 лет, определяемого по тепловому износу изоляции, мы должны поставить трансформатор в такие условия работы, чтобы среднее по сопротивлению превышение температуры обмотки трансформатора не превосходило 70° С независимо от температуры окружающего воздуха.* При этом в жаркое время года температура обмотки трансформатора может достигать или даже превосходить 105° С, в соответствии с чем будет иметь место усиленный износ изоляции, но он будет скомпенсирован меньшим износом изоляции в зимнее время.

22-9. Постоянные времени нагревания трансформатора

Из условий нагревания однородного твердого тела следует, что постоянная времени нагревания его определяется формулой:

$$T = \frac{Gc}{S\lambda} = \frac{Gc\tau_m}{Q}.$$

Поскольку трансформатор в основном состоит из сердечника, обмотки и масла, имеющих различную массу, теплоемкость и т. д., то приходится говорить о постоянных времени нагревания сердечника $T_с$, обмотки $T_{об}$ и масла $T_{мс}$.

Покажем на численном примере, как велика разница между постоянными нагревания различных частей трансформатора.

В трехфазном масляном трансформаторе на 5600 *ква*, 35 *кв*, 50 *гц* имеем: масса стали сердечника $G_с = 534$ *кг*; масса меди $G_м = 1192$ *кг*; масса масла $G_{мс} = 5560$ *кг*. Потери в стали $p_с = 18\,000$ *вт*, потери в меди $p_м = 57\,400$ *вт*. Теплоемкость стали $c_с = 480$ *дж*/ (*кг·град*) теплоемкость меди $c_м = 390$ *дж* (*кг·град*) (изоляция во внимание не принимается); теплоемкость масла $c_{мс} = 1670$ *дж*/ (*кг·град*).

Примем, что превышение температуры сердечника относительно температуры масла $\tau_с = 20°$ С, то же обмотки $\tau_м = 20°$ С и масла $\tau_{мс} = 40°$ С. Тогда

для стали

$$T_с = \frac{5340 \cdot 480 \cdot 20}{18\,000} = 2850 \text{ сек} = 47{,}5 \text{ мин};$$

для меди

$$T_м = \frac{1192 \cdot 390 \cdot 20}{57\,400} = 162 \text{ сек} = 2{,}7 \text{ мин};$$

для масла

$$T_{мс} = \frac{5560 \cdot 1670 \cdot 40}{18\,000 + 57\,400} = 4930 \text{ сек} = 82 \text{ мин}.$$

Таким образом, постоянная времени нагревания масла $T_{мс}$ в 30 раз превышает постоянную $T_м$. Это дает нам право считать, что при быстрых изменениях нагрузки мы можем без заметной ошибки пренебречь изменениями температуры масла по сравнению с изменениями температуры меди.

Для трансформаторов с другими данными постоянные времени несколько изменяются, но отношения между ними остаются примерно теми же, т. е. полученные выше выводы носят достаточно общий характер.

22-10. Нагрузочная способность трансформатора

В номинальных температурных условиях охлаждающей среды, т. е. на открытом воздухе в местности, где среднегодовое и максимальное значения естественно изменяющейся температуры окружающего

воздуха равны соответственно + 5 и + 35° С, трансформатор может нести непрерывно неизменную нагрузку, равную номинальной, в течение всего своего нормального срока службы (порядка 20 лет), ограничиваемого износом изоляции обмоток.

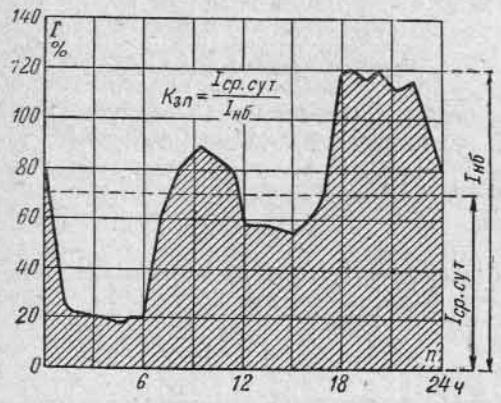


Рис. 22-7. Суточный график нагрузки

В условиях эксплуатации, где нагрузка, изменяясь в течение суток, остается часами ниже номинальной, допустима в другие часы нагрузка выше номинальной, т. е. допустима перегрузка трансформатора.

Систематически допускаемая перегрузка определяется по отношению $k_п = I_{нб}/I_н > 1$, где $I_{нб}$ — наибольшее значение тока, при котором трансформатор может работать n часов в сутки (в сумме); $I_н$ — номинальное значение тока.

Чтобы определить $k_п$, нужно знать суточный график работы трансформатора (рис. 22-7). Коэффициент заполнения этого графика выражается в виде:

$$k_{зп} = \frac{\int_0^{24} idt}{24 I_{нб}} = \frac{I_{ср.сут}}{I_{нб}}. \quad (22\text{-}9)$$

Л. М. Шницер показал, что нагрузочная способность трансформатора, работающего по графику с данным коэффициентом заполнения $k_{зп}$, может быть выражена уравнением прямой линии типа $k_п = a - bn$. Зависимость $k_п = f(n)$ для ряда заданных коэффициентов заполнения графика $k_{зп}$ приведена на рис. 22-8. По этим кривым для заданного коэффициента заполнения графика $k_{зп}$ можно определить на сколько часов в сутки можно перегружать трансформатор в зависимости от отношения $k_п = I_{нб}/I_н$.

В аварийных случаях, например при выходе из строя одного из параллельно работающих трансформаторов, допускаются, согласно

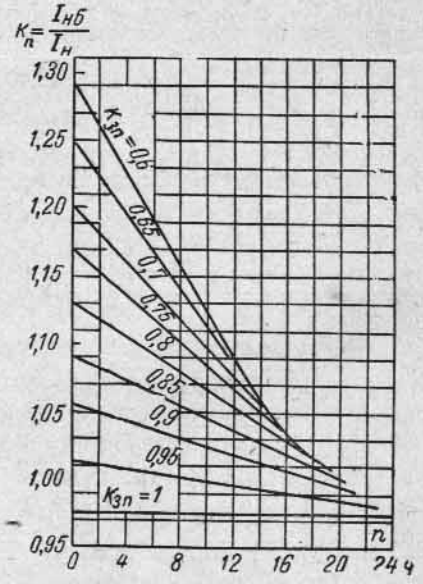


Рис. 22-8. Кривые коэффициента допускаемой перегрузки трансформатора $k_п$ в зависимости от времени перегрузки n и коэффициента заполнения графика нагрузки $k_{зп}$

ГОСТ, следующие кратковременные перегрузки трансформаторов: 30% — в течение 2 *ч*; 60% — 45 *мин*; 75% — 20 *мин*; 100% — 10 *мин* и 200% — 1,5 *мин*.

Особо стоит вопрос о мощности трансформатора, установленного в местности, где средняя годовая температура отличается от + 5° С больше чем на 2° С в сторону повышения или понижения. В этом случае можно с достаточной для практики точностью определить по данным Л. М. Шницера измененную мощность трансформатора P' по формуле:

$$P' = P_н\left(1 - \frac{\vartheta_{в.ср} - 5}{100}\right),$$

где $P_н$ — номинальная мощность трансформатора, указанная на его щитке, и $\vartheta_{в.ср}$ — среднегодовая температура охлаждающего воздуха.

22-11. Контроль за температурой и тепловая защита трансформаторов

Согласно ГОСТ, трансформаторы должны иметь приспособление для измерения температуры верхних слоев масла, а именно: а) трансформаторы мощностью до 750 *кв·а* снабжаются ртутными термометрами обычного типа или с сигнальными контактами; б) трансформаторы мощностью от 1000 *кв·а* и выше имеют термометрический сигнализатор, укрепляемый на боковой части бака на высоте около 1,5 *м* от днища трансформатора; в) трехфазные трансформаторы мощностью от 7500 *кв·а* и выше и однофазные трансформаторы мощностью 3333 *кв·а* и выше должны иметь дистанционный измеритель температуры масла для измерения со щита управления.

В трансформаторах большой мощности иногда предусматривается контроль за температурой обмотки $\vartheta_{об}$. В основном используются два метода измерения $\vartheta_{об}$: а) при помощи сопротивлений, встроенных в обмотки, и б) при помощи тепловых моделей обмоток. Несмотря на интерес, представляемый этими способами, они не нашли сколько-нибудь широкого применения главным образом потому, что значительно осложняют конструкцию трансформатора.

Тепловая защита трансформатора осуществляется посредством тепловых реле в трансформаторах малой мощности и газовых реле в трансформаторах средней и большой мощности. Здесь мы опишем газовое реле, получившее весьма широкое распространение как один из самых активных способов защиты трансформаторов.

Идея газового реле основана на том, что всякий перегрев в трансформаторе действует разрушающим образом на изоляцию той части, где он происходит. В результате всегда появляется некоторое количество газообразных продуктов распада, выделяющихся с большей или меньшей скоростью в зависимости от интенсивности теплового процесса. Образующийся газ поднимается вверх и в нормальных условиях выходит через маслорасширитель в воздух. Газовое реле устанавливается как раз на пути газа между крышкой бака и маслорасширителем и имеет вид, схематически показанный на рис. 22-9,

В нормальном состоянии реле целиком заполнено маслом. При выделении в трансформаторе газа последний скапливается в верхней части резервуара A и постепенно понижает уровень масла. Вследствие этого поплавок B_1 опускается и в некоторый момент замыкает цепь с сигнальным приспособлением. Об интенсивности происходящего процесса можно судить по быстроте вытеснения масла из резервуара A, для чего в боковой стенке последнего сделано окошечко с нанесенными на нем делениями. Большое значение имеет также цвет газа; так, например, светлый оттенок газа говорит о разрушении бумаги, желтоватый — дерева, темный — масла. В случае надобности можно сделать анализ газа, взяв некоторое количество его через кран в крышке резервуара.

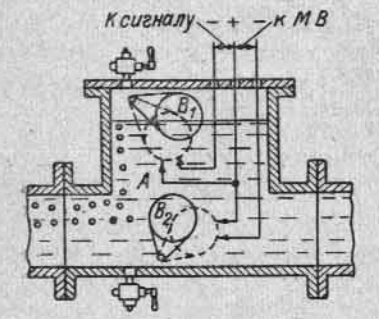


Рис. 22-9. Газовое реле

В том случае, когда процесс газовыделения носит интенсивный характер, поток газа, наклонив поплавок B_2, замыкает цепь управления масляного выключателя MB (рис. 22-9). Таким образом, газовое реле не только предупреждает о готовящейся аварии, но и выключает трансформатор, если авария происходит неожиданно.

Чувствительность газового реле весьма велика. Оно начинает сигнализировать о неблагополучии в трансформаторе очень рано. С другой стороны, оно просто, дешево и надежно в работе.

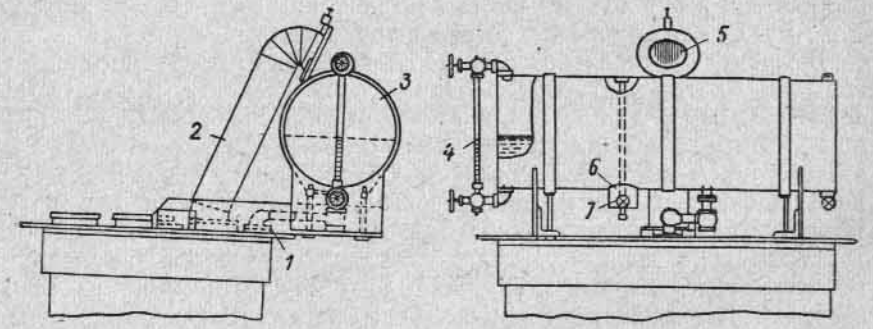


Рис. 22-10. Общий вид маслорасширителя и выхлопной трубы

1 — труба, соединяющая расширитель с главным резервуаром; *2* — выхлопная труба; *3* — расширитель; *4* — маслоуказатель; *5* — стеклянная диафрагма; *6* — водоотделитель, *7* — клапан для взятия проб

К защитным приспособлениям могут быть отнесены: а) маслорасширитель и б) выхлопная труба.

Маслорасширитель (рис. 22-10) устанавливается с целью устранения непосредственного соприкосновения находящегося в баке горячего масла с воздухом во избежание сильного окисления масла, но при этом маслу нужно дать возможность свободно расширяться при

нагревании. Расширитель представляет собой резервуар цилиндрической или иногда прямоугольной формы, который устанавливается на крышке бака, обычно вдоль узкой стороны последнего, и соединяется с баком трансформатора трубкой, оканчивающейся внутри расширителя, несколько выше его дна. Емкость расширителя должна обеспечивать постоянное наличие в нем масла при всех режимах работы трансформатора и при колебаниях температуры окружающего воздуха в пределах от — 35 до + 35* С. Для контроля за уровнем масла в расширителе последний снабжается маслоуказателем, причем на стенке расширителя или бака около маслоуказателя наносятся три контрольные черты, соответствующие уровню масла при температурах последнего — 35, + 15 и + 35° С. Обычно расширителем снабжаются трансформаторы мощностью от 100 *кв·а* и выше.

Выхлопная труба (рис. 22-10) устанавливается на крышке бака трансформатора мощностью 1000 *кв·а* и выше и представляет собой стальную трубу 20—25 *см* в диаметре, закрытую на конце обычно стеклянной пластинкой — мембраной толщиной 3—5 *мм*. При внутреннем повреждении трансформатора внутри бака быстро образуется большое количество газов, которые выдавливают мембрану и выводятся в атмосферу. В противном случае неизбежна деформация бака.

Глава двадцать третья

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

23-1. Общие сведения

Специальных типов трансформаторов очень много. Сюда относятся: а) автотрансформаторы, б) трехобмоточные трансформаторы, в) трансформаторы большой мощности с регулированием напряжения под нагрузкой, г) индукционные регуляторы, выполняемые по типу асинхронных машин (см. вторую часть); д) измерительные трансформаторы, е) печные, ж) сварочные,. з) для ртутных выпрямителей, и) испытательные и др.

Наряду с этим трансформаторы могут быть использованы для умножения частоты, изменения числа фаз, как реакторы для самых различных целей и т. д. В последнее время получили известное развитие передвижные трансформаторы, сухие трансформаторы сравнительно большой мощности, трансформаторы с негорючим маслом, с намотанным сердечником и т. д.

Здесь будут вкратце рассмотрены только наиболее распространенные из специальных типов трансформаторов.

23-2. Автотрансформаторы

Автотрансформатором называется такой трансформатор, у которого часть обмотки принадлежит одновременно первичной и вторичной системам.

Так же как обычные трансформаторы, автотрансформаторы могут быть понижающими и повышающими, однофазными и трехфазными.

На рис. 23-1, *а* и *б* показаны схемы понижающего автотрансформатора, на рис. 23-1, *в* — повышающего.

Рассмотрим работу однофазного понижающего автотрансформатора (рис. 23-1, *а*). Первичное напряжение $U_1 = U_{AX}$ подводится к зажимам первичной обмотки AX; вторичной обмоткой служит часть первичной между зажимами a и x, причем зажим x совмещен с зажимом X.

Режим холостого хода автотрансформатора ($I_2 = 0$) ничем не отличается от соответствующего режима обычного трансформатора. Так как подводимое к автотрансформатору напряжение U_{AX} равномерно распределяется между витками первичной обмотки, то вторичное напряжение будет

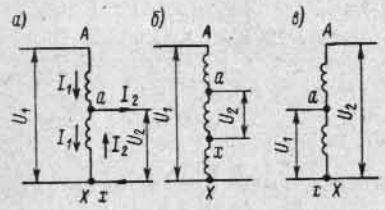


Рис. 23-1. Схемы понижающего (*а*, *б*) и повышающего (*в*) автотрансформатора

$$U_2 = U_{ax} = \frac{U_{AX}}{w_{AX}} w_{ax} = \frac{U_{AX}}{w_{AX}/w_{ax}} = \frac{U_{AX}}{k_a} = \frac{U_1}{k_a}, \qquad (23\text{-}1)$$

где $k_a = w_{AX}/w_{ax}$ — коэффициент трансформации автотрансформатора.

Для повышающего автотрансформатора (рис. 23-1, *в*) имеем: $U_2 = U_{AX} = k_a U_1$.

При коротком замыкании автотрансформатора из первичной сети течет ток I_1, а в проводе, замыкающем зажимы a—x, течет ток I_2.

Если бы обмотки A—X и a—x были электрически разобщены, как в обычном трансформаторе, то, пренебрегая намагничивающим током, мы имели бы [см. формулу (13-15а)]:

$$\dot{I}_1 w_{AX} + \dot{I}_2 w_{ax} = 0$$

или

$$\dot{I}_1 + \frac{1}{k_a}\dot{I}_2 = 0. \qquad (23\text{-}2)$$

В автотрансформаторе ток I_1 протекает только по части обмотки A—a, а по общей части обмотки a—x течет ток I_{ax}, представляющий собой геометрическую сумму токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$. Следовательно,

$$\dot{I}_{ax} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = -\dot{I}_1(k_a - 1) = \dot{I}_2\left(1 - \frac{1}{k_a}\right). \qquad (23\text{-}3)$$

Отсюда видно, что в понижающем автотрансформаторе ток I_{ax} течет по общей части a—x обмотки в направлении, обратном току I_1 и согласно с током I_2.

Сравним параметры короткого замыкания обычного трансформатора и автотрансформатора. Параметры последнего будем обозначать индексом a.

Потери в меди обычного трансформатора составляют $I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2$. В автотрансформаторе ток I_1 течет только на участке A—a, активное сопротивление которого

$$r_{Aa} = r_1 \frac{w_{Aa}}{w_{AX}} = r_1 \frac{w_{AX} - w_{ax}}{w_{AX}} = r_1\left(1 - \frac{1}{k_a}\right). \qquad (23\text{-}4)$$

Следовательно,

$$p_{м\,Aa} = I_1^2 r_{Aa} = I_1^2 r_1\left(1 - \frac{1}{k_a}\right). \qquad (23\text{-}5)$$

Часть обмотки a—x играет роль вторичной обмотки с током I_{ax}, составляющим $1 - 1/k_a$ часть тока I_2 обычного трансформатора. Допуская одну и ту же плотность тока, можно в таком же отношении изменить площадь сечения этой части обмотки, соответственно чему активное сопротивление этой части изменяется обратно пропорционально этому отношению. Тогда

$$p_{м\,ax} = I_{ax}^2 r_{ax} = I_2^2\left(1 - \frac{1}{k_a}\right)^2 \frac{r_2}{1 - \frac{1}{k_a}} = I_2^2 r_2\left(1 - \frac{1}{k_a}\right). \qquad (23\text{-}6)$$

Сопоставляя формулы (23-5) и (23-6), мы видим, что автотрансформатор можно рассматривать как обычный трансформатор с активными сопротивлениями первичной и вторичной обмоток, уменьшенными в $1 - 1/k_a$ раз, т. е.

$$r_{ка} = r_к\left(1 - \frac{1}{k_a}\right). \qquad (23\text{-}7)$$

Соответственно

$$P_{ка} = P_к\left(1 - \frac{1}{k_a}\right). \qquad (23\text{-}8)$$

В таком же отношении изменяется и масса меди обмоток автотрансформатора, т. е. $G_{ма} = G_м(1 - 1/k_a)$, так как на участке A—a обмотка автотрансформатора имеет по сравнению с обычным трансформатором то же сечение, но в $1 - 1/k_a$ раз меньшую длину, и на участке a—x она имеет ту же длину, что вторичная обмотка трансформатора, но в $1 - 1/k_a$ раз меньшее сечение.

В отношении индуктивного сопротивления автотрансформатора можно сделать тот же вывод, что и в отношении его активного сопротивления, т. е.

$$x_{ка} = x_к\left(1 - \frac{1}{k_a}\right). \qquad (23\text{-}9)$$

Следовательно, напряжение короткого замыкания автотрансформатора составляет

$$u_{ка} = u_к\left(1 - \frac{1}{k_a}\right). \qquad (23\text{-}10)$$

Таким образом, по сравнению с обычным трансформатором все стороны треугольника короткого замыкания автотрансформатора в $1 - 1/k_a$ раз меньше, а токи короткого замыкания соответственно больше.

Подводимая к автотрансформатору мощность $P_1 = U_1 I_1$ передается во вторичную обмотку частью в форме электромагнитной мощности P_{12} соответственно части обмотки A—a, частью в форме электрической мощности $P_э$ соответственно части обмотки a—X. Следовательно,

$$P_{12} = U_{Aa} I_1 (U_1 - U_2) I_1 = P_1 \left(1 - \frac{1}{k_a}\right) \qquad (23\text{-}11)$$

и

$$P_э = P_1 - P_{12} = P_1 \frac{1}{k_a}. \qquad (23\text{-}12)$$

Работу автотрансформатора под нагрузкой можно получить при взаимном наложении режимов холостого хода и короткого замыка-

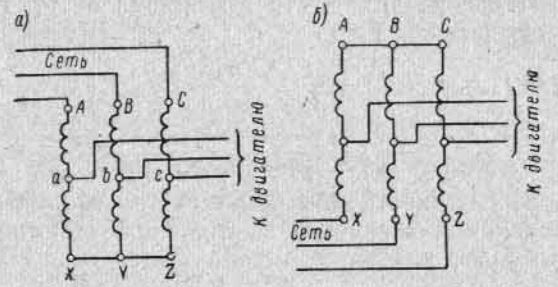


Рис. 23-2. Схемы пусковых автотрансформаторов:
а — прямая схема; *б* — обратная схема

ния. Поэтому нагрузочная диаграмма автотрансформатора имеет тот же вид, что и обычного трансформатора (см. рис. 18-3, 18-4), но соответственно меньшему напряжению короткого замыкания $u_{ка}$ и меньшим потерям в меди $P_{ка}$ изменение напряжения автотрансформатора меньше, а его к. п. д. больше, чем у обычного трансформатора. Из формул (23-9) и (23-10) следует, что эта разница зависит от величины коэффициента k_a. При $k_a = 1$ потери $P_{ка}$ и масса $G_{ма}$ были бы равны нулю, но в этом случае точка a совпала бы с точкой A и вся подводимая к автотрансформатору электроэнергия передавалась бы во вторичную сеть без трансформации. С другой стороны, при больших значениях k_a разница между автотрансформатором и трансформатором сглаживается. При $k_a = 2$ автотрансформатор становится менее выгодным, так как с увеличением k_a потери в меди автотрансформатора возрастают и приближаются к потерям, имеющим место в трансформаторах. Кроме того, приемники, питаемые автотрансформатором, приходится защищать от перенапряжений, поскольку обмотки ВН и НН соединены между собой электрически. Поэтому обычно $k_a = 1{,}25 \div 2$.

Автотрансформаторы применяются для пуска синхронных и асинхронных двигателей, как делители напряжения в испытательных и лабораторных схемах, а также на линиях передачи высокого напряжения для связи систем с различными напряжениями, например 400 и 230 *кв*, а также в распределительных сетях.

На рис. 23-2, *а*, *б* показаны прямая и обратная схемы трехфазного масляного пускового автотрансформатора. Согласно ГОСТ, пусковые автотрансформаторы должны иметь три ступени вторичного напряжения, а именно 0,55, 0,64 и 0,73 от первичного напряжения U_1 при прямой схеме 0,27, 0,36 и 0,45 от U_1 при обратной схеме. Напряжения 0,64 и 0,36 от U_1 на средней ступени принимаются за номинальные. Номинальным режимом нагрузки пускового автотрансформатора считается двухминутная нагрузка током, соответствующим номинальной мощности, обозначенной на щитке. Перегрев обмотки пускового автотрансформатора, определяемый по методу сопротивления, не должен превышать 135° С. Период охлаждения автотрансформатора, следующий за нагрузкой, составляет 4—6 *ч*.

Автотрансформаторы, применяемые на линиях передачи и в сетях, выполняются на высокие напряжения и большие мощности. Так, например, напряжение одной из находящихся в эксплуатации линий передачи в США было повышено со 150 до 220 *кв*. В другом случае при расширении станции генератор на 11 *кв* был присоединен к сети на 22 *кв* через автотрансформатор мощностью 66 667 *ква*. К. п. д. мощных автотрансформаторов достигает 99,7%.

23-3. Трехобмоточные трансформаторы

А. Общие замечания. Когда сеть с напряжением U_1 питает одновременно две другие сети с различными напряжениями U_2 и U_3, то можно вместо двух трансформаторов с напряжениями U_1/U_2 и U_1/U_3 установить один трансформатор с двумя отдельными вторичными обмотками и, следовательно, с двумя вторичными напряжениями. Такой трансформатор с напряжением $U_1/U_2/U_3$ называется трехобмоточным и в настоящее время широко применяется на трансформаторных подстанциях.

В общем случае число обмоток трансформатора может быть любым, но здесь будет рассмотрен только трехобмоточный трансформатор, как имеющий главное значение.

Согласно ГОСТ, трехобмоточные силовые трансформаторы выполняются: а) как трехфазные трансформаторы на мощности от 5600 до 31 500 *ква* с верхним пределом номинального напряжения 121 *кв* для обмотки высшего напряжения (ВН), 38,5 *кв* для обмотки среднего напряжения (СН) и 11 *кв* для обмотки низшего напряжения (НН); б) как однофазные трансформаторы мощностью от 5000 до 40 000 *ква* на те же напряжения обмоток ВН и СН, с верхним пределом 15,75 *кв* для обмотки НН. Следует, однако, отметить, что в настоящее время в Советском Союзе выполняются мощные трехобмоточные трансформаторы на 220 и 400 *кв*.

Согласно тому же стандарту, обмотки трехфазных трехобмоточных трансформаторов соединяются по способу $Y_0/Y_0/\Delta - 12 - 11$ или по способу $Y_0/\Delta/\Delta - 11 - 11$.

Номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора называется мощность наиболее мощной обмотки его, т. е. фактически мощность его первичной обмотки. В табл. 23-1 приведены номинальные мощности обмоток СН и НН, если принять мощность обмотки ВН за 100 условных единиц.

Из конструктивных соображений приняты два способа расположения обмоток ВН, СН и НН, показанные на рис. 23-3, *а* и *б*. В дальнейшем мы будем обозначать обмотки ВН, СН и НН цифрами 1, 2 и 3.

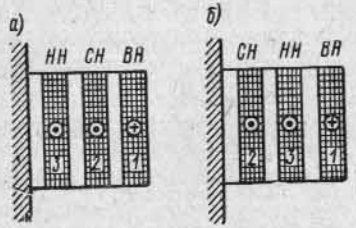


Рис. 23-3. Схемы расположения обмоток трехобмоточного трансформатора

Таблица 23-1

Обмотки		
ВН	СН	НН
100	100	100
100	66,7	100
100	100	66,7
100	66,7	66,7

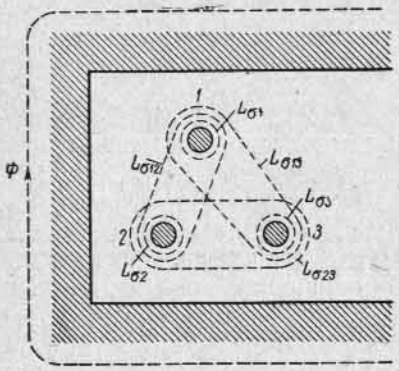


Рис. 23-4. Схема потоков рассеяния в трехобмоточном трансформаторе

Б. Физические условия работы трехобмоточного трансформатора. В трехобмоточном трансформаторе, так же как и двухобмоточном, существуют:

а) основной поток или поток взаимоиндукции Ф, сцепленный со всеми тремя обмотками трансформатора, и

б) потоки рассеяния, картина которых отличается большей сложностью, чем в двухобмоточном трансформаторе, поскольку приходится иметь в виду как потоки рассеяния, замыкающиеся каждый только вокруг какой-нибудь одной обмотки, так и потоки рассеяния, охватывающие каждый две обмотки (рис. 23-4).

Действие основного потока характеризуется взаимоиндуктивностями M_1, M_2 и M_3, а действие потоков рассеяния — индуктивностями $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$, $L_{\sigma 3}$, $L_{\sigma 12}$, $L_{\sigma 21}$, $L_{\sigma 13}$, $L_{\sigma 31}$, $L_{\sigma 23}$ и $L_{\sigma 32}$.

При анализе работы трехобмоточного трансформатора мы будем считать, что обе вторичные обмотки приведены к первичной как по числу витков, так и по мощности, поскольку в трехобмоточном трансформаторе мощности обмоток *1*, *2* и *3* могут быть в общем случае различны (см. табл. 23-1).

Таким образом,

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega \text{ и } P_{н1} = P_{н2} = P_{н3} = P_н.$$

Кроме того, как и для двухобмоточного трансформатора, мы примем, что все переменные во времени величины изменяются синусоидально и что магнитная проницаемость стали $\mu = \text{const}$. В этих условиях

$$M_1 = M_2 = M_3 = M; \quad (23\text{-}13)$$

$$L_{\sigma 12} = L_{\sigma 21};\ L_{\sigma 13} = L_{\sigma 31} \text{ и } L_{\sigma 23} = L_{\sigma 32}. \quad (23\text{-}14)$$

Для простоты мы будем писать все приведенные величины без специальных значков сверху.

В. Уравнение н. с. трехобмоточного трансформатора. По аналогии с уравнением (13-32а) н. с. двухобмоточного трансформатора имеем:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = \dot{I}_0, \quad (23\text{-}15)$$

где I_0 — ток холостого хода трансформатора.

В трехобмоточных трансформаторах $I_0 = 2{,}5 \div 3{,}5\%$ от $I_н$; поэтому мы можем им пренебречь и написать уравнение н. с. в упрощенном виде:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0. \quad (23\text{-}16)$$

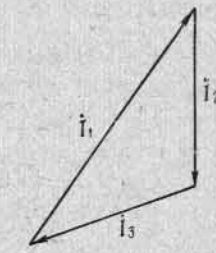


Рис. 23-5. Диаграмма токов трехобмоточного трансформатора

Соответствующая этому уравнению диаграмма токов показана на рис. 23-5.

Г. Первая форма уравнений э. д. с. трехобмоточного трансформатора. Соответственно картине потоков на рис. 23-4 имеем:

1) полные индуктивности обмоток *1*, *2* и *3*:

$$L_1 = M + L_{\sigma 1} + L_{\sigma 12} + L_{\sigma 13}; \quad (23\text{-}17а)$$

$$L_2 = M + L_{\sigma 2} + L_{\sigma 21} + L_{\sigma 23}; \quad (23\text{-}17б)$$

$$L_3 = M + L_{\sigma 3} + L_{\sigma 31} + L_{\sigma 32}. \quad (23\text{-}17в)$$

2) полные взаимоиндуктивности соответственно обмоток *2* и *3* по отношению к обмотке *1* определяются суммами $M + L_{\sigma 21}$ и $M + L_{\sigma 31}$;

3) соответственно взаимоиндуктивности обмоток *1* и *3* по отношению к обмотке *2* и обмоток *1* и *2* по отношению к обмотке *3* определяются суммами $M + L_{\sigma 12}$, $M + L_{\sigma 32}$, $M + L_{\sigma 13}$ и $M + L_{\sigma 23}$.

Тогда уравнения э. д. с. трехобмоточного трансформатора напишутся в виде:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 \omega \left(M + L_{\sigma 1} + L_{\sigma 12} + L_{\sigma 13}\right) + j\dot{I}_2 \omega \left(M + L_{\sigma 21}\right) + j\dot{I}_3 \omega \left(M + L_{\sigma 31}\right); \quad (23\text{-}18а)$$

$$-\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j\dot{I}_2 \omega \left(M + L_{\sigma 2} + L_{\sigma 21} + L_{\sigma 23}\right) + j\dot{I}_3 \omega \left(M + L_{\sigma 32}\right) + j\dot{I}_1 \omega \left(M + L_{\sigma 12}\right); \quad (23\text{-}18б)$$

$$-\dot{U}_3 = \dot{I}_3 r_3 + j\dot{I}_3\omega\,(M + L_{\sigma 3} + L_{\sigma 31} + L_{\sigma 32}) + $$
$$+ j\dot{I}_1\omega\,(M + L_{\sigma 13}) + j\dot{I}_2\omega\,(M + L_{\sigma 23}). \qquad (23\text{-}18в)$$

Здесь r_1, r_2, r_3 — активные сопротивления обмоток *1*, *2* и *3*.

В выражениях (23-18а), (23-18б), (23-18в) все индексы стоят в определенном порядке; из двух рядом стоящих индексов первый относится к той обмотке, току которой пропорциональна соответствующая составляющая э. д. с., а второй индекс — к той обмотке, связь которой при этом учитывается.

Вычтем из уравнения (23-18а) сначала уравнение (23-18б), а затем уравнение (23-18в) и подставим в полученные разности значения тока $\dot{I}_1 = -(\dot{I}_2 + \dot{I}_3)$ по уравнению н. с. (23-16). Тогда

$$\dot{U}_1 - (-\dot{U}_2) = \Delta\dot{U}_{12} = -\dot{I}_2(r_1 + r_2) - \dot{I}_2 r_1 - $$
$$- j\dot{I}_2\omega\,(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 13} + L_{\sigma 2} + L_{\sigma 23}) - j\dot{I}_3\omega\,(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 32}) \qquad (23\text{-}19а)$$

и

$$\dot{U}_1 - (-\dot{U}_3) = \Delta\dot{U}_{13} = -I_3(r_1 + r_3) - \dot{I}_2 r_1 - $$
$$- j\dot{I}_3\omega\,(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 12} + L_{\sigma 3} + L_{\sigma 32}) - j\dot{I}_2\omega(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 23}). \qquad (23\text{-}19б)$$

Эти уравнения справедливы для любого режима работы трехобмоточного трансформатора. Отнесем их один раз к режиму короткого замыкания между обмотками *1* и *2* при условии, что обмотка *3* разомкнута и, следовательно, $I_3 = 0$, а в другой раз — к режиму короткого замыкания между обмотками *1* и *3* при $I_2 = 0$.

В первом случае уравнение (23-19а) принимает вид:

$$\Delta\dot{U}_{12} = -\dot{I}_2(r_1 + r_2) - j\dot{I}_2\omega\,(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 13} + L_{\sigma 2} + L_{\sigma 23}) =$$
$$= -\dot{I}_2 r_{к12} - j\dot{I}_2 x_{к12}. \qquad (23\text{-}20а)$$

Во втором случае имеем:

$$\Delta\dot{U}_{13} = -\dot{I}_3(r_1 + r_3) - j\dot{I}_3\omega\,(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 12} + L_{\sigma 3} + L_{\sigma 32}) =$$
$$= -\dot{I}_3 r_{к13} - j\dot{I}_3 x_{к13}. \qquad (23\text{-}20б)$$

Уравнения (23-20а) и (23-20б) вполне аналогичны уравнениям короткозамкнутого приведенного двухобмоточного трансформатора, если положить, что

$$\omega\,(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 13} + L_{\sigma 2} + L_{\sigma 23}) = x_{к12} \qquad (23\text{-}21)$$

и

$$\omega\,(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 12} + L_{\sigma 3} + L_{\sigma 32}) = x_{к13}. \qquad (23\text{-}22)$$

Аналогично имеем из режима короткого замыкания обмоток *2* и *3* при $I_1 = 0$:

$$\omega\,(L_{\sigma 2} + L_{\sigma 21} + L_{\sigma 3} + L_{\sigma 31}) = x_{к23}. \qquad (23\text{-}23)$$

Возвращаясь к уравнениям (23-20а) и (23-20б), примем, что сумма $L_{\sigma 1} + L_{\sigma 32} = L_{\sigma 1} + L_{\sigma 23}$ является эквивалентной индуктивностью

рассеяния обмотки *1* и что соответственно произведение

$$\omega\,(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 32}) = \omega\,(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 23}) = x_1 \qquad (23\text{-}24а)$$

является эквивалентным индуктивным сопротивлением рассеяния этой обмотки. Аналогично

$$\omega\,(L_{\sigma 2} + L_{\sigma 13}) = \omega\,(L_{\sigma 2} + L_{\sigma 31}) = x_2 \qquad (23\text{-}24б)$$

и

$$\omega\,(L_{\sigma 3} + L_{\sigma 12}) = \omega\,(L_{\sigma 3} + L_{\sigma 21}) = x_3, \qquad (23\text{-}24в)$$

где x_2 и x_3 — эквивалентные индуктивные сопротивления рассеяния обмоток *2* и *3*. Тогда уравнения (23-20а) и (23-20б) приобретают вид:

$$\Delta\dot{U}_{12} = -\dot{I}_2(r_{к12} + jx_{к12}) - \dot{I}_3(r_1 + jx_1) =$$
$$= -(\dot{I}_2 Z_{к12} + \dot{I}_3 Z_1) \qquad (23\text{-}25)$$

и

$$\Delta\dot{U}_{13} = -\dot{I}_3(r_{к13} + jx_{к13}) - \dot{I}_2(r_1 + jx_1) =$$
$$= -(\dot{I}_3 Z_{к13} + \dot{I}_2 Z_1). \qquad (23\text{-}26)$$

Уравнения (23-25) и (23-26) являются основными уравнениями работы трехобмоточного трансформатора. Мы видим, что а) падения напряжения ΔU_{12} и ΔU_{13} зависят от токов I_2 и I_3 в обеих вторичных обмотках и б) мерой взаимного влияния обмоток *2* и *3* является комплексное полное сопротивление Z_1.

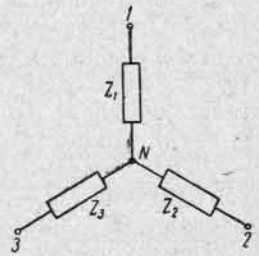


Рис. 23-6. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Д. Вторая форма уравнений трехобмоточного трансформатора. Уравнения (23-25) и (23-26) можно преобразовать, если в первое из них подставить $\dot{I}_3 = -(\dot{I}_1 + \dot{I}_2)$, а во второе $\dot{I}_2 = -(\dot{I}_1 + \dot{I}_3)$.

В этом случае имеем:

$$\Delta\dot{U}_{12} = -\dot{I}_2 Z_{к12} + \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_1 = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2(Z_{к12} - Z_1)$$

или, так как $Z_{к12} - Z_1 = Z_2$, то

$$\Delta\dot{U}_{12} = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_2. \qquad (23\text{-}27)$$

Соответственно

$$\Delta\dot{U}_{13} = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_3 Z_1 - \dot{I}_3 Z_{к13} = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_3(Z_{к13} - Z_1) = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_3 Z_3, \qquad (23\text{-}28)$$

где

$$Z_3 = Z_{к13} - Z_1.$$

Е. Схема замещения трехобмоточного трансформатора. Исходя из уравнений (23-27) и (23-28), можно видеть, что схемой замещения, удовлетворяющей этим равенствам, является трехлучевая звезда из полных сопротивлений Z_1, Z_2 и Z_3 (рис. 23-6). Схема соответствует одной фазе трехобмоточного трансформатора, а точка N определяет не электрическую, а электромагнитную связь между обмотками *1*, *2* и *3* аналогично точке F на схеме замещения двухобмоточного трансформатора (см. рис. 13-3).

Ж. Параметры трехобмоточного трансформатора. Эти параметры определяются, как и в двухобмоточном трансформаторе, из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Опыт холостого хода. Соответственно трем обмоткам трансформатора можно произвести три опыта холостого хода, из которых получаем:

1) три значения коэффициента трансформации, а именно:

$$k_{12}=\frac{U_1}{U_2};\quad k_{13}=\frac{U_1}{U_3};\quad k_{23}=\frac{U_2}{U_3}=\frac{U_2/U_1}{U_3/U_1}=\frac{k_{13}}{k_{12}};$$

2) три значения тока холостого хода, причем если мощности обмоток неодинаковы, то эти токи пересчитываются и выражаются в процентном отношении от номинального тока наиболее мощной обмотки;

3) одинаковые во всех трех случаях потери холостого хода.

Из сказанного следует, что практически достаточно произвести только один опыт холостого хода и два определения коэффициентов трансформации, например коэффициентов k_{12} и k_{13}, после чего можно вычислить коэффициент k_{23}.

Короткое замыкание трехобмоточного трансформатора. Так же как при холостом ходе, можно произвести три опыта короткого замыкания, а именно:

1) между обмотками *1* и *2* при разомкнутой обмотке *3*;
2) между обмотками *1* и *3* при разомкнутой обмотке *2*;
3) между обмотками *2* и *3* при разомкнутой обмотке *1*.

По данным этих опытов можно определить, так же как для двухобмоточного трансформатора, параметры каждой пары обмоток, а именно:

$$Z_{к12},\ r_{к12}=r_1+r_2,\ x_{к12}=x_1+x_2; \qquad (23\text{-}29а)$$

$$Z_{к13},\ r_{к13}=r_1+r_3,\ x_{к13}=x_1+x_3 \qquad (23\text{-}29б)$$

и

$$Z_{к23},\ r_{к23}=r_2+r_3,\ x_{к23}=x_2+x_3. \qquad (23\text{-}29в)$$

Решая эти уравнения, получаем:

$$r_1=\frac{r_{к12}+r_{к13}-r_{к23}}{2};\quad x_1=\frac{x_{к12}+x_{к13}-x_{к23}}{2}; \qquad (23\text{-}30а)$$

$$r_2=\frac{r_{к12}+r_{к23}-r_{к13}}{2};\quad x_2=\frac{x_{к12}+x_{к23}-x_{к13}}{2}; \qquad (23\text{-}30б)$$

$$r_3=\frac{r_{к13}+r_{к23}-r_{к12}}{2};\quad x_3=\frac{x_{к13}+x_{к23}-x_{к12}}{2}. \qquad (23\text{-}30в)$$

Напомним, что параметры x_1, x_2 и x_3 представляют собой эквивалентные индуктивные сопротивления рассеяния обмоток *1*, *2*, *3*, определяемые суммами $L_{\sigma 1}+L_{\sigma 23}$, $L_{\sigma 2}+L_{\sigma 13}$ и $L_{\sigma 3}+L_{\sigma 12}$ [см. формулы (23-24а), (23-24б), (23-24в)].

Активные сопротивления $r_{к12}$, $r_{к13}$ и $r_{к23}$, а равно и сопротивления r_1, r_2 и r_3 практически не зависят от взаимного расположения обмоток *1*, *2* и *3*, т. е. ВН, СН и НН. Но индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, а стало быть, и напряжения короткого замыкания зависят, как известно, от расстояния между обмотками (см. § 17-10,

п. А). Стандартные расположения обмоток трехобмоточных силовых трансформаторов показаны на рис. 23-3, *а* и *б*. Соответствующие этим двум схемам значения напряжений короткого замыкания приведены в табл. 23-2 согласно ГОСТ.

Таблица 23-2

Характеристика	Обмотки		
	ВН—СН	ВН—НН	СН—НН
Напряжение к. з. по схеме на рис. 23-3, *а*	10,5	17	6
Напряжение к. з. по схеме на рис. 23-3, *б*	17	10,5	6

З. Векторная диаграмма трехобмоточного трансформатора. Соответственно уравнениям э. д. с. (23-25) и (23-26) или (23-27) и (23-28) можно построить векторные диаграммы трехобмоточного трансформа-

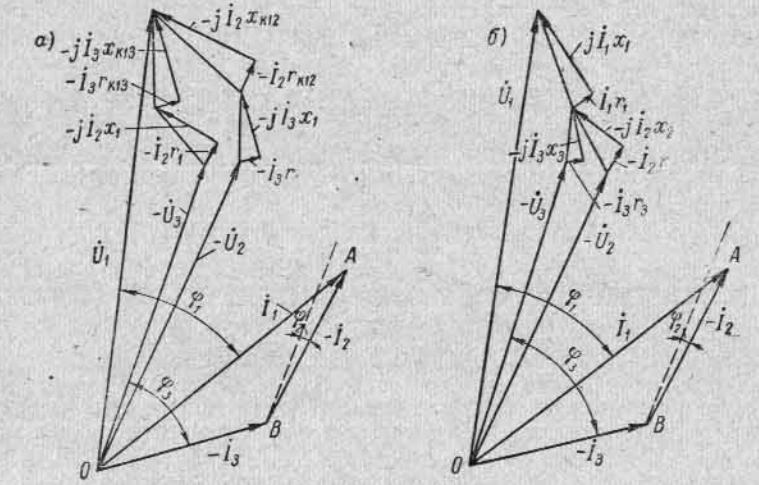


Рис. 23-7. Векторные диаграммы трехобмоточного трансформатора

тора. Для этого мы сначала строим треугольники токов *OAB* (рис. 23-7, *а*, *б*), считая, что токи $\dot I_2$ и $\dot I_3$ заданы по величине и по фазе относительно напряжений $\dot U_2$ и $\dot U_3$. Чтобы получить вектор напряжения $\dot U_1$, нужно геометрически сложить с векторами напряжений — $\dot U_2$ и $-\dot U_3$ векторы падений напряжения соответственно уравнениям (23-25) и (23-26) (рис. 23-7, *а*) или уравнениям (23-27) и (23-28) (рис. 23-7, *б*).

И. Определение изменений напряжения расчетным путем. Будем определять изменения напряжения для номинальных значений токов I_2 и I_3. По аналогии с двухобмоточным трансформатором спроектируем, пользуясь диаграммой на рис. 23-7, *а*, все векторы падений напряжения один раз на направление вектора тока I_2 и перпендикулярное ему направление, а другой раз — на направление вектора тока I_3 и перпендикулярное ему направление.

Введем обозначения:

$$\frac{I_2 r_{к12}}{U_1}\cdot 100 = u_{ка12}; \quad (23\text{-}31а) \qquad \frac{I_2 x_{к12}}{U_1}\cdot 100 = u_{кr12}; \quad (23\text{-}31б)$$

$$\frac{I_2 r_1}{U_1}\cdot 100 = u_{ка2}; \quad (23\text{-}32а) \qquad \frac{I_2 x_1}{U_1}\cdot 100 = u_{кr2}; \quad (23\text{-}32б)$$

$$\frac{I_3 r_{к13}}{U_1}\cdot 100 = u_{ка13}; \quad (23\text{-}33а) \qquad \frac{I_3 x_{к13}}{U_1}\cdot 100 = u_{кr13}; \quad (23\text{-}33б)$$

$$\frac{I_3 r_1}{U_1}\cdot 100 = u_{ка3}; \quad (23\text{-}34а) \qquad \frac{I_3 x_1}{U_1}\cdot 100 = u_{кr3}. \quad (23\text{-}34б)$$

Тогда изменения напряжения в процентах от номинального значения U_1 выражаются в виде:

$$\Delta U_{12} = \frac{U_1 - U_2}{U_1}\cdot 100 = u_{ка12}\cos\varphi_2 + u_{кr12}\sin\varphi_2 + u_{ка3}\cos\varphi_3 + u_{кr3}\sin\varphi_3 + \frac{(u_{кr12}\cos\varphi_2 - u_{ка12}\sin\varphi_2 + u_{кr3}\cos\varphi_3 - u_{ка3}\sin\varphi_3)^2}{200}; \quad (23\text{-}35)$$

$$\Delta U_{13} = \frac{U_1 - U_3}{U_1}\cdot 100 = u_{ка13}\cos\varphi_3 + u_{кr13}\sin\varphi_3 + u_{ка2}\cos\varphi_2 + u_{кr2}\sin\varphi_2 + \frac{(u_{кr13}\cos\varphi_3 - u_{ка13}\sin\varphi_3 + u_{кr2}\cos\varphi_2 - u_{ка2}\sin\varphi_2)^2}{200}. \quad (23\text{-}36)$$

К. К. п. д. трехобмоточного трансформатора. Пусть P_1, P_2, P_3 — номинальные мощности обмоток трансформатора; k_1, k_2, k_3 — коэффициенты нагрузки в долях единицы; $\cos\varphi_2$ и $\cos\varphi_3$ — коэффициенты мощности для нагрузок k_2P_2 и k_3P_3; P_0 — потери холостого хода. Тогда величина к. п. д. трехобмоточного трансформатора в процентах выразится в виде:

$$\eta = \left[1 - \frac{P_0 + m(k_1I_1)^2 r_1 + m(k_2I_2)^2 r_2 + m(k_3I_3)^2 r_3}{k_2P_2\cos\varphi_2 + k_3P_3\cos\varphi_3 + P_0 + m(k_1I_1)^2 r_1 + m(k_2I_2)^2 r_2 + m(k_3I_3)^2 r_3}\right]\cdot 100 \quad (23\text{-}37)$$

Здесь m — число фазных обмоток.

К. п. д. трехфазных и однофазных силовых трехобмоточных трансформаторов, соответствующий наибольшим потерям и $\cos\varphi = 1$, находится в пределах 98,25 — 99,25%

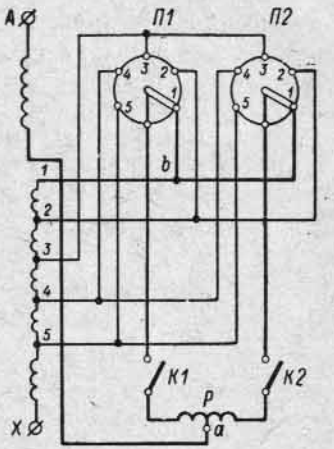
23-4. Трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой

Выше (см. § 12-2) мы уже говорили, что все силовые трансформаторы снабжаются ответвлениями для регулирования напряжения трансформатора, отключенного от первичной и вторичной сети. Но

при работе мощной электроэнергетической системы возникает необходимость перераспределять как активные, так и реактивные токи между различными элементами системы посредством регулирования ее напряжения в соответствующих точках. Это достигается при помощи специальных трансформаторов со ступенчатым регулированием напряжения под нагрузкой путем изменения коэффициента трансформации. Обычные пределы регулирования напряжения ± 10%, но в некоторых случаях они достигают ± 15% и более.

Переход под нагрузкой с одной ступени напряжения на другую должен происходить без разрыва рабочей цепи. Такое ступенчатое регулирование напряжения можно осуществить двумя путями: а) посредством изменения числа витков обмоток трансформатора и б) посредством специального вольтодобавочного трансформатора, включенного в цепь главного трансформатора и имеющего переменный коэффициент трансформации.

На рис. 23-8 показана схема первого рода. Здесь *А—Х* — обмотка однофазного или одна из обмоток трехфазного трансформатора; *Р* — реактор; *К1* и *К2* — контакторы; *П1* и *П2* — переключатели. В нормальных условиях контакторы *К1* и *К2* замкнуты, и переключатели *П1* и *П2* установлены на одних и тех же контактах, например *1—1* (положение *1* на таблице под рисунком). В средней точке *а* реактора *Р* ток разветвляется и идет параллельно по обеим — левой и правой — половинам схемы до точки *b* и дальше в обмотку. При этом н. с. обеих половин реактора направлены взаимно встречно, вследствие чего индуктивное сопротивление реактора невелико.



Элемент аппаратуры	Положения						
	①						②
Переключатель П1	1	1	2	2	2	2	2
Переключатель П2	1	1	1	1	2	2	2
Контактор К1	●			●	●	●	●
Контактор К2	●	●	●	●			●

● Контактор замкнут

Рис. 23-8. Схема регулирования напряжения под нагрузкой изменением числа витков обмотки трансформатора

Чтобы изменить коэффициент трансформации, поступаем следующим образом. Размыкаем контактор *К1* и направляем нагрузочный ток только по правой половине схемы через контактор *К2* и переключатель *П2*; переводим ручку переключателя *П1* с контакта *1* на контакт *2* и снова замыкаем контактор *К2*. Часть обмотки между контактами *1* и *2* оказывается замкнутой через реактор *Р*, который, таким образом, служит ограничителем тока короткого замыкания, возникающего в переключаемой части обмотки. То же проделываем и с правой частью схемы и этим завершаем регулировочную операцию. Последовательный ход операции в целом иллюстрируется таблицей под рис. 23-8. На схеме рис. 23-8 переключающая аппаратура включена в цепь обмотки последовательно и поэтому должна быть рассчитана

на полные ее ток и напряжение. Однако в некоторых случаях представляется целесообразным изолировать ее от линии. Этого достигают при помощи двух добавочных трансформаторов, а именно последовательного, включаемого в рассечку линии, и регулировочного, служащего для питания первого.

Каждый из добавочных трансформаторов рассчитывается на мощность, отвечающую пределам регулирования напряжения. Соответствующая схема для одной фазы показана на рис. 23-9. Здесь *РТ* — регулировочный трансформатор; *ПТ* — последовательный трансформатор; *Р* — реактор; *1*, *2*, *3*, *4*, *5* — контакторы. При работе замкнут какой-нибудь один контактор, например *1*. Ток течет по цепи, показанной жирными линиями, используя верхнюю половину реактора; при этом в ней возникает некоторое индуктив-

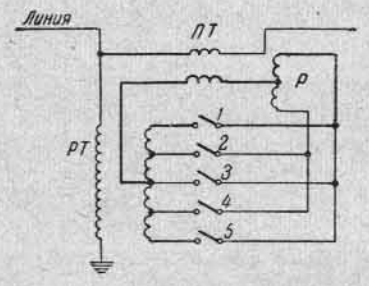


Рис. 23-9. Схема регулирования напряжения под нагрузкой при помощи вольтодобавочного трансформатора

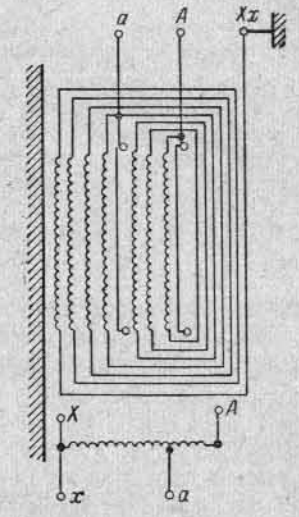


Рис. 23-10. Схема автотрансформатора, защищенного от перенапряжений

ное падение напряжения, с которым, однако при должном расчете реактора можно не считаться. При переключении мы замыкаем контактор *2*, не размыкая контактора *1*; на это время реактор *Р* является ограничителем тока короткого замыкания в части обмотки между контакторами *1* и *2*. Затем мы размыкаем контактор *1* и этим завершаем операцию переключения.

Вместо реакторов часто применяют активные токоограничивающие сопротивления. Но в отличие от реактора активный токоограничитель используется только на период замыкания контакторами переключаемой части обмотки.

На МТЗ был разработан трехфазный трехобмоточный трансформатор мощностью 40,5 тыс. *кв·а* с регулированием напряжения под нагрузкой на стороне обмотки ВН на 110 *кв*. Для ограничения тока короткого замыкания в переключаемой части был применен реактор вместо ранее предполагавшегося активного сопротивления.

Трансформаторы средней и малой мощности снабжаются регулировочной аппаратурой с автоматическим или ручным управлением. В США регулирование напряжения часто производится при помощи автотрансформаторов, которые показали себя в эксплуатации достаточно удобными и надежными аппаратами. Для защиты автотрансформатора от перенапряжений его обмотка снабжается двумя защитными экранами — внешним и внутренним, причем последний располагается в месте соединения обеих частей обмоток автотрансформатора (рис. 23-10).

23-5. Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

Плавное регулирование напряжения трансформаторов осуществляется с бóльшим трудом, чем ступенчатое, и соответственно этому такие трансформаторы выполняются на относительно меньшие мощности, преимущественно для специальных целей. Плавное регулирование напряжения достигается весьма различными путями, например: посредством перемещения ярма относительно одной из обмоток или обеих; при помощи реактора с передвижным стальным сердечником; путем перемещения одной обмотки относительно другой и магнитопровода. В 1927 г. В. А. Андроновым был взят первый патент на конструкцию регулировочных автотрансформаторов, после чего аналогичные конструкции появились и за границей. Обмотка автотрансформатора наматывается на его сердечник в один слой и обычно выполняется из неизолированного провода. По обмотке скользят щетки специальной конструкции, причем ширина щетки должна быть такой, чтобы переход с витка на виток происходил без разрыва рабочей цепи. Для ограничения тока короткого замыкания, возникающего в этом случае в перекрываемых щеткой витках обмотки, щетка может быть выполнена из ряда контактов, соединенных между собой активными сопротивлениями, или из угля с таким расчетом, чтобы поперечное сопротивление щетки было достаточно для ограничения тока короткого замыкания, а продольное не вызывало чрезмерно большого падения напряжения при протекании нагрузочного тока. Число витков обмотки выбирается так, чтобы на виток приходилось 0,5 — 1 *в* и чтобы, следовательно, регулирование напряжения происходило практически плавно.

В 1948 г. московский электромеханический завод «Гостеасвет» освоил серийный выпуск автотрансформаторов описанного выше типа с плавным регулированием напряжения под нагрузкой. Автотрансформаторы освоены в однофазном исполнении на мощность 20 *кв·а* и напряжение 220 *в* и в трехфазном исполнении на мощности 25—260 *кв·а* и напряжения 127—380 *в*; указанные выше значения мощностей и напряжений называются номинальными и соответствуют высшему пределу этих величин; при регулировании напряжение может быть понижено до нуля, а мощность нагрузки изменяется как функция вторичного напряжения; к. п. д. таких автотрансформаторов изменяется в пределах 0 — 98%.

23-6. Трансформаторы для ртутных выпрямителей (выпрямительные трансформаторы)

Общие принципы, лежащие в основе теории и проектирования силовых трансформаторов, применимы и к выпрямительным трансформаторам. Главная разница между обоими типами трансформаторов состоит в том, что благодаря вентильному действию ртутного выпрямителя каждый его анод работает только в течение части периода, соответственно чему условия работы первичной и вторичной обмоток выпрямительного трансформатора неодинаковы. Поэтому надо уточнить некоторые определения, данные для силовых трансформаторов.

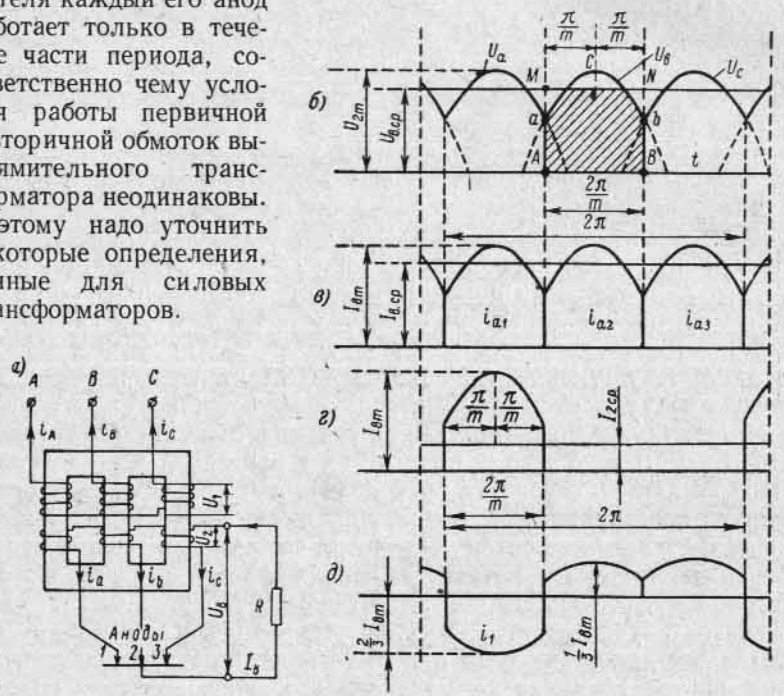


Рис. 23-11. Трехфазный выпрямитель при соединении обмоток трансформатора по способу звезда — звезда с выведенной нейтралью: *а* — схема соединений; *б* — выпрямленное напряжение; *в* — анодные токи; *г* и *д* — токи во вторичной и первичной обмотках трансформатора

1. Номинальной мощностью выпрямительного трансформатора называется мощность его первичной обмотки P_1, так как именно эта мощность подводится к трансформатору из сети. Номинальная мощность трансформатора выражается в киловольт-амперах.

2. Определение номинального первичного напряжения — см. § 12-4.

3. Номинальным вторичным напряжением выпрямительного трансформатора U_2 называется напряжение его вторичной обмотки между ее нейтральным (нулевым) и фазным выводами при холостом ходе трансформатора.

4. Номинальный первичный ток I_1 определяется по номинальной мощности трансформатора и номинальному первичному напряжению U_1.

5. Мощность вторичной обмотки выпрямительного трансформатора P_2 определяется как произведение номинального вторичного напряжения U_2 на действующее значение тока во вторичной обмотке I_2 при полной нагрузке на стороне выпрямленного тока. Мощность вторичной обмотки, так же как первичной, выражается в киловольт-амперах.

6. Номинальными значениями выпрямленного напряжения и тока называются напряжение $U_в$ и ток $I_в$ при полной нагрузке выпрямителя.

7. Типовой мощностью выпрямительного трансформатора называется полусумма мощностей первичной и вторичной обмоток, т. е.

$$P_т = \frac{1}{2}(P_1 + P_2). \qquad (23\text{-}38)$$

Рассмотрим несколько типичных схем выпрямления переменного тока.

А. Трехфазная схема выпрямления при соединении обмоток трансформатора по способу звезда—звезда с выведенной нейтралью. Соответствующая схема соединений показана на рис. 23-11, *а*. Будем считать, что индуктивность трансформатора равна нулю. В этом случае каждый последующий анод вступает в работу как раз в тот момент, когда предыдущий прекращает свою работу; соответственно этому кривая выпрямленного напряжения имеет вид, показанный на рис. 23-11, *б*.

Пусть $U_{в.\,ср}$ — среднее значение выпрямленного напряжения, m — число фаз, равное числу анодов, и пусть выпрямленное напряжение изменяется синусоидально в пределах угла $2\pi/m$. Отсчет времени условимся вести от момента, когда выпрямленное напряжение достигает своего наибольшего значения U_{2m}; тогда мгновенное значение напряжения в пределах угла $2\pi/m$ будет $U_{2m}\cos x$; среднее значение выпрямленного напряжения $U_в$ (индекс «ср» здесь и в дальнейшем тексте опускаем) равно высоте AM прямоугольника $AMNB$, равновеликого площади $AaCbB$. Следовательно,

$$U_в = \frac{1}{\frac{2\pi}{m}} \int_{-\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} U_{2m}\cos x\,dx = U_{2m}\frac{\sin\frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} = U_2\sqrt{2}\,\frac{\sin\frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}. \qquad (23\text{-}39)$$

Если выпрямитель нагружен только на активное сопротивление R, то выпрямленный ток имеет такую же форму, как и выпрямленное напряжение (рис. 23-11, *в*). Следовательно, среднее значение выпрямленного тока выражается формулой, аналогичной формуле (23-39), а именно:

$$I_в = I_{вm}\frac{\sin\frac{\pi}{m}}{\pi/m}. \qquad (23\text{-}40)$$

Каждая фаза вторичной обмотки трансформатора проводит ток только в течение $1/m$ части периода (рис. 23-11, *г*). Поэтому среднее значение тока в этой обмотке будет

$$I_{2ср} = I_в/m. \qquad (23\text{-}41)$$

Соответственно имеем действующее значение тока в той же обмотке:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{2\pi}{m} I_в^2} = \frac{I_в}{\sqrt{m}}. \qquad (23\text{-}42)$$

Приведем первичную обмотку ко вторичной. В этом случае $U_1 = U_2$, и кривая первичного тока на рис. 23-11, *д* состоит из участка, повторяющего собой по форме кривую вторичного тока, но имеющего амплитуду, равную $^2/_3$ амплитуды вторичного тока, и из двух участков обратного направления с амплитудами, равными $^1/_3$ амплитуды вторичного тока [см. формулы (19-28), (19-29) и (19-30)]. Тогда действующее значение первичного тока

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\frac{2\pi}{m}\left[\left(\frac{2}{3}I_в\right)^2 + 2\left(\frac{1}{3}I_в\right)^2\right]} = I_в\sqrt{\frac{2}{3m}}. \qquad (23\text{-}43)$$

Основной недостаток схемы звезда — звезда с выведенной нейтралью состоит в том, что н. с., создаваемые первичным и вторичным токами, не уравновешены. Для этого достаточно сопоставить между собой токи на рис. 23-11, *г* и *д*. Мы видим, что во всех трех стержнях трансформатора действуют неуравновешенные н. с., равные по величине каждая $^1/_3 I_{вm} w$ и направленные все в одну сторону. Эти условия работы выпрямительного трансформатора аналогичны условиям работы трансформатора по схеме звезда — звезда с выведенной нейтралью при несимметричной нагрузке (см. гл. 19). Так же как и там, в стержнях выпрямительного трансформатора возникают равные по величине и одинаково направленные магнитные потоки, замыкающиеся по воздуху от ярма к ярму (см. рис. 19-17). В результате сдвигается нейтральная точка и фазные напряжения искажаются (см. рис. 19-10), увеличиваются индуктивности рассеяния трансформатора и добавочные потери.

Схемами, не имеющими этого недостатка, являются: а) трехфазная мостовая схема, б) схема звезда — сдвоенный зигзаг и в) схема звезда — две обратные звезды с уравнительной катушкой.

Б. Трехфазная мостовая схема. Схема соединений показана на рис. 23-12, *а*. В этой схеме в любой момент работают два анода: один из четной группы, который имеет наибольшее напряжение, а другой из нечетной, у которого напряжение наименьшее. На рис. 23-12, *б* показаны вторичные фазные напряжения трансформатора. От точки *а* до точки *b* работают первый и второй аноды, потом первый анод выходит из работы, а третий входит в работу, так что работают второй и третий аноды и т. д. На рис. 23-12, *в* изображены вторичные линейные напряжения, получающиеся как разность двух соответствующих фазных напряжений на рис. 23-12, *б*. Так как любые два работающих анода включены на линейное вторичное напряжение, то эта же кривая (рис. 13-12, *в*) является кривой выпрямленного напряжения, которое,

таким образом, имеет шестикратные пульсации. При отсутствии индуктивности кривая тока повторяет кривую напряжения. На рис. 23-12, *г* показана кривая тока в фазе вторичной обмотки трансформатора. Часть кривой под осью абсцисс характеризует ток в аноде *1*, работающем поочередно с анодами *6* и *2*, а часть кривой над осью абсцисс характеризует ток в аноде *4*, работающем поочередно с анодами *3* и *5*.

Кривые выпрямленного напряжения и тока на рис. 23-12, *в* свидетельствуют о том, что в мостовой схеме получаются меньшие пульса-

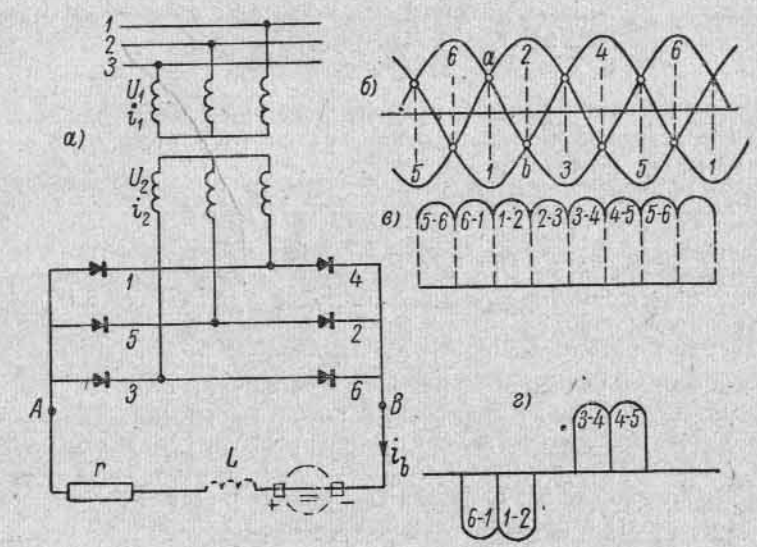


Рис. 23-12. Трехфазная мостовая схема: *а* — схема соединений; *б* — вторичные фазные напряжения трансформатора; *в* — выпрямленное напряжение; *г* — вторичный фазный ток трансформатора

ции выпрямленного напряжения, чем в трехфазной схеме с выведенной нейтралью. В этом отношении мостовая схема эквивалентна шестифазной схеме с выведенной нейтралью. Поэтому среднее значение выпрямленного напряжения можно получить по формуле (23-39), считая, что $m = 6$, и введя в нее множитель $\sqrt{3}$, поскольку выпрямленное напряжение равно линейному вторичному напряжению .Таким образом,

$$U_в = \frac{\sqrt{3}U_2\sqrt{2}\sin\frac{\pi}{6}}{\pi/6} = 1{,}35\sqrt{3}U_2 = 2{,}34U_2. \qquad (23\text{-}44)$$

Среднее значение выпрямленного тока и действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора определяются по формулам (23-40) и (23-42), если принять $m = 6$ и учесть, что одновременно

проводят ток два анода. Тогда

$$I_в = I_{вт} \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\pi/6}; \qquad (23\text{-}45)$$

$$I_2 = \frac{2}{\sqrt{6}} I_в = 0{,}817 I_в. \qquad (23\text{-}46)$$

Мощность вторичной обмотки

$$P_2 = 3U_2 I_2 = 3 \frac{U_в}{2{,}34} 0{,}817 I_в = 1{,}05 U_в I_в. \qquad (23\text{-}47)$$

Ток в первичной обмотке приведенного трансформатора, работающего в трехфазной мостовой схеме, равен току вторичной обмотки (рис. 23-12, *г*); поэтому имеем:

$$P_1 = P_2 = P_т = 1{,}05 U_в I_в. \qquad (23\text{-}48)$$

Коэффициент $k_т = U_в I_в / P_т$ называется коэффициентом использования трансформатора. В данном случае $k_т = 1/1{,}05 = 0{,}955$, т. е. он относительно высок.

Так как в мостовой схеме токи в первичной и вторичной обмотках трансформатора равны, то первичная и вторичная н. с. взаимно уравновешены и добавочный однофазный поток в сердечнике трансформатора отсутствует. Это составляет ценное преимущество мостовой схемы.

В установках с мощными ртутными выпрямителями главное значение имеют две схемы: а) звезда — двойной зигзаг и б) звезда — две обратные звезды с разделительной катушкой.

В. Схема звезда — двойной зигзаг (рис. 23-13, *а*). Первичная обмотка трансформатора соединена звездой, а каждая фаза вторичной обмотки разделена на три равные части, соединенные между собой зигзагом. Таким образом, например, к о н е ц части a_1, помещенный на стержне *A*, соединен с концами частей a_2 и a_3, помещенных на стержнях *B* и *C*. От нейтральной точки *O* вторичной обмотки идет провод к катоду ртутного выпрямителя, а концы обмоток *1*, *2*, *3*, *4*, *5*, *6* присоединяются к соответствующим анодам выпрямителя. На рис. 23-13, *б* построена диаграмма э. д. с. трансформатора, изображенного на рис. 23-13, *а*. Вторичная обмотка наматывается в противоположную относительно первичной обмотки сторону. Соответственно этому звезда э. д. с. $a_1 - b_1 - c_1$ повернута относительно звезды *A*—*B*—*C* на 180°. Э. д. с. частей a_2 и a_3 геометрически вычитаются из э. д. с. a_1, поскольку части обмоток соединяются своими концами; то же имеем и в двух других фазах. Результаты геометрического вычитания показаны на рис. 23-13, *б*. В целом напряжения *O1*, *O2*, . . . , *O6* между нейтральной точкой *O* и анодами *1*, *2*, . . . , *6* выпрямителя образуют симметричную шестифазную систему, в которой напряжения $O1 = O2 = \ldots = O6 = U_2$, где U_2 — напряжение между нулем и выходным зажимом трансформатора. Таким образом, схема на

рис. 23-13, *а* эквивалентна шестифазной схеме, поэтому [см. формулу (23-39)]

$$U_в = U_2 \sqrt{2} \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\pi/6} = 1{,}35 U_2. \qquad (23\text{-}49)$$

Ток в части вторичной обмотки, непосредственно соединенной с анодом, равен [см. формулу (23-42)]:

$$I_2 = \frac{I_в}{\sqrt{m}} = \frac{I_в}{\sqrt{6}} = 0{,}41 I_в. \qquad (23\text{-}50)$$

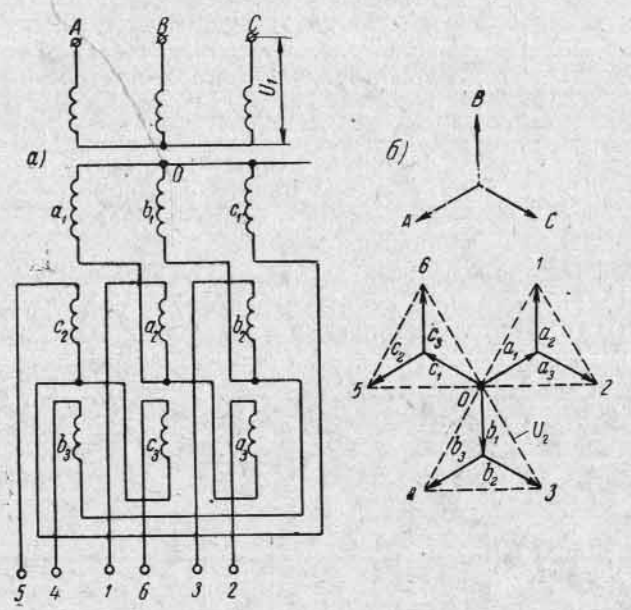


Рис. 23-13. Трансформатор для ртутного выпрямителя: *а* — соединение обмоток по схеме звезда — двойной зигзаг; *б* — диаграмма э. д. с.

Ток в части обмотки, присоединенной к нейтральной точке, представляет собой совокупность токов двух анодов, и его действующее значение составляет

$$I_2' = 0{,}41 \sqrt{2} I_в = 0{,}58 I_в. \qquad (23\text{-}51)$$

Так как в рассматриваемом случае $m = 6$, то мощность вторичной обмотки будет

$$P_2 = 6 U_2 I_2 = 6 \frac{U_в}{1{,}35} 0{,}41_в = 1{,}81 U_в I_в. \qquad (23\text{-}52)$$

Мощность первичной обмотки та же, что в мостовой трехфазной схеме, т. е.

$$P_1 = 1{,}05 U_в I_в. \qquad (23\text{-}53)$$

Следовательно, типовая мощность трансформатора составляет

$$P_т = \frac{1}{2}(1{,}81 + 1{,}05)\, U_в I_в = 1{,}43 U_в I_в. \qquad (23\text{-}54)$$

На рис. 23-14 показана внешняя характеристика выпрямительной установки, работающей по схеме рис. 23-13, *а*. Характеристика похожа на внешнюю характеристику обычного трансформатора, но работа выпрямительного трансформатора все же несколько отлична от работы обычного трансформатора, так как по вторичной обмотке выпрямительного трансформатора протекает постоянная составляющая тока, увеличивающая потоки рассеяния этого трансформатора и его добавочные потери.

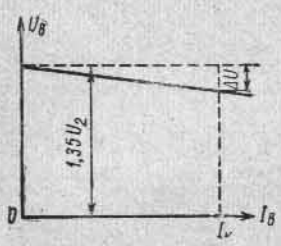


Рис. 23-14. Кривая $U_в = f(I_в)$ в схеме звезда — двойной зигзаг

Схема звезда — двойной зигзаг применяется в выпрямительных установках мощностью до 1000 *кв·а*. Напряжение короткого замыкания выпрямительного трансформатора 4—5%.

Г. Схема звезда — две обратные звезды с разделительной катушкой (рис. 23-15, *а*). Вторичная обмотка трансформатора состоит из двух вывернутых относительно друг друга звезд, между нейтральными точками которых O_1 и O_2 включена однофазная реактивная катушка

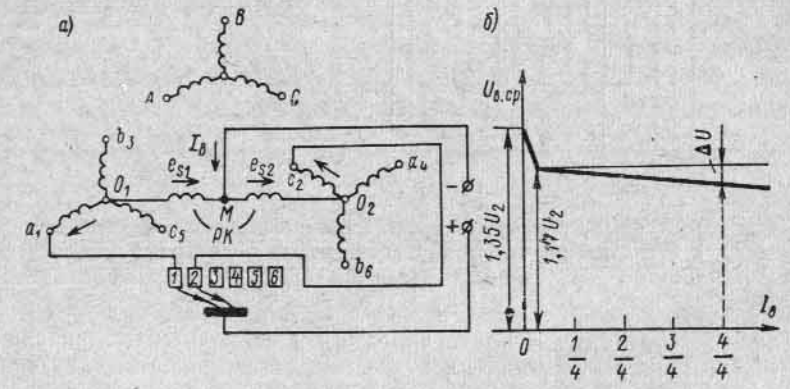


Рис. 23-15. Схема соединения звезда — двойная звезда с разделительной катушкой (*а*) и внешняя характеристика выпрямителя (*б*)

РК. Одна звезда питает нечетную группу анодов *1*, *3*, *5*, другая — четную группу *2*, *4*, *6*. Присоединив среднюю точку *M* катушки к отрицательному полюсу цепи с выпрямленным током, мы видим, что обе звезды могут работать параллельно, причем в каждую из них включена половина реактивной катушки. Предположим, что в данный момент анод *1* имеет наивысшее напряжение, под действием которого

по цепи анода начинает протекать ток $I_в$. Так как этот ток проходит по левой половине реактивной катушки, то в ней создается поток, наводящий в обеих половинах катушки э. д. с. e_{s1} и e_{s2}. При возрастании анодного тока э. д. с. e_{s1} имеет направление, при котором она стремится противодействовать возрастанию тока и, следовательно, снижает напряжение фазы O_1a_1 относительно точки *M*. Наоборот, э. д. с. e_{s2} в правой половине катушки, имеющая то же направление, что э. д. с. e_{s1}, стремится повысить напряжение фазы O_2c_2 относительно точки *M*. В результате напряжения фаз O_1a_1 и O_2c_2 выравниваются и, следовательно, реактивная катушка играет роль уравнителя, принуждающего аноды *1* и *2* работать параллельно. Если сопротивления обеих вторичных звезд трансформатора равны, то нагрузочный ток распределится пополам между обеими звездами. В последующем такие же условия работы создаются для анодов *2—3* *3—4* и т. д.

Второе ценное свойство этой схемы состоит в том, что при одновременной параллельной работе двух анодов каждый из них загорается на 1/12 периода раньше, чем при шестифазном режиме, и затухает на 1/12 периода позже. Следовательно, анод работает не одну шестую часть периода, как в схеме на рис. 23-13, а одну треть его, т. е. так же, как в трехфазном выпрямителе.

Преимущества этой схемы состоят в том, что она а) облегчает работу анодов и повышает нагрузочную способность выпрямителя, так как при заданном значении выпрямленного тока $I_в$ на каждый из двух параллельно работающих анодов приходится примерно половина тока $I_в$; б) позволяет лучше использовать трансформатор, поскольку выпрямитель переходит с шестифазного режима работы на трехфазный, и в) обладает меньшим падением напряжения ΔU или при заданном значении ΔU может иметь большее напряжение короткого замыкания, что в некоторых случаях, например в тяговых установках, весьма существенно.

Так как в рассматриваемом случае выпрямитель работает по трехфазной схеме с выведенной нейтральной точкой и, согласно сказанному выше, каждый анод проводит половину тока $I_в$, то по формулам (23-39) и (23-42) имеем:

$$U_в = U_2\sqrt{2}\,\frac{\sin\frac{\pi}{3}}{\pi/3} = 1{,}17U_2 \text{ и } I_2 = \frac{I_в}{2\sqrt{3}} = 0{,}289 I_в.$$

Следовательно, мощность вторичной обмотки

$$P_2 = 3U_2 \cdot 2I_2 = 3\,\frac{U_в}{1{,}17}\,2 \cdot 0{,}289 I_в = 1{,}49 U_в I_в. \qquad (23\text{-}55)$$

Мощность первичной обмотки та же, что в схеме на рис. 23-13, *а*, т. е.

$$P_1 = 1{,}05 U_в I_в. \qquad (23\text{-}56)$$

Соответственно типовая мощность трансформатора будет

$$P_т = \frac{1}{2}(1{,}49 + 1{,}05)\, U_в I_в = 1{,}27 U_в I_в. \qquad (23\text{-}57)$$

Недостаток этой схемы состоит в том, что при изменении нагрузки от холостого хода примерно до 1% происходит резкий скачок напряжения от $U_в = 1{,}35\,U_2$ до $U_в = 1{,}17\,U_2$, т. е. на 15% (рис. 23-15, *б*). Это объясняется тем, что при очень малых токах нагрузки разделительная катушка не получает необходимого для ее работы намагничивающего тока и этим как бы выключается из схемы. В этих условиях выпрямитель работает как шестифазный, в котором соответственно формуле (23-49) $U_в = 1{,}35U_2$. При увеличении тока сверх 1% от номинального катушка нормально намагничивается, и выпрямитель начинает работать как трехфазный, у которого $U_в = 1{,}17U_2$. Чтобы снять этот пик напряжения, к выпрямителю присоединяют такое балластное сопротивление, которое обеспечило бы нагрузку порядка 1%, или же пользуются специальным трансформатором, намагничивающим разделительную катушку.

Напряжение короткого замыкания трансформаторов, работающих в схеме на рис. 23-15, *а*, составляет 5—8%; к. п. д. выпрямительных трансформаторов несколько ниже, а масса несколько больше, чем у силовых трансформаторов. Внешнее выполнение выпрямительных трансформаторов — баки, крышка бака, контрольные и защитные приспособления и др.— имеют обычный характер.

23-7. Испытательные трансформаторы

Для испытания материалов и для различного рода исследований необходимы напряжения порядка 500—2000 *кв* при обычной промышленной частоте. Основным оборудованием для получения таких напряжений являются испытательные трансформаторы.[1] Первоначальные конструкции испытательных трансформаторов, мало чем отличавшиеся от конструкций обычных силовых трансформаторов, оказались неудовлетворительными. Поэтому были разработаны специальные конструкции испытательных трансформаторов, основывающиеся на следующих принципах:

1) принудительное распределение высокого напряжения по всей высоковольтной схеме, благодаря чему фиксируются потенциалы отдельных узловых точек схемы относительно земли;

2) дробление общего напряжения на несколько трансформаторов, соединяемых последовательно или в каскад;

3) применение вспомогательных, так называемых изолирующих трансформаторов;

4) применение конструкции обмотки высокого напряжения по типу конденсаторного изолятора.

При этом испытательные трансформаторы могут быть как масляные, так и сухие.

Схемы, основанные на первом принципе, в настоящее время не имеют практического значения. Схемы, соответствующие второму принципу, показаны на рис. 23-16 и 23-17.

[1] Для импульсных испытаний с напряжением порядка от нескольких мегавольт до 10 *Мв* служат так называемые генераторы импульсов в виде специальных конденсаторных схем.

На рис. 23-16 трансформаторы *I* и *II* соединены последовательно и каждый из них рассчитан на половину $U_0/2$ общего напряжения U_0. Трансформатор *II* поставлен на изоляторы, находящиеся под напряжением $U_0/2$. Чтобы потенциал обмотки высокого напряжения ВН трансформатора *II* относительно сердечника этого же трансформатора был строго фиксирован, сердечник и бак (если трансформатор масляный) соединяют с нулевым концом обмотки ВН этого трансформатора. Возбуждение трансформатора *II*, у которого сердечник и бак находятся под потенциалом $U_0/2$ относительно земли, можно осуществить с помощью так называемого изолирующего трансформатора (*III* — на рис. 23-16) с коэффициентом трансформации $k = {}^1/_1$, причем изо-

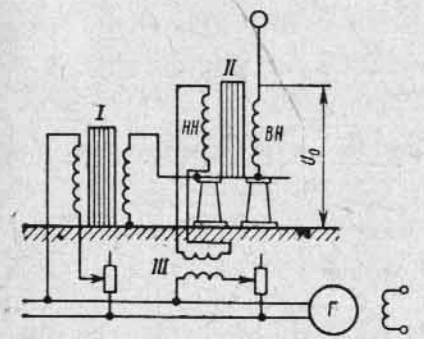


Рис. 23-16. Схема испытательного трансформатора с изолирующим трансформатором

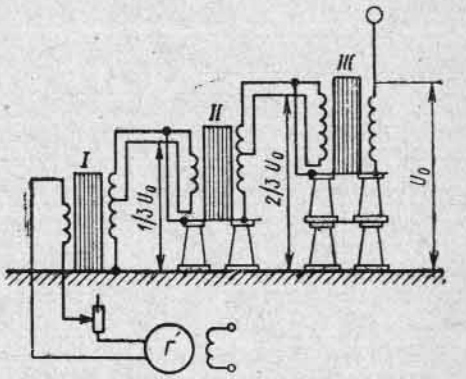


Рис. 23-17. Схема каскадного испытательного трансформатора с возбуждением по принципу автотрансформатора

ляция между обмотками изолирующего трансформатора рассчитана на напряжение $U_0/2$. Трансформаторы *I* и *III* получают возбуждение от генератора *Г*. По этому принципу была построена одна из первых установок на 1 *Мв* из трех трансформаторов, из которых один изолирующий.

Если число последовательно включаемых трансформаторов больше трех, то установка с применением изолирующих трансформаторов становится громоздкой; поэтому в настоящее время чаще применяется принцип каскадного возбуждения трансформаторов, в частности, путем соединения их по автотрансформаторной схеме (рис. 23-17). Возбуждение второго и соответственно третьего трансформаторов производится от части обмотки высшего напряжения предыдущего трансформатора (на рис. 23-17 эти части показаны жирными линиями). Для этого оба конца каждой из возбуждающих обмоток выведены через изолятор высокого напряжения к обмотке возбуждения последующего трансформатора. По этому принципу можно построить и сдвоенные каскады на напряжения до 2 *Мв* при заземленной средней точке при числе трансформаторов в сдвоенном каскаде от четырех до восьми.

Однако недостатки каскадов довольно значительны. Поскольку каждый последующий трансформатор получает энергию от предыдущего, мощность каждого из них различна. Если по схеме на рис. 23-17 мощность трансформатора *III* равна P, то мощность трансформатора *II* должна быть равна $P + P = 2P$, а мощность трансформатора *I* равна $P + 2P = 3P$; общая установленная мощность $6P$, тогда как мощность каскада — всего $3P$. Кроме того, с увеличением числа звеньев каскада сильно возрастает его общая индуктивность. Если, например, при одном трансформаторе она составляет 1,25%, то при двух — 4%, при трех — 9%, а при четырех — даже 16,4%. Третий недостаток каскадной схемы заключается в неравномерном распределении импульсных напряжений по отдельным звеньям каскада аналогично распределению таких напряжений вдоль обмотки одного трансформатора. Между тем обычная работа каскада (при разрядах и т. п.) как раз сопровождается импульсными перенапряжениями.

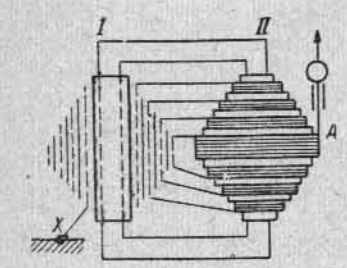


Рис. 23-18. Схема расположения обмоток испытательного трансформатора по комбинированной схеме

Поэтому все время делаются попытки создания испытательных трансформаторов на полное напряжение U_0 в одной единице, и такие трансформаторы построены уже на напряжения до 1 *Мв*. Трансформатор конструируется наподобие изоляторов конденсаторного типа (рис. 23-18). Обмотка высокого напряжения из круглого провода наматывается в один слой на изолирующие цилиндры. Число цилиндров, а также их длина и диаметр подбираются так, чтобы при последовательном соединении конца обмотки первого цилиндра стержня *I* с началом обмотки первого цилиндра стержня *II*, конца обмотки первого цилиндра стержня *II* с началом обмотки второго цилиндра стержня *I* и т. д. нарастание потенциала по виткам, начиная от заземленного начала обмотки первого цилиндра стержня *I*, соответствовало распределению потенциала по емкости концентрических слоев обмотки.

Испытательный трансформатор в масляном исполнении относительно громоздок и тяжел, особенно при высоких напряжениях. Ясно, что, например, установка на рис. 23-17 нуждается в кране для монтажа и демонтажа каскада при осмотрах и ремонтах, и подобные работы являются в данном случае весьма трудоемкими.

Большое преимущество сухих испытательных трансформаторов заключается в отсутствии чрезвычайно громоздких и дорогих проходных изоляторов, а также в том, что, несмотря на довольно большие размеры сердечников и обмоток, масса сухих трансформаторов из-за отсутствия бака и масла получается значительно меньше массы таких же трансформаторов масляных. При надлежащем выполнении трансформатора по рис. 23-18 на него не оказывают вредного воздействия пыль и сырость и при ремонте его разборка относительно проста. Сухие испытательные трансформаторы конденсаторного типа могут быть выполнены на напряжение до 1 *Мв* в единице.

23-8. Сварочные трансформаторы

Сварочные трансформаторы имеют различное конструктивное оформление в зависимости от того, какой является сварочная операция — дуговой, стыковой, шовной или точечной. Здесь мы будем иметь в виду только трансформаторы для сварки дугой.

Сварочный трансформатор, так же как и сварочная машина постоянного тока, должен иметь достаточное для зажигания дуги напряжение холостого хода порядка 60—70 *в* и круто падающую внешнюю характеристику. В простейшем случае для этой цели можно было бы использовать автотрансформатор, который может дать хорошие технические и экономические показатели, но неприемлем с точки зрения безопасности сварщика, так как последний может попасть под полное напряжение сети. Поэтому сварочные трансформаторы выполняются практически только с раздельными первичной и вторичной обмотками. Для получения требуемой внешней характеристики сварочные трансформаторы выполняются с относительно большим рассеянием или в самом трансформаторе, или в отдельном реакторе (рис. 23-19). Регулирование сварочного тока может производиться: а) ступенями — путем переключения секцией одной или нескольких обмоток или б) плавно — посредством изменения магнитного сопротивления самого трансформатора или соединенного с ним реактора.

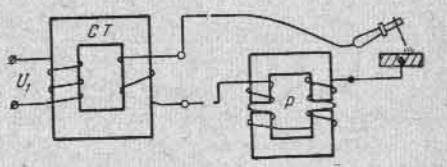


Рис. 23-19. Принципиальная схема сварочного трансформатора для сварки дугой

Для иллюстрации приводим данные трансформатора СТЭ-34 для ручной дуговой сварки в исполнении завода «Электрик».

Номинальные данные трансформатора: $P_н = 30$ *кв·а*, $U_1/U_2 = 220/60$ *в*, $I_1/I_2 = 147/500$ *а*, однофазный, 50 *гц*, принятая продолжительность работы (ПР) 65%.

Расчетные и конструктивные данные: сердечник стержневой; сталь Э41-0,5; индукции: в стержне 1,3 *тл*, в ярме 1,26 *тл*; сечение стержня прямоугольное 93 × 120 *мм*²; размеры окна — высота 274 *мм*, ширина 93 *мм*; ток холостого хода 3,4%; масса стали 87,5 *кг*; э. д. с. на виток 2,98 *в*; обмотки цилиндрического типа двухслойные с каналом между слоями; вторичная обмотка — из голой меди; плотности тока в обмотках при ПР = 65%: в первичной 2,11 *а/мм*², во вторичной 3,2 *а/мм*²; масса обмоток 46,8 *кг*; расчетный к. п. д. 93%.

Реактор-регулятор — однофазный, 50 *гц*, ПР = 65%, напряжение 50 *в*, э. д. с. на виток 3,57 *в*, сталь Э41-0,5, индукция в стержне 1,18 *тл*, размеры стержня 100 × 130 *мм*, обмотка цилиндрическая, провод голый 9 × 12,5 *мм*, плотность тока 3,48 *а/мм*².

23-9. Краткие сведения о трансформаторах разных типов

А. Трансформаторы тока. Первичная обмотка трансформатора тока состоит из одного или небольшого числа витков относительно большого сечения и включается последовательно в цепь, ток которой

измеряется (рис. 23-20). Наоборот, вторичная обмотка состоит из большого числа витков сравнительно малого сечения и замыкается на приборы, с ничтожным сопротивлением — амперметры, последовательные обмотки ваттметров, счетчиков и т. д. Таким образом, рабочий режим трансформатора тока представляет собой практически режим короткого замыкания. При номинальном токе индукции в сердечнике трансформатора тока $B = 0{,}08 \div 0{,}10$ *тл*. Если пренебречь весьма небольшим намагничивающим током I_0, необходимым для создания такой индукции, то $I_1 : I_2 = w_2 : w_1 = k$. В действительности ток I_0 существует, и это влечет за собой, во-первых, «токовую» погрешность $\Delta i = \frac{kI_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\%$, а во-вторых, угловую погрешность, поскольку ток I_0 сдвинут по фазе относительно токов I_1 и I_2.

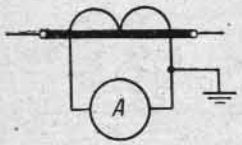


Рис. 23-20 Схема трансформатора тока

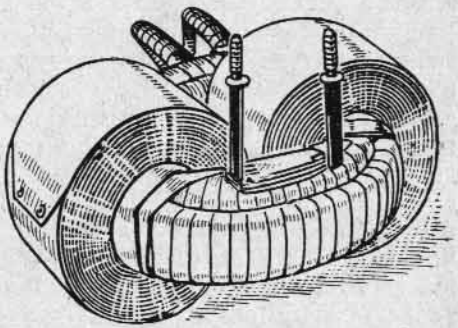
По величине гарантируемой погрешности трансформаторы тока делятся на пять классов точности, а именно 0,2; 0,5; 1; 3 и 10, причем за обозначение класса точности принята величина предельной токовой погрешности при номинальном токе. Трансформаторы тока изготовляются на номинальные первичные токи в пределах от 5 до 15 000 *а* и имеют, как правило, номинальный вторичный ток $I_{2н} = 5$ *а* (для внутренних установок). В зависимости от назначения трансформаторы могут иметь весьма различное конструктивное оформление. Различают: проходные трансформаторы тока, имеющие форму проходных изоляторов, шинные — для больших токов с одним витком в первичной обмотке, лабораторные — одно- или многовитковые и т. д. В целях безопасности вторичная обмотка трансформатора должна быть надежно заземлена.

Следует особо подчеркнуть, что вторичную обмотку ни в каком случае нельзя оставлять разомкнутой при включении трансформатора или размыкать ее при работе. В этом случае трансформатор попадает в режим холостого хода. Индукция в стали сердечника возрастает во много раз по сравнению с ее нормальным значением — до 1,4 — 1,8 *тл* (вместо 0,08 — 0,1 *тл*); соответственно этому растут потери в стали, и при длительной работе неизбежен перегрев сердечника и порча изоляции вторичной обмотки. Но главную опасность представляет напряжение на зажимах разомкнутой вторичной обмотки U_{20}, имеющее резко пикообразный характер, объясняемый весьма сильным насыщением стали, вследствие чего поток трансформатора приобретает вид сильно уплощенной кривой. Пики U_{20} в многоамперных трансформаторах тока достигают нескольких тысяч вольт и более и, следовательно, представляют опасность для персонала. Из этого видно, насколько важно, чтобы вторичная обмотка трансформатора тока была постоянно замкнута на себя или на приборы.

Б. Трансформаторы напряжения. Условия работы трансформаторов напряжения соответствуют работе трансформаторов в режиме холостого хода. Номинальные вторичные напряжения трансформаторов напряжения по ГОСТ должны быть равны 100, $100/\sqrt{3}$ или 100/3 *в*.

Чтобы допускаемая погрешность трансформатора не выходила за определенные пределы, намагничивающий ток трансформатора должен быть ограничен. Для этого трансформатор выполняют из стали высокого качества, относительно слабо насыщенной ($B \leqslant 0{,}6 \div 0{,}8$ *тл*). По величине допускаемой погрешности трансформаторы напряжения делятся на четыре класса точности — 0,2; 0,5; 1 и 3 и выполняются как в виде однофазных трансформаторов на номинальные мощности до 1000 *в·а*, так и в виде трехфазных трансформаторов на мощности до нескольких киловольт-ампер.

Конструкция трансформаторов напряжения, изготовляемых МТЗ, подверглась коренной переработке. В новой конструкции применены броневые магнитопроводы и концентрические слоевые обмотки из эмалированного провода. В результате удалось добиться значительного уменьшения массы и габаритов: так, например, полная масса однофазного масляного трансформатора напряжения на 6 *кв* снижена с 38,8 до 23 *кг*, т. е. на 40,5%; того же трансформатора на 35 *кв* — с 385 до 230 *кг*, т. е. на 40%.


Рис. 23-21. Трансформатор с намотанным сердечником

В. Трансформаторы с намотанным сердечником. На рис. 23-21 показан броневой трансформатор с намотанным из холоднокатаной стали сердечником. Такие трансформаторы дают экономию материалов в размере 15—20% благодаря отсутствию или значительному уменьшению воздушных зазоров и предельному уменьшению отходов стали. Трансформаторы с намотанным сердечником изготовляются на мощности до 500 *кв·а* только в однофазном исполнении, так как трехфазное исполнение представляет большие конструктивные трудности.

Г. Трансформаторы пожаро- и взрывобезопасные. Обычное трансформаторное масло горюче, а его пары в смеси с воздухом могут образовать взрывчатые смеси. Поэтому возникла потребность в трансформаторах пожаро- и взрывобезопасных.

Вопрос допускает несколько решений. Одним из них является заполнение бака негорючим и невзрывающимся маслом. В 1935 г. в ВЭИ был разработан жидкий негорючий диэлектрик совол, а несколько позже — менее вязкий совтол. В 1938 г. МТЗ изготовил опытный образец совтолового трансформатора. К сожалению, присущие совтолу недостатки (см. § 12-5 п. Д) мешают его широкому применению.

Второе возможное решение того же вопроса — сухой трансформатор. Отсутствие масла и масляного хозяйства составляет его ценное преимущество, но условия охлаждения и изоляции тяжелее, чем в масляном. Достигнуты большие успехи по созданию экономичных сухих трансформаторов в результате применения холоднокатаной стали

и высоконагревостойких изоляционных лаков. Так, например, масса сухого трансформатора мощностью 50 *кв·а* в 1938 г. составляла 557 *кг*, в 1942 г.— 263 *кг* и в 1944 г.— 205 *кг*. В настоящее время изготовляются сухие трансформаторы на мощности до 4000 *кв·а* и рабочее напряжение до 15 *кв*.

Обмоточная медь имеет стеклянную или асбестовую изоляцию на специальном лаке, выдерживающем длительно 160° С. Каждая обмотка в отдельности пропитывается нагревостойким лаком и запекается при высокой температуре; кроме того, пропитке и запеканию подвергается вся выемная часть трансформатора. Допускается средний по сопротивлению перегрев обмотки на 80° С и температура наиболее нагретой точки обмотки 140—155° С при температуре окружающего воздуха 40° С.

Третье возможное решение вопроса о пожаро- и взрывобезопасном трансформаторе — трансформаторы с заполнением бака поверх масла инертным газом при обычном давлении. Исследования показали, что для предохранения масла и изоляции трансформатора от окисления под действием кислорода, содержащегося в масле в растворенном виде, достаточно применять азот. После соответствующей обработки содержание кислорода в масле падает до нескольких долей процента, а в эксплуатационных условиях, при наличии достаточно надежных уплотнений и влаго- и кислородопоглощающих фильтров, не превышает 1%. Но снижение содержания кислорода до 3% уже делает эти трансформаторы пожаро- и взрывобезопасными, хотя они и нуждаются в наблюдении и уходе.

Дальнейшим развитием этого типа трансформатора являются трансформаторы со сжатым газом, т. е. такие, баки которых заполнены только газом под некоторым давлением. В качестве газа рекомендуется брать азот или углекислоту под давлением до 40 *ат*. Основное преимущество таких трансформаторов состоит в том, что их можно выполнить на температуры, значительно превышающие обычные температуры сердечника и обмотки (300—325° С для первого и 200° С для второй) при использовании высоконагревостойких изоляционных материалов. В этом случае размеры трансформатора уменьшаются до 75%, особенно при повышенной частоте порядка 600—1200 *гц*.

Глава двадцать четвертая

СТАРЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ И НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕАКТОРОВ [172, 211, 240—246]

Многочисленные лабораторные испытания и исследования показали, что электрическая прочность изоляции не понижается, пока она не лишается механической прочности.

Потерявшая полностью эластичность, но не имевшая механических повреждений изоляция сохраняет довольно высокую электрическую прочность. Однако потерявшая свою эластичность изоляция становится хрупкой под влиянием имеющих место вибраций и динамических усилий.

Судить о степени эластичности изоляции только по ее электрической прочности невозможно, поэтому приходится определять степень старения изоляции исключительно по ее механической прочности. Действительный срок службы трансформатора определяется по его механической прочности. Однако пока не имеется надежных данных о влиянии степени износа изоляции на надежную работу трансформатора.

Нужно указать на то, что, например, при температурном воздействии на кабельную бумагу падение ее механической прочности на разрыв, растяжение, продавливание и на излом выражается количественно достаточно далекими друг от друга числами.

В настоящее время наиболее точно установлена зависимость между температурным воздействием на изоляцию и низшим пределом ее механической прочности по сопротивлению на разрыв. Вследствие этого можно называть «кривой жизни» изоляции кривую $Z = f(\vartheta)$, дающую для каждой данной температуры ϑ время Z, в течение которого прочность на разрыв снижается до предельно допустимого значения. Подвергшись воздействию данной температуры в течение времени, большего предусмотренного по «кривой жизни», изоляция будет по своему физическому состоянию уже непригодной для надежной работы трансформатора.

Эта функция $Z = f(\vartheta)$ может быть представлена в виде

$$Z = ce^{-\alpha\vartheta}, \tag{24-1}$$

где c и α имеют численные значения, определенные на основании практики эксплуатации. Эксперименты показали, что для практического диапазона температур можно принять $\alpha = 0{,}088$, что приведет к следующему «8-градусному» правилу: каждые 8 градусов повышения температуры изоляции сокращают время ее практического износа в два раза.

Если принять $\vartheta' = \vartheta + 8$, то

$$Z' = ce^{-\alpha(\vartheta+8)}. \tag{24-2}$$

Разделив уравнение (24-2) на (24-1), получим

$$\frac{Z'}{Z} = e^{-\alpha\cdot 8} = e^{-0{,}088\cdot 8} = \frac{1}{2}.$$

Исходя из указанных выше соображений, подтвержденных данными эксплуатации о том, что при наличии наиболее горячей точки обмотки с температурой $\vartheta = 95° = \text{const}$ трансформатор имеет нормальный срок службы порядка 20 лет, можно установить нормальные и аварийные перегрузки силовых трансформаторов, допустимые в эксплуатации.

Предельные нормы нагрева в установившемся режиме допускаются при номинальной мощности трансформатора.

При режимах кратковременных и периодических нагрузок допустимые предельные температуры должны являться функцией продолжительности рабочего времени (или рабочей части периода).

Ясно, что максимально допустимая кратковременная нагрузка зависит от коэффициента заполнения графика нагрузки за определенный промежуток времени и, в частности, суточного графика нагрузки.

Из изложенных соображений вытекает, что для разумной эксплуатации трансформатора недостаточно исходить лишь из режима номинальной мощности, а необходимо рассматривать и нагрузочную способность. Важнейшим критерием в этом случае является срок службы трансформатора, а не превышение температур при определенной заданной нагрузке.

Нагрузочной способностью трансформатора является та максимальная нагрузка, которую трансформатор без ущерба для своего срока службы может длительно нести в данных режимах эксплуатации, определяемых графиком потребления и условиями охлаждения среды.

Трансформатор с масляным естественным или форсированным охлаждением, установленный на открытом воздухе в местности, где температура окружающего воздуха изменяется от + 5 до + 35° С, может круглосуточно работать при указанной на щитке номинальной нагрузке. При этом обеспечивается нормальный срок службы трансформатора (порядка 20 лет), ограничиваемый, как указывалось выше, допустимым износом изоляции его обмоток.

В обычных условиях эксплуатации нагрузка трансформатора не является постоянной и изменяется в течение суток и в зависимости от времени года.

Если максимум изменяющейся нагрузки равен номинальной мощности в киловольт-амперах, то нагрузочная способность трансформатора используется недостаточно. Нагрузочная способность используется тем полнее, чем больше максимум изменяющейся нагрузки по сравнению с номинальной мощностью.

При максимальном использовании нагрузочной способности трансформатора износ изоляции будет составлять около 80% от естественного износа, имеющего место при непрерывной неизменной номинальной нагрузке. При постоянной суточной нагрузке, равной 100%, этому соответствует максимальный допустимый ток, равный 0,975 $I_н$.

Таким образом, не только сохраняется нормальный срок службы трансформатора, но и остается достаточный запас на аварийные перегрузки.

Коэффициент заполнения суточного графика нагрузки есть отношение площади графика нагрузки к площади прямоугольника, сторонами которого является абсцисса $T = 24$ *ч* и ордината $I_{макс}$ — максимум графика:

$$S = \frac{\Sigma I\,\Delta t}{24 I_{макс}},$$

т. е. отношение среднесуточной нагрузки к максимальной.

Если среднегодовая температура воздуха $\vartheta_в$ в месте установки трансформатора отлична от + 5° С, то указанная на его щитке номинальная мощность $P_н$ должна быть пересчитана по формуле

$$P'_н = P_н\left(1 + \frac{5 - \vartheta_в}{100}\right). \qquad (24\text{-}3)$$

Нагрузка трансформатора летом, как правило, значительно ниже нагрузки в зимние месяцы и ниже номинальной нагрузки; износ изоляции в летний период, следовательно, меньше естественного. Это позволяет в зимние месяцы без ущерба для нормального срока службы трансформатора увеличить отношение максимума нагрузки к номинальной (или пересчитанной).

Если за период с июня по август максимальная нагрузка на p% ниже $P_н$ (или $P'_н$), то в течение декабря — марта максимум нагрузки может быть увеличен на те же p% от $P_н$ (или $P'_н$), но не более чем на 15%.

В трансформаторе, предназначенном для работы в жарком климате, получаются другие условия работы по отношению к номинальной мощности, т. е. более тяжелые. Наоборот, при эксплуатации в холодном климате средняя годовая температура будет меньше, что должно благоприятно отразиться на средней годовой температуре трансформатора и его нагрузочной способности.

При расчетах нагрузочной способности трансформаторов с дутьевым охлаждением следует принимать во внимание, что нагрузка при выключенном дутье эквивалентна нагрузке с включенным дутьем, увеличенной на 30% от номинальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Введение

1. **Holz A.** Die Schule des Elektrotechnikers. Bd. 1, 2, 3. Leipzig, 1896.
2. **Ефремов Д. В., Радовский М. И.** а) История динамомашины. Изд-во АН СССР, 1934, б) История электродвигателя. Изд-во АН СССР, 1936.
3. **Доливо-Добровольский М. О.** Классики русской энергетики. Избранные труды (о трехфазном токе). М.—Л., Госэнергоиздат, 1948.
4. **Michalowicz J.** Origin of the electric motor. «El. Eng», 1948, p. 1035.
5. **Шателен М. А.** Русские электротехники М.—Л., Госэнергоиздат, 1955.
6. **Dibner B.** a) Ten founding fathers of the electrical science. «El. Eng.», 1954, Gielbert W. p. 306; Guericke O. p. 396; Franklin B. p. 506; Volta A. p. 600; Ampere A. p. 724; Ohm G. p. 796; Gauss K. p. 874; Faraday M. p. 966; Henry J. p. 1072. «El. Eng.», 1955; Maxwell J. p. 40; б) Early electrical machines. «El. Eng.», 1957, pp. 367, 497, 592, 689, 795, 884; в) Oersted and the discovery of electromagnetism. «El. Eng.», 1961, pp. 321, 426, 582, 677.
7. **Swezey K.** Nicola Tesla — pathfinder of the electrical age. «El. Eng.», 1956, p. 786.
8. **Halacsy A., Fuchs G.** Transformer invented 75 years ago. «Trans. AIEE», 1961, p. 121.
9. **Круг К. А.** Основы электротехники. Т. 1 и 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1946.
10. **Нейман Л. Р., Калантаров П. Л.** Теоретические основы электротехники. Т. 1, 2 и 3. Изд. 5. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

Раздел первый

Машины постоянного тока

11. **Janet P.** Leçon d'électrotechnique générale T. 1. Généralités, courant continu. Paris, 1921; T. 2. Alternateurs, transformateurs, 1922.
12. **Maudit A.** Machines électriques, théorie, essais et construction. Dunot, Paris, 1922.
13. **Рихтер Р.** Электрические машины. Т. 1. Расчетные элементы общего значения, машины постоянного тока. Springer, Berlin, 1924. Пер. с нем. ОНТИ, 1935.
14. **Graetz L.** Starkstromtechnik. Barth, Leipzig, 1928.
15. **Шателен М. А., Миткевич В. Ф., Толвинский В. А.** Справочная книга для электротехников (СЭТ). Т. 5. Электрические машины (общая часть), машины постоянного тока, синхронные машины, трансформаторы. Кубуч, 1934.
16. **Дембо А. Р.** и др. Параметры современных тяговых двигателей электровозов и автономных локомотивов. Л., «Наука», 1964.
17. **Langsdorf A.** Principles of direct-current machines, ed. 6. McGraw-Hill, New York, 1959.
18. **Rzida E., Zeidner T.** Starkstromtechnik. Bd. 1, T. 1. Ernst, Berlin, 1951.
19. **Liwschitz-Garrik M., Whipple C.** Electric machinery. Vol. 1. Fundamentals and d. c. machines. Vol. 2. A. C. machines. Van Nostrand, New York, 1946.
20. **Вопросы** современного электроподвижного состава. [Сборник статей]. Изд-во АН СССР, 1961. Авт: Костенко М. П., Дембо А. Р. и др.
21. **Костенко М. П.** Электрические машины, а) Общая часть. М.—Л., Госэнергоиздат, 1944; б) Специальная часть. М.—Л., Госэнергоиздат, 1949.
22. **Пиотровский Л. М.** Электрические машины. М.—Л., Госэнергоиздат, 1949.
23. **Алексеев А. Е.** а) Тяговые электродвигатели. М.—Л., Госэнергоиздат, 1951. б) Конструкции электрических машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
24. **Иоффе А. Б.** Тяговые электрические машины. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
25. **Сергеев П. С.** Электрические машины. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
26. **Петров Г. Н.** Электрические машины. Ч. 2. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1947.
27. **Gheorgiu I.** Masini electrice. Vol. 1. Masina de current continuu. Transformatorul. Bucuresti, 1957.
28. **Janes H., Kaasik P., Puusepp E., Voldek A.** Electromasinad. Eesti Riiklin Kirjastus, Tallin, 1961.
29. **Hawkins C.** The Dynamo. Vol. 1. Its Theory, design and manufacture. Pitman. London, 1922. Vol. 2. Continuous current dynamos, 1923.
30. **Арнольд Е., Ла-Кур И. Л.** Машины постоянного тока. Springer, Berlin, 1924. а) т. 1. Теория и исследование. Пер с нем. Гостехиздат, 1931; б) т. 2. Конструкция, расчет и применение. Пер. с нем. ОНТИ, 1935.
31. **Шенфер К. И.** Динамомашины и двигатели постоянного тока. Изд. 5. ОНТИ, 1937.
32. **Завалишин Д. А.** Машины постоянного тока. ОНТИ, 1938.
33. **Толвинский В. А.** Электрические машины постоянного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956.
34. **Clayton A., Hancock N.** The performance and design of direct-current machines. Pitman, London, 1959.
35. **Schuisky W.** Berechnung elektrischer Maschinen. Springer, Wien, 1960.
36. **Guilbert Y.** Essais des machines electriques. Bailliere, Paris, 1922.
37. **Vidmar M.** Wirkungsweise elektrischer Maschinen. Springer, Berlin, 1928.
38. **Пиотровский Л. М. и др.** Испытания электрических машин постоянного тока. Кубуч, 1934.
39. **Ян Г.** Испытания электрических машин. Пер. с нем. Изд. 5. М.—Л., Гостехиздат, 1928.
40. **Дембо А. Р.** и др. Научно-технические вопросы проектирования высокоиспользованных и надежных прокатных двигателей постоянного тока. Л., «Наука», 1966.
41. **Нюрнберг В.** Испытание электрических машин. Springer, Berlin, 1940. Пер. с нем. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
42. **Жерве Г. К.** Промышленные испытания электрических машин. Изд. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
43. **Walker M.** a) Specification and design of dynamo-electric Machinery. Longmans—Green, London, 1920; б) The Diagnosing of troubles in electrical machines, 1921.
44. **Ларионов А. Н.** Особенности конструкции и расчета высоковольтных машин постоянного тока.— «Электротехнический журнал», 1931, № 9, с. 1.
45. **Greenwood L.** Design of direct current machines. MacDonald, London, 1949.
46. **Pistoye M.** Étude mécanique et usinage des machines électriques. Baillere, Paris, 1924.
47. **Bill J.** Tmin-drives in rolling mills. «B. B. Mitt.», 1961, No. 11/12, p. 73.
48. **Лифшиц М.** Электрические машины. а) т. 1. Общие основы. Teubner. Leipzig, 1931. Пер. с нем. ОНТИ, 1933; б) т. 2. (с Глекнером Г.) Конструкция и изоляция. Teubner, Leipzig, 1931. Пер. с нем. ОНТИ, 1935, в) т. 3. Расчет и определение размеров. Teubner, Leipzig, 1934. Пер. с нем. ОНТИ, 1936.
49. **Пунга Ф.** Проектирование электромашин. Darmstadt, 1934. Пер. с нем. Кубуч, 1934.
50. **Касьянов В. Т.** Машины постоянного тока предельной и большой мощности и особенности их расчета.—«Вестник электропромышленности», 1939, № 5, с. 27.

51. **Сергеев П. С.** и др. Проектирование электрических машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956.

52. **Baldwin M.** a) Twenty-five years progress in the design of traction motors. «Trans. AIEE», 1949, pt. 1, p. 132; б) A world wide standard traction motor for diesel-electric locomotives. «Trans. AIEE», 1954, pt 2, p. 144.

53. **Андреев В. П., Сабинин Ю. А.** Основы электропривода. Изд. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

54. **Бертинов А. И., Ризник Г. А.** Проектирование авиационных электрических машин постоянного тока. Оборонгиз, 1958.

55. **Постников И. М.** Проектирование электрических машин. Изд. 2. Гостехиздат Укр. ССР, 1961.

56. **Гурин Я. С., Курочкин М. Н.** Проектирование машин постоянного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.

57. **Carter F.** Air-gar induction. «JIEE», 1900, p. 925.

58. **Lehman T.** a) Méthode graphique pour déterminer le trajet des lignes de force dans l'air. «La Lumière électrique», 1909, p. 103; б) Détermination graphique des champs magnétiques laplaciens et tourbillonnaires à lignes de flux planes. «RGE», 1923, p. 397; в) Das Ankerluftfeld in der neutralen Zone. «A. f. E.», 1924, S. 286, 398; г) Spectres ferromagnêtiques (tracé des lignes d'induction dans les milieux ferromagnêtiques). «RGE», 1926, p. 43; д) La détermination des champs magnêtiques partiels et résultants les dynamos saturées. «RGE», 1927, p. 1105; «RGE», 1929, p. 447, 521; e) Les pêrmêances transversales et axiales dans les machines a poles saillants. «RGE», 1931, p. 417.

59. **Richter R.** a) Das magnetische Feld in den Lufträumen elektrischer Maschinen. «A. f. E.», 1922, н. 11, S. 85, б) Das Ankerfeld in der Pollücke und die induzierte EMK. «A. f. E.», H. 13, S. 67.

60. **Calvert I., Harrison H.** Graphical flux mapping. «El. Journal», 1928, p. 147, 178, 246, 399, 510.

61. **Punga R.** Zweifach-Parallelwicklung mit Ausgleichverbindungen. «E. u. M.», 1911, S. 7.

62. **Тищенко А. Н.** Динамическая устойчивость прокатных двигателей постоянного тока.—«Электричество», 1963, № 9, с. 1.

63. **Рихтер. Р.** Обмотки якорей машин переменного и постоянного тока. Springer, Berlin, 1920. Пер.с нем. ОНТИ, 1933.

64. **Sequenz H.** a) Die Symmetriebedingungen für Gleichstromankerwicklungen. «ETZ», 1928, S. 1217; б) Reihenwicklungen mit toten Spulen oder halbbinden Stegen. «E. u. M.», 1929, S. 845; в) Die Froschbeinwicklung. «ETZ», 1931, S. 905.

65. **Левитус А. И.** а) Лягушечья обмотка электрических машин.— «Электричество», 1932, № 17—18, с. 86, б) Лягушечья обмотка и ее различные исполнения. —«Вестник электропромышленности», 1940, с. 34. «Вестник ХЭМЗа», 1940, с. 32.

66. **Касьянов В. Т.** Уравнительные обмотки генераторов постоянного тока и их расчет.—«Вестник электропромышленности», 1937, № 6, с. 9.

67. **Марков В. А.** Двухходовые петлевые обмотки машин постоянного тока.—«Электричество», 1940, № 7, с. 18.

68. **Вольпин М. А.** и др. Обмотки электрических машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940.

69. **Виноградов Н. В.** Обмотки электрических машин. Госэнергоиздат, М.—Л., 1946.

70. **Касьянов В. Т.** О свойствах, применении и проектировании простейших и сложных лягушечьих обмоток.—«Электросила», 1947, № 4, с. 7.

71. **Гланц Ф. С.** Изоляция якорных обмоток машин постоянного тока.—«Электросила», 1947, № 4.

72. **Калитвянский В. И.** Изоляция электрических машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1949.

73. **Sequenz H.** Die Wicklung elektrischer Maschinen. Bd.2. Wendewicklungen. Springer, Wien, 1952.

74. **Зимин В. И.** Обмотки электрических машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954.

75. **Ипатов П. М.** а) Асимметрия трехходовых петлевых обмоток якорей машин постоянного тока.—«Вестник электропромышленности», 1959, № 12, с. 47; б) Асимметрия петлевых двухходовых однократнозамкнутых обмоток якорей машин постоянного тока.—«Вестник электропромышленности», 1960, № 3, с. 43.

76. **Фетисов В. В.** а) О напряжении между смежными коллекторными пластинами в машинах постоянного тока с двухходовыми петлевыми обмотками.—«Изв. вузов. Электромеханика», 1960, № 6, с. 27; б) О напряжении между смежными коллекторными пластинами в машинах постоянного тока с трехходовыми петлевыми обмотками.—«Изв. вузов. Электромеханика», 1960, № 9, с. 69.

77. **Maudit A.** Recherches êxpêrimentales et théoritiques sur la commutation dans les dinamos à courant continu. Dunot et Pinat, Paris, 1972.

78. **Lamme B.** Theory of commutation and its application to commutation pole machines. «El. Eng. Papers», Westinghouse, Pittsburgh, 1919, p. 201.

79. **Шенфер К. И.** а) Commutation in direct-current machines. «JAIEE», 1921, № 11; б) Die Abhängigkeit der Reaktanzspannung von Burstenbreite bei Gleichstrommaschinen. «ETZ», 1923, № 16, S. 358; в) Коммутация в машинах постоянного тока.—«Труды Гос. экспериментального электротехнического института», вып. 1, 1924.

80. **Dreyfus L.** a) Die Theorie der zusätzlichen Kommutierungsverluste von Gleichstrommaschinen. «A. f. E.», 1915, S. 830. «E. u. M.», 1914, S. 281; б) Über die Verminderung der Stromwendespannung grosser Kommutatormaschinen durch Kurzschlusswicklungen neuer Bauart. «A. f. E.», 1932, S. 330; в) Die Stromwendung grosser Gleichstrommaschinen. Springer. Berlin, 1929: г) Die Stromwendung grosser Gleichstrommaschinen. Theorie der Kommutierungsstörungen. «Acta Polytechnica», Stockholm, 1954.

81. **Stix R.** a) Zusätzliche Kommutierungsverluste in Gleichstromwicklungen bei endlicher Stromwenddauer. «A. f. E», 1930, № 6, S. 593; б) Verminderung der Stromwendespannung bei Kollektormaschinen durch die Wirbelströme in massiven leitern. «E. u. M.», 1939, S. 171.

82. **Erdelei E.** Calculation of stray load losses in d. c. machinery «Trans. AnkerAIEE», 1960, г. 129.

83. **Хмельницкий С. В.** Улучшение коммутации генераторов блюминга путем применения дивертеров.—«Электричество», № 3, с. 7.

84. **Касьянов В. Т.** Регулировка дополнительных полюсов машин постоянного тока.—«Электричество», 1934, № 20, с. 1; 1935, № 1, с. 45.

85. **Шенфер К. И., Юдицкий С. Б.** Коммутация в машинах постоянного тока при толчкообразной нагрузке.—«Электричество», 1935, № 11, с. 5.

86. **Юдицкий С. Б.** Коммутация машин постоянного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1941.

87. **Костенко М. П.** а) Расчет влияния насыщения добавочного полюса на характер кривой подпитки.—«Электропривод (ХЭМЗ)», 1936, № 3, с. 12; б) Экспериментально-практический анализ коммутации машин постоянного тока.—«За единые серии». Вып. 2, ОНТИ, 1936, с. 335; в) Основные вопросы коммутации машин постоянного тока.—«Труды Ленинградского индустриального института», 1937, № 2, с. 3.

88. **Иоффе А. Б.** О коммутации тяговых электродвигателей при неустановившихся режимах.—«Электричество», 1947, № 2, с. 57.

89. **Карасев М. Ф.** а) Экспериментальные исследования процесса коммутации электрических машин постоянного тока на специальной модели.—«Электричество», 1948, № 7, с. 37; б) Коммутация коллекторных машин постоянного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1955 и 1961.

90. **Ермолин Н. П.** Коммутация машин постоянного тока при кратковременных перегрузках.—«Электричество», 1947, № 6, с. 47.

91. **Алябьев М. И.** Опытное определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока.—«Электричество», 1950, № 5, с. 38.

92. **Хисамутдинов Р. Х.** Коммутация машин постоянного тока. М.—Л., Металлургиздат, 1953.

93. **Вегнер О. Г.** а) О некоторых вопросах коммутации при помощи коллектора и щеток.—«Труды Ленинградского индустриального института», 1938, № 7, с. 25; б) Теория и практика коммутации машин постоянного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.

94. **Tustin A., Ward H.** The E. M. F's induced in the armature coils of machines during commutatinn. «Proc. IEE», pt. C, 1962. No, 16, p. 456.
95. **Ward H.** The E. M. F., induced in the end-turns of armature coils during commutation. «Proc. IEE», pt. C, 1962, No. 16, 477.
96. **Tarkanyi M., Ward H., Tustin A.** Electronic computers applied to commutation analysis. «Proc. IEE», pt. C, 1962, No. 16, p. 488.
97. **Гейнрих В.** Проблема скользящего контакта в электромашиностроении. Oldenbourg, 1930. Пер. с нем. ОНТИ, 1933.
98. **Baker R.** Electrical sliding contacts. «El. Journal», 1934, No. 9, p. 359.
99. **Нейкирхен И.** Угольные щетки и причины непостоянства коммутации машин постоянного тока. Пер. с нем. ОНТИ, 1937.
100. **Brunt V., Savage R.** Carbon brush Contact films. «Gen. El. Rev.», 1944, No. 7, p. 16.
101. **Baldwin M.** Oscillographing commutation. «Trans. AIEE», 1949, pt. 1, p. 100.
102. **Lynn C., Elsey H.** Effects of commutator surface film condition on commutation. «Trans. AIEE», 1949, pt. 1, p. 106.
103. **Белкин М. Д., Штыхнов Г. С.** Щетки для электрических машин, их производство и применение М.—Л., Госэнергоиздат, 1952.
104. **Shobert E.** Electrical resistance of carbon Brushes on copper rings. «Trans. AIEE», 1954, pt. 3-A, p. 788.
105. **Holm E.** Contribution of the theory of the brush-collector contact. «Trans. AIEE», 1959, pt. 3-A, p. 431.
106. **Linville T., Rosenberry Y.** Commutation of large d. c. machines. «Trans. AIEE», 1952, pt. 3., p. 326.
107. **Holm R.** Contribution to the theory of commutation on d. c. machines. «Trans. AIEE», 1958, pt. 3, p. 1124.
108. **Schroeder T., Ayedelott T.** The «Black band» method of commutation observation. «Trans. AIEE», 1941, p. 446.
109. **Lundy R.** Measuring commutation with an indicating instrument. «Trans. AIEE», 1949, pt. 3, p. 1380.
110. **Roumanis S.** The null point method of commutation adjustment. «Trans. AIEE», 1956, pt. 2, p. 147.
111. **Неболюбов Ю. Е.** Фотоэлектрический метод исследования и настройки коммутации.—«Электричество», 1956, № 11, с. 19.
112. **Лавринович Л. Л.** Настройка коммутации при помощи измерительных инструментов.—«Вестник электропромышленности», 1959, № 4, с. 23.
113. **Häkaussen A.** A rectifier-fed continuous hot-strip rolling mill. «ASEA Journal», 1963, No. 4, p. 49.
114. **Москвитин А. И.** а) Скорость распространения кругового огня по коллектору.—«Электричество», 1934, № 14, с. 28; б) О способах борьбы с круговым огнем на коллекторе.—«Электричество», 1935, №,18, с. 36.
115. **Брон О. Б., Александров В. С.** Круговой огонь на коллекторе машин постоянного тока.—«Электричество», 1935, № 3, с. 3.
116. **Montgomery T., Sellers J.** D. c. machines flashover and bus short-circuit protection. «Trans AIEE», 1944, p. 1168.
117. **Housley E., Jensen O.** Protection of large d. c. machines by means of high-speed circuit breakers. «Trans. AIEE», 1941, p. 637.
118. **Linville T.** Current aud torque of d. c. machines on short circuit. «Trans. AIEE», 1946, p. 956.
119. **Coho O.** Flashover torque of a d. c. generator. «Trans. AIEE», 1953, pt. 2, p. 43.
120. **Atwell C.** Fundamentals of flashing of diesel electric motors and generators. «Trans. AIEE», 1954, pt. 2, p. 70.
121. **Noeggerat E.** Acyclic (homopolar) dynamos. «Trans. AIEE», 1905, p. 1.
122. **Ugrimoff B.** Die unipolare Gleichstrommaschine. Springer, Ferlin, 1910.
123. **Lamme B.** Development of a successful direct-current 2000 kw unipolar generator. «El. Eng. Papers», Westinghouse, Pittsburgh, 1919, p. 145.
124. **Костин Б. В.** а) Новый униполярный генератор.—«Электричество», 1939, № 2, с. 33; б) Новое об униполярной индукции .— «Электричество», 1939, № 10—11, с. 108.

125. Униполярные машины и применение постоянных магнитов в электромашиностроении. [Сборник статей]. Изд-во АН СССР, 1940.
126. **Charlet H.** Neue Maschine mit konstanter Spannung für Zugbeleuchtung und Autoanwurf. «ETZ», 1923, Nr. 20, S. 453.
127. **Русинов А. В.** Машины поперечного поля.—«Электричество», 1926, № 5, с. 233.
128. **Толвинский В. А., Струнников Ф. С.** Экспериментальное исследование машины Розенберга и некоторые вопросы ее теории.—«Электричество», 1926, № 10, с. 429.
129. **Rosenberg E.** Die Gleichstrom-Querfeldmaschine. Springer, Beslin, 1928.
130. **Трапезников В. А.** Расчет машины Розенберга и построение ее характеристик.—«Вестник экспериментальной и теоретической электротехники», 1929, № 1, с. 1, № 5, с. 193.
131. **Касьянов В. Т.** Сварочный генератор с самовозбуждением.— «Электричество». 1930, № 14, с. 591.
132. **Bergmann S.** A new system for d. c. arc welding. «Trans. AIEE», 1931, p. 678.
133. **Кислюк Ф. И.** Динамические свойства сварочных машин.— «Электричество», 1930, № 14, с. 591.
134. **Никитин В. П.** К теории генераторов с расщепленными полюсами.— «E. u. M.», 1933, Nr. 44, S. 577.
135. **Петрунькин Ю. П.** Электрические генераторы и трансформаторы для дуговой сварки. ОНТИ, 1934.
136. **Alexanderson E., Edwards M., Bowman K.** The amplidyne generator—a dynamoelectric amplifier for power control. «Cen. El. Rev.», 1940, No. 3, p. 104.
137. **Fisher A.** Design characteristics of amplidyne generators. «Gen. El. Rev», 1940, No. 3, p. 107.
138. **Graybeal T.** Steady-state theory of the amplidyne generators. «Trans. AIEE», 1942, p. 750.
139. **Bower J.** Fundamentals of the amplidyne generator. «Trans. AIEE», 1945, p. 873.
140. **Эпштейн Я. С.** Особенности проектирования амплидинов.—«Электричество», 1945, № 12, с. 40.
141. **Моносзон Н. А.** Некоторые особенности теории и проектирования электромашинного усилителя.—«Электричество», 1948, № 9, с. 13.
142. **Якименко Н. М.** Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы.—«Электричество»», 1948, № 9, с. 20.
143. **Рудаков В. В.** Электромашинные усилители в системах автоматики. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
144. **Harvey L., Rubenstein A., Temoshok M., Morgen W.** Amplidyne main exciter excitation system. «Trans. AIEE»», 1961, p. 17.
145. **Pestarini J.** Les métadynes entre elles et leur dérivérs. «RGE», 1930, vol. 27, p. 355, 395; vol. 28, p. 813, 851, 900.
146. **Шенфер К. И.** а) Безреостатное управление тяговыми электродвигателями постоянного тока.—«Электричество»», № 3, с. 55; б) Новая схема соединения метадина с тяговыми двигателями последовательного возбуждения.— «Электричество», 1941, № 3, с. 35.
147. **Liwschitz. M.** The multistage rototrol. «Trans. AIEE». 1947, p. 564.
148. **Riaz M.** Transient analysis of the metadyne generator. «Trans. AIEE», 1953, pt. 3, p. 52.
149. **Sutton A.** A new hot reversing mill. «AEI Engineering, 1961, vol., 1, No. 4, p. 159.
150. **Satter P.** Bemessung und Konstruktion grosser Gleichstrommaschinen fur den Walzwerkbetrieb. «B. B. Nachr.», 1961, Nr. 3, S. 156.
151. **Кавамура Б.** Конструкция современных машин постоянного тока большой мощности.— «Фузди Дзихо», 1962, т. 35, № 4, с. 326.
152. **Nouvion F.** Évolution de locomotive BB 16500. «Révue gen., des ch. d. f.», 1970, n°2, p. 119. Four-system locomotives for German railway. «Engineer», 1967, 3/11, p. 211.
153. **Simons S.** Reversing hot mills and their auxilaries. «Supply to AEI Engineering», 1967, No. 1, p. 47.

154. **Pepworth B.** Direct-current motors for the metal industries. «Supply to AEI Engineering», 1967, No. 1, p. 56.
155. **Nouvion F.** L'utilisation des thyristors sur les engins de traction. «Révue gen. des chem. de fer», 1966, n°12, p. 733.
156. **Tessier M.** a) Vers une nouvelle êlloc CC 72000. «Rêv. gên. des chem. de fer»», 1967, n°. 1, p. 24; б) Electrification progress in India. «Railway Gaz.», 1966, No. 23, p. 950.
157. **Machefert-Tassin L.** Les transports à très grande vitesse. «Gênie Civil», 1966, n°23, p. 478; 1967, n°1, p. 32; 1967, n°3, p. 225.
158. **Garreau M.** Cours de traction êlectrique. Paris, 1957.
159. **Machefert-Tassin L.** Diesél-élloc á transmission en courant polyphasé redressé. «Révue Jeumont—Schneider», 1967, n°3, p. 59.
160. **Cossiè A.** Élloc bi-courant BB 25100, BB 25200, BB 25500. «Gênie Civil», 1967, n°19, p. 381.
161. **Neruez M.** Die elektrische Ausrüstung der Vier-System-Ellok, Typ 160 (SNCB). «El. Bahnen». 1967, Nr. 10, S. 219.
162. **Nouvion F.** Élloc bi-courant CC 21 000 et ses derivées à courant continu et courant monophasé. «Rév. gên. des chem. de fer», 1967, n°10, p. 517.
163. **SNCF** acquires heavy dieselelloc. «Engineer», 1968, 10/X, p. 744.
164. **Garreau M., Nouvion F.** 15 ans de traction en courant monophasê 50 Hz. «Rêv. gên. des chem. de fer», 1968, n°. 3, p. 125.
165. **Bill H., Heil W., Stark P.** Probleme beim Bau moderner Gleichstrommaschinen für industrielle Anwendung. «B. B. Mitt»., 1968, Nr. 10/11, S. 99.
166. **Meister J., Reinold R.** Elektrische Auslegung der neuen Gleichstrommaschinenreihe. «B. B. Mitt.», 1968, Nr. 10/11, S. 611.
167. **Maier F.** Berechnung der Kommutierungsinduktivitäten Ankerwicklungen. «B. B. Mitt.», 1968, Nr. 10/11, S. 569.

Раздел второй

Трансформаторы

168. **Алексеенко Г. В.** Испытания высоковольтных мощных трансформаторов. ОНТИ, 1936.
169. **Трамбицкий А. В.** Расчет трансформаторов. ОНТИ, 1938.
170. **Blume L., Camilli G., Boyajan A., Montsinger V.** Transformer. «Engineering», New York, 1938.
171. **Blume L., Camilli G., Farnham S., Peterson H.** Transformer magnetising inrush currents and influence on system operation. «Trans. AIEE», 1944, p. 366.
172. **Шницер Л. М.** Трансформаторы, основы теории и нагрузочная способность. Госэнергоиздат, 1950.
173. **Сапожников А. В.** Конструирование трансформаторов. Госэнергоиздат, 1953.
174. **Cristoffel M., Itschner M.** 380-kV Transformatoren. «BBC Mitt», 1954, Nr. 9, S. 330.
175. **Кронгауз Ю. С., Рабинович С. И.** Трансформаторное оборудование для Волжской ГЭС им. В. И. Ленина и линия электропередачи 400 *кв*. В кн.: Дальняя электропередача Волжская ГЭС им. В. И. Ленина — Москва. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
176. **Bean R.** Transformers for the electric power industry. McGraw-Hill, New York, 1959.
177. **Пиотровский Л. М., Васютинский С. Б., Несговорова Е. Д.** Испытания электрических машин. Ч. 2. Трансформаторы и асинхронные машины. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
178. **Попович Н. В.** Перспективы разработки и освоения автотрансформаторов большой мощности.—«Вестник электропромышленности», 1962, № 7, с. 1.
179. **Бондар В. В.** Силовые трансформаторы на 220 *кв* для Братской ГЭС.—«Вестник электропромышленности», 1962, № 7. с. 6.
180. **Rogowski W.** a) Über das Streufeld und das Streuinduktionskoeffizienten Transformators mit Schreibenwicklung und geteilten Endspulen. «Mitteilungen über Forschungsarbeiten, VDI», 1909, Nr. 71, S. 3; б) Über die Streuung in Transformatoren. «ETZ», 1910, S. 1033.
181. **Hemmeter H.** a) Kritisches zur Theorie der Streuung. «A. f. E.», 1925, Bd. 15, S. 193; б) Zur Theorie des Transformators. «A. f. E.», 1926, Bd. 16, S. 124.
182. **Stevenson A.** Fundamental theory of flux plotting. «Gen. El. Rev.», 1926, p. 797.
183. **Петров Г. Н.** а) Обращенный метод расчета рассеяния обмоток трансформаторов.—«Вестник экспериментальной и теоретической электротехники», 1935, № 5—6; «E. u. M.», 1933, S. 345; б) Расчет рассеяния обмоток при произвольном их расположении на сердечнике.—«Бюлл. ВЭИ», 1934, № 5, с. 1; в) К расчету рассеяния трансформаторов.—«Электричество». 1935, № 15, с. 3.
184. **Марквардт Е. Г.** Электромагнитные расчеты трансформаторов. ОНТИ, 1938.
185. **Гельперин Б. Б.** О расчете магнитного поля рассеяния катушки со стальным сердечником и воздушным зазором—«Вестник электропромышленности», 1961, № 3, с. 21.
186. **Fortescue C.** Method of symmetrical coordinates, applied to the solution of polyphase networks. «Proc. AIEE», 1918, p. 629.
187. **Вагнер К., Эванс Р.** Метод симметричных составляющих. McGraw-Hill, New York, 1933. Пер. с англ. ОНТИ, 1936.
188. **Толвинский В. А.** Диаграмма напряжений трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке.—«Вестник экспериментальной и теоретической электротехники», 1929, № 5, с. 196.
189. **Шницер Л. М.** Работа автотрансформатора трехфазного тока при несимметричной нагрузке.—«Изв. Государственного электротехнического треста»», 1929, № 11, с. 218.
190. **Гохберг С. М.** Влияние несимметрии нагрузки на вторичные напряжения трехфазных трансформаторов. Кубуч, 1933.
191. **Сиунов Н. С.** Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении двойным зигзагом.—«Электричество». 1935, № 15, с. 43.
192. **Garen A.** Zero-phase-sequence characteristics of transformers. «Gen. El. Rev.»», 1940, p. 131, 174.
193. **Эбин Л. Э.** Несимметричные схемы работы трансформаторов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1944.
194. **Puchstein A., Loyd T.** Alternating-current machines. Willey, New York, 1936.
195. **Меркин Г. Б.** Несимметричные установившиеся режимы трансформаторов.—«Изв. вузов. Электромеханика», 1959, № 4, с. 59.
196. **Lawrence R.** Principles of alternating-current machinery. McGraw—Hill, New York, 1940.
197. **Толвинский В. А.** Параллельное включение трехфазных трансформаторов.—«Изв. СПб политехнического института», т. 14, 1913, с. 1.
198. **Касьянов В. Т.** О распределении нагрузки между параллельно работающими трансформаторами.—«Электричество», 1925, с. 656.
199. **Меркин Г. Б.** О параллельной работе трансформаторов.—«Электричество». 1930, № 12, с. 1011.
200. **Vidmar M.** Parallelbetrieb von Transformatoren. «E. u. M.», 1927, Nr. 10, S. 457.
201. **Марквардт Е. Г.** Параллельная работа трансформаторов.— «Вестник электротехники», 1930, № 5, с. 27.
202. **Richter R.** Die Belastung von Transformatoren im Parallelbetrieb. «E. u. M.», 1931, S. 477.
203. **Алексенко Г. В.** Трансформаторы, параллельная работа трансформаторов , автотрансформаторов М.—Л., Госэнергоиздат, 1967.
204. **Moody Б., Boyajan A.** Mechanical forces in transformers. «Gen. El. Rev.», 1927, p. 420.
205. **Петров Г. Н.** и др. Электрические машины. Ч 1. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940 и 1956.
206. **Либкинд М. С.** Механические силы в обмотках трансформаторов.—«Электричество», 1945, № 9, с. 43.

207. **Palueff K.** Effect of transient voltage on transformer design. «Trans. AIEE», 1929, p. 681, 998; 1930, p. 1179, 1931, p. 803; 1932, p. 601.
208. **Hodnette J.** Effect of surges on transformer windings. «Trans. AIEE», 1930, p. 68.
209. **McMorris W., Hagenguth J.** The Non-Resonating Transformer. «Gen. El. Rev.», 1930, p. 558.
210. **Bewley L.** a) Transient oscillations in distributed circuit, with special reference to transformers windings. «Trans. AIEE», 1931, p. 1215; б) Transformer oscillations caused by damped oscillatory waves. «Gen. El. Rev.». 1931, p. 512; в) Transient oscillations of mutually coupled windings. «Trans. AIEE», 1932, p. 299.
211. **Montsinger V., Dann W.** The coordination of transformer insulation with line insulation. «Trans. AIEE», 1932, p. 923.
212. **Бьюлей Л.** Волновые процессы в линиях передачи и трансформаторах. Ed. General Electric C°., Pittsfield, 1932. Пер. с англ. ОНТИ, 1938.
213. **Липковский М. В.** Система нерезонирующих трансформаторов.— «Электричество», 1941, № 3, с. 25.
214. **Карасев В. А.** а) Теория перенапряжений в обмотках в свете критического анализа. — В кн.: Вопросы трансформаторостроения. ОНТИ, 1938, с. 5; б) Теория электромагнитных процессов в обмотках. М.—Л., Госэнергоиздат, 1946.
215. **Christoffel M.** Autotransformatoren mit direkter Regelung für Höchstspannungen. «BBC Mitt.», 1955, Nr. 6, S. 187.
216. **Edlinger A.** a) Autotransformatoren 400/220 кV. «BBC Mitt.», 1960, Nr. 5—6, S. 292; б) Transformatoren und Kompensationsdrosselspulen für 750 кV. «BBC Mitt.», 1964, Nr. 1—2, S. 56.
217. **Boyajan A.** Theory of three circuit transformers. «Trans. AIEE», 1924, p. 508.
218. **Genkin V.** Sur la thèorie d'un transformateur à trois enroulements. «RGÉ», vol. 26, p. 653, 987, vol. 30, p. 904.
219. **Benischke G.** Der Transformator mit zwei sekundären Wicklungen. «E. u. M.»», 1930, S. 117, 649.
220. **Bunet P.** Calcul et détermination des chutes des tensions des transformateurs à trois enroulements. «Bull. de la Société Française des Électriciens», 1931, n°8, p. 770.
221. **Утевский А. М.** Токораспределение в обмотках трансформаторов для ртутных выпрямителей при аварийных режимах.—«Электричество», 1937, № 20, с. 16.
222. **Schilling W.** Die Gleichstromrichterschaltungen, ihre Berechnung und Arbeitsweise. Oldenbourg, 1938.
223. **Каганов И. Л.** Электронные и ионные преобразователи тока. Изд. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940.
224. **Костенко М. П., Нейман Л. Р., Блавдзевич Г. Н.** Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. Изд-во АН СССР, 1946.
225. **Kostenko M., Neuman L.** Les processus électromagnétiques dans les redresseurs puissants et leur relations avec les paramètres du réseau d'alimentations. Conference Internat. des Grands Réseaux Électriques à Haute Tension (CIGRE), Paris, 12-e Session, 1948. «Электричество», 1947, № 1, с. 7.
226. **Gänger B.** Prüfung von Höchstspannungs-Transformatoren mit Stosspannungen von 1 Millionen Volt. «BBC Mitt.», 1956, Nr. 12, S. 525.
227. **Никитин В. П.** а) Электрические машины и трансформаторы для дуговой сварки. ОНТИ, 1937; б) Основы теории трансформаторов и генераторов для дуговой сварки. Изд-во АН СССР, 1956.
228. **Abetti P.** Transformer models for the determination of transient. «El. Eng.» 1953, pt. 3, p. 468, 1954, pt. 3, p. 543, (with Blek).
229. **Рюденберг Р.** а) Явления неустановившегося режима в электротехнических установках. Springer, Berlin, 1923. Пер. с нем. ГНТИ, 1931; б) Переходные процессы в электроэнергетических системах. New York, Toronto—London, 1950, Пер. с англ. Изд-во иностр. лит., 1955.
230. **Бирманс И.** Сверхтоки в установках высокого напряжения. Springer, Berlin, 1926. Пер. с нем. ОНТИ, 1932.

231. **Pen-Tung-Sah A.** Fundamental of alternating-current Machines. McGraw-Hill, New York, 1946.
232. **Tarboux J.** Alternating-current machinery. International Textbook, Scranton, 1947.
233. **Fitzgerald A., Kingsley C.** Electric machinery. The dynamics and statics of electromechanical energy conversion, ed. 2, McGraw-Hill, New York, 1961.
234. **Say M.** The performance and design of alternating current machines, transformers, three-phase induction motors and synchronous machines, ed. 3, Pitman London, 1958—1961.
235. **Arnold E., La-Cour J.** Die Transformatoren. Ihre Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Aufl. 2. Springer, Berlin, 1910, 1923.
236. **Bunet P.** Les transformateurs. Baillière, Paris, 1923.
237. **Видмар М.** а) Трансформаторы. Springer, Berlin, 1925. Пер. с нем. ГНТИ, 1931; б) Трансформаторы в эксплуатации. Springer, Berlin, 1925. Пер. с нем. ГНТИ, 1931.
238. **Stigant A., Lacey M.** The transformer book. Phillips, ed. 2, London, 1925.
239. **Чечет Ю. С.** Расчет электрических машин и трансформаторов. Ч. 3, Трансформаторы. Моск. акад. изд., 1927.
240. **Monsinger V.** Loading transformers by temperature. «Trans AIEE», 1930, p. 776.
241. **Dann W.** Operating transformers by temperature. «Trans. AIEE», 1930, p. 773.
242. **Monsinger V.** Temperature limits for time overloads for oil-insulated neutral grounding reactors and transformers. «Trans. AIEE», 1938, p. 39.
243. **Clark E.** Factors affecting the mecanical strength of cellulose insulation. «Trans. AIEE», 1941, p. 778.
244. **Clark E.** Affecting the mecanical detoriating of cellulose insulating. «Trans. AIEE», 1942, p. 742.
245. **Monsinger V., Clem J.** Temperature limits for short Time overloads for oil insulating neutral groanding reactors and transformers. «Trans. AIEE», 1946, p. 966.
246. **Dankin T.** Electrical insulating, detoriating treated as a chemical race phenomenon. «Trans. AIEE», 1948, p. 113.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автотрансформатор 361, 491
Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора 364
Активное сопротивление вторичной обмотки приведенное 367

Бак трансформатора масляного 354
Бандажи проволочные 100
Безреостатный пуск двигателей постоянного тока 267

Векторные диаграммы трансформатора 379, 380, 390, 408, 420—424, 501
Внезапное короткое замыкание генератора постоянного тока 252
Внезапное короткое замыкание трансформатора 465

Возбуждение машины постоянного тока 234, 262
Волна перенапряжения в трансформаторе 470
Вращающий момент двигателя постоянного тока 265
Выпрямление переменного тока коллектором 48
Высшие гармонические в расчетной кривой индукции 83
Высшие гармонические в расчетной кривой тока холостого хода трансформатора 378, 401, 404
Высшие гармонические в расчетной кривой э. д. с. 389, 402
Высшие гармонические в расчетной кривой потока 401, 402

Газовое реле 376
Гармоническая первая (основная) 83, 376, 389, 401
Гармонические высшие 376, 390, 394, 401, 405
Генератор постоянного тока независимого возбуждения 234, 239
Генератор постоянного тока параллельного возбуждения 234, 248
Генератор постоянного тока последовательного возбуждения 234, 252
Генератор постоянного тока смешанного возбуждения с согласным включением обмоток возбуждения 234, 253
Генератор постоянного тока смешанного возбуждения со встречным включением обмоток возбуждения 255
Генератор постоянного тока с самовозбуждением 248
Генератор постоянного тока сварочный 319
Глушитель пазовый 184

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения 262, 272, 280, 288
Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения 262, 275, 281, 290
Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения 262, 277
Двигатель постоянного тока тяговый 291
Деление зубцовое 89
— коллекторное 80
— полюсное 49
Диаграмма э. д. с. секций 110, 113, 115, 117, 119, 125, 128, 147
Диаграмма векторная холостого хода трансформатора 378
Диаграмма токов холостого хода трехстержневого трансформатора 387
Диаграмма векторная э. д. с. при соединении трехфазной обмотки звездой 391
Диаграмма векторная токов при соединении трехфазной обмотки треугольником 393
Диаграмма векторная короткого замыкания трансформатора 408
Диаграмма векторная трансформатора при индуктивной нагрузке 421, 422
Диаграмма векторная трансформатора при емкостной нагрузке 421, 422
Диаграмма векторная трансформатора упрощенная 424
Диаграмма однофазного короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток звезда—звезда 446
Диаграмма двухфазного короткого замыкания трансформатора 441
Диаграмма векторная трехобмоточного трансформатора 502
Дуга коммутационная 192

Емкость обмотки трансформатора на землю 470
Емкость входная трансформатора 471

Законы электромагнитной индукции 30
Законы магнитной цепи 27
Звезда э. д. с. 85, 91, 108, 111, 113, 115, 117, 119, 121, 123, 125, 129, 131, 133, 135, 147

Индуктивное сопротивление рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора 366
Индуктивное сопротивление нулевого следования 451
Индуктивное сопротивление холостого хода 385, 386
Индуктивность коммутируемой секции 170, 183
Индуктивность средняя результирующая 177
Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора 364
Индуктивность полная обмоток трансформатора 365
Индукция магнитная в сердечнике добавочных полюсов 196
Индукция магнитная в сердечнике трансформатора 373
Искрение щеток 187, 188, 190

Каналы вентиляционные 54, 55, 67
— между слоями обмотки трансформатора 352
Каналы между катушками или обмотками трансформатора 352
Каскад трансформаторов 515
Коллектор 50, 55
Коллекторное деление 80
Коммутация сопротивлением 163, 167
Коммутация криволинейная 167, 170
— средства улучшения 193
— экспериментальная настройка 208
Коммутационный процесс 162
Коммутируемый контур 163
— ток 165
Компенсационная обмотка 201
Короткое замыкание машины постоянного тока 246, 250
Короткое замыкание трансформатора 407
Короткое замыкание трансформатора внезапное 465
Короткое замыкание трансформатора двухфазное 440
Короткое замыкание трансформатора однофазное 442, 448
Коэффициент зазора 68
— заполнения стали 72
— зубцовый 69
— искажения синусоидальной кривой 337
Коэффициент нагрузки трансформатора 429
— полезного действия 229
Коэффициент полюсной дуги 66
— рассеяния 63, 197
— трансформации 366
— трения в подшипниках 220, 221
Коэффициент трения щеток о коллектор 222
Кривые к. п. д. машин постоянного тока 229
— н. с. 151, 203
— намагничивания машины 75, 465
Кривые потоков, токов и э. д. с. трехфазного трансформатора при холостом ходе 401, 402
Кривые результирующего поля машины постоянного тока 198, 202
Кривые тока и мощности холостого хода трансформатора в зависимости от напряжения 401, 402

Магнитная проводимость удельная 183, 184
Магнитная проводимость паза, зубца, лобовых частей 181
Магнитная проводимость эквивалентная 183
Магнитная проницаемость 62
— цепь машины постоянного тока 61
Масло трансформаторное 44, 357
Метод симметричных составляющих 431
Механические усилия в трансформаторе при внезапном коротком замыкании 468
Многоугольник э. д. с. 85, 91, 108, 111, 113, 115, 117, 119, 121, 123, 125, 127, 129, 131, 133, 135, 147
Момент генератора постоянного тока электромагнитный тормозящий 236
Момент двигателя первичного 234
— — постоянного тока электромагнитный вращающий 263, 264
Момент полезный тормозящий 266
Моменты на валу двигателя — динамический, статический, холостого хода 264
Мощность короткого замыкания трансформатора 412
Мощность подводимая 229, 235, 263
Мощность полезно отдаваемая 229, 263, 428
Мощность электромагнитная 236, 263, 493
Мощность холостого хода трансформатора 378, 380, 503

Намагничивающая сила 62, 150, 153, 197, 363
Намагничивающая сила уравнение 382, 385, 388
Напряжение короткого замыкания трансформатора 408, 502
— между коллекторными пластинами 188, 190

Напряжение на щетках 88
Насыщение добавочных полюсов 200, 214
Несимметричные режимы работы трехфазных трансформаторов 430

Обмотка барабанного якоря 95, 97
— возбуждения 53, 228, 319
— добавочных полюсов 53, 195
— кольцевого якоря простая волновая 109
Обмотка кольцевого якоря простая петлевая 82
— трансформатора 344
— — группы соединений 395
— — соединение зигзагом 394
— — схемы соединений 395
— — чередующаяся 339, 345
Обратимость электрических машин 256
Опыт холостого хода трансформатора 386
— короткого замыкания трансформатора 412

Паз реальный 68, 100
— якоря 99
— элементарный 100
Параллельная работа генераторов постоянного тока 256, 258
Параллельная работа трансформатора 452
Параметры короткого замыкания трансформаторов 409
Параметры холостого хода трансформатора 387
Передача электроэнергии 17, 331
Перенапряжения в трансформаторах 462, 471
Переходные режимы в трансформаторах 462
Период коммутации 164
— э. д. с. 50
Плотность тока в проводнике 227
— — под щеткой 166, 204
Подпитка добавочных полюсов 211
Подшипники 54
Полюсы добавочные 53, 194
— основные 53, 61, 319
Потери вентиляционные 222
— в меди обмоток 226, 411
— в подшипниках 220, 221
— в стали 223, 380
— в цепи возбуждения 227
— в щеточном контакте 228
— добавочные 228, 381, 411
— механические 220
— на вихревые токи 224
— на гистерезис 223
— основные 223, 226, 380, 411
Потери суммарные в машине постоянного тока 229
Потери удельные в стали 38
Поток магнитный добавочных полюсов 198
Поток основной 61, 372
— остаточного намагничивания 248, 464
Поток рассеяния 62, 372, 408, 496
— реакции якоря 150
— результирующий 150
— свободный 463
— установившийся 464
Потокосцепление 180
Правило ладони правой руки 50
Пульсации напряжения в щетках 88
— магнитного потока поперечные и продольные 89, 90
Пуск в ход двигателей постоянного тока 267
Пуск в ход двигателей безреостатный 267
— — — реостатный 269
— — — с помощью специального агрегата 272
Пусковой реостат 270

Рассеяние в трансформаторах 364, 372, 408, 496
Реактивная катушка 512
Реактор 517
Реакция якоря машин постоянного тока 150
Реакция якоря коммутационная 185
Регулирование скоростей вращения двигателей постоянного тока 286, 288, 290, 293
Регулировочные характеристики двигателей постоянного тока 286
Регулятор электромашинный 327
Режимы несимметричной работы трансформатора 430

Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения 248, 328
Сдвиг щеток с нейтрали 95, 193, 200
Сердечник трансформатора 347, 349
— якоря машины постоянного тока 54
Симметрия обмотки якоря 90, 136
Скорость вращения якоря машины постоянного тока 275, 300—302
Скорость вращения двигателя параллельного возбуждения, номинальное изменение 272
Соединение обмоток трехфазных трансформаторов 390, 392, 393, 394
Сопротивление активное обмоток трансформаторов 362, 368, 497
Сопротивление волновое 471
— индуктивное обмоток трансформатора 366, 368, 498

Сопротивление критическое генератора параллельного возбуждения 249
Сопротивление нулевой последовательности полное 445, 449
Сопротивление постоянному току 412
— удельное алюминия 43
— — меди 43, 226
Сталь электротехническая 34, 37
Схемы автотрансформатора 492, 494, 505
Схемы генераторов постоянного тока 238, 248, 252, 253
Схемы двигателей постоянного тока 267, 268, 275, 276
Схемы замещения трансформаторов 371, 386, 410, 442, 473
Схемы испытательные 218, 386, 413
Схемы обмоток радиальные 80, 82, 91
Схемы обмоток развернутые 105, 112, 114, 117, 118, 120, 123, 124, 126, 129, 131, 132, 134, 147
Схемы параллельной работы генераторов постоянного тока 258, 260
Схемы соединений трехфазных обмоток 394, 397
Схемы трансформаторов специальных 503, 504, 507, 508, 510, 512, 514
Схемы электрические 87, 92, 141
Схемы электромашинного усилителя 324—327
Схемы энергетические 236, 263

Ток включения трансформатора при холостом ходе 463
Ток внезапного короткого замыкания генератора постоянного тока 250
Ток внезапного короткого замыкания трансформатора 467
Ток возбуждения машин постоянного тока 78, 228, 234, 263
Ток выпрямленный 51, 508
— пусковой 266, 270
— уравнительный 137
— холостого хода трансформатора 378
Ток якоря 88, 237, 261
Ток якоря в параллельной ветви 237
Токи прямой, обратной и нулевой последовательности 431
Торможение двигателей постоянного тока 282—285
Трансформатор 334
— броневой 336
Трансформатор двухобмоточный 334
— измерительный 517
— изолирующий 515
Трансформатор масляный 337, 355
— с намотанным сердечником 519
— с плавным регулированием напряжения 505
Трансформатор с принудительной циркуляцией масла 356
Трансформатор сварочный 517
— силовой 337
— стержневой 347
— сухой 337
— трехобмоточный 336, 495
— трехфазный 338, 387

Униполярная машина 318
Уравнение моментов 238, 264
— э. д. с. машин постоянного тока 236, 263
Уравнение н. с. трансформаторов 363, 366, 409
Уравнение э. д. с. трансформаторов 363—369, 375
Уравнительные соединения 136, 140, 144

Холостой ход трансформатора 372, 401

Шаг обмотки по коллектору 80, 87, 124, 127, 147
Шаг секции полный, укороченный, удлиненный 96
Шаг обмотки якоря результирующий 101
Шаги обмотки якоря 100

Щетки 56, 94, 204, 207

Экран 489
Электродвижущая сила 30, 49
— — активных сторон секции 107
Электродвижущая сила взаимоиндукции 170
Электродвижущая сила высших гармонических 389, 403
Электродвижущая сила коммутирующая 170
Электродвижущая сила обмотки смешанного типа 167
Электродвижущая сила обмоток трансформатора 376
Электродвижущая сила обмоток якоря машины постоянного тока 94, 148
Электродвижущая сила рассеяния обмоток трансформатора 366
Электродвижущая сила реактивная 176, 181
Электродвижущая сила самоиндукции коммутируемой секции 169
Электромашинный усилитель 321
Электропривод по системе генератор—двигатель 293
Электропривод по системе генератор — двигатель с маховиком 295

Якорь барабанный 54, 95
— кольцевой 54, 80, 95

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к третьему изданию 3

Предисловие ко второму изданию 5

Введение 7

В-1. Краткая история развития электрических машин . . . . . —
В-2. Развитие энергетики и электромашиностроения в СССР 17
В-3. Основные величины и системы единиц 24
В-4. Рационализация уравнений электромагнитного поля 25
В-5. Изображение синусоидальных величин на векторных диаграммах . . 26
В-6. Основные законы электротехники в применении к анализу процессов в электрических машинах 27
В-7. Материалы, применяемые в электромашиностроении 32

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Глава первая. **Основной тип машины постоянного тока и основные элементы ее конструкции** 46

1-1. Краткая история развития машины постоянного тока . . . . . —
1-2. Основной тип машины постоянного тока 47
1-3. Выпрямление переменного тока в постоянной с помощью коллектора . 48
1-4. Основные элементы конструкции машины постоянного тока 51
1-5. Номинальные величины 60

Глава вторая. **Магнитная цепь машины постоянного тока при холостом ходе** 61

2- 1. Общие замечания . . . . . —
2- 2. Магнитная цепь машины постоянного тока. Определение основной н. с. 62
2- 3. Зазор. Кривая распределения индукции в зазоре 64
2- 4. Метод приведения. Расчетная полюсная дуга 66
2- 5. Расчетная длина якоря 67
2- 6. Н. с. зазора для гладкого якоря . . . . . —
2- 7. Н. с. зазора для зубчатого якоря 68
2- 8. Ориентировочные данные 69
2- 9. Н. с. зубцовой зоны . . . . . —
2-10. Н. с. спинки якоря 72
2-11. Н. с. полюсов и ярма 73
2-12. Кривая намагничивания машины 75
2-13. Численный пример . . . . . —

Глава третья. **Обмотки и э. д. с. якоря машины постоянного тока** . . 79

3- 1. Предварительные замечания . . . . . —
3- 2. Классификация обмоток якорей машин постоянного тока 80
3- 3. Принцип выполнения простых обмоток кольцевого якоря и их основные характеристики . . . . . —
3- 4. Простая петлевая обмотка кольцевого якоря 82
3- 5. Простая волновая обмотка кольцевого якоря 91
3- 6. Э. д. с. кольцевого якоря 93
3- 7. Принципы выполнения обмоток барабанного типа 95
3- 8. Конструкция обмоток барабанного якоря 97
3- 9. Шаги обмоток 100
3-10. Простые петлевые обмотки барабанного якоря 105
3-11. Простые волновые обмотки барабанного якоря 116
3-12. Простые волновые обмотки, образуемые с помощью искусственных приемов 119
3-13. Сложные петлевые обмотки 123
3-14. Сложные волновые обмотки 127
3-15. Условия симметрии обмоток барабанного якоря 136
3-16. Уравнительные соединения (уравнители) . . . . . —
3-17. Специальная обмотка барабанного якоря смешанного типа (лягушечья обмотка) 145
3-18. Сравнительные характеристики обмоток различных типов 148
3-19. Э. д. с. обмотки барабанного якоря . . . . . —

Глава четвертая. **Реакция якоря** 149

4-1. Намагничивающая сила машины при нагрузке . . . . . —
4-2. Поперечная и продольная н. с. якоря 153
4-3. Реакция якоря в генераторе 154
4-4. Влияние продольной реакции якоря на э. д. с. машины 160
4-5. Реакции якоря в двигателе . . . . . —

Глава пятая. **Коммутация** 161

5- 1. Общие соображения. Шкала искрения . . . . . —
5- 2. Сущность коммутационного процесса 162
5- 3. Коммутация сопротивления без учета э. д. с., индуктируемых в короткозамкнутой секции 163
5- 4. Коммутация при учете сопротивлений петушков и обмотки 167
5- 5. Э. д. с., индуктируемые в короткозамкнутом контуре в процессе коммутации 169
5- 6. Коммутация с учетом э. д. с. в короткозамкнутом контуре при ширине щетки, равной коллекторному делению 170
5- 7. Коммутация при ширине щетки, превышающей коллекторное деление 175
5- 8. Коэффициент результирующей самоиндукции и определение реактивной э. д. с. 179
5- 9. Индуктивность рассеяния короткозамкнутой секции в период ее коммутации 183
5-10. Специальные средства уменьшения реактивной э. д. с. коммутации . . 184
5-11. Коммутационная реакция якоря 185
5-12. Причины искрения электромагнитного характера 187
5-13. Причины искрения потенциального характера 188
5-14. Причины искрения механического характера 190
5-15. Общая характеристика искрения на коллекторе при угольно-медном контакте . . . . . —
5-16. Круговой огонь по коллектору 191

Глава шестая. **Средства улучшения коммутации и методы ее экспериментального исследования** 193

6-1. Средства борьбы с искрением электромагнитного характера . . . . . —
6-2. Уменьшение реактивной э. д. с. e_r . . . . . —
6-3. Создание коммутирующего поля сдвигом щеток с нейтрали . . . . . —

6- 4. Создание коммутирующего поля посредством добавочных полюсов . . 195
6- 5. Влияние добавочных полюсов на основное поле 199
6- 6. Влияние насыщения добавочных полюсов на коммутацию 200
6- 7. Компенсационная обмотка 201
6- 8. Добавочные средства борьбы с круговым огнем 203
6- 9. Щетки и их характеристики 204
6-10. Природа щеточного контакта 207
6-11. Экспериментальные методы анализа и настройки коммутации 209
6-12. Осциллографирование процессов коммутации 214
6-13. Практические выводы по теоретическим и экспериментальным исследованиям коммутации 216

Глава седьмая. **Потери энергии и коэффициент полезного действия (к. п. д.) электрических машин** 219

7-1. Предварительные замечания . . . . . —
7-2. Классификация потерь . . . . . —
7-3. Механические потери 220
7-4. Основные потери в стали 223
7-5. Основные потери в меди 226
7-6. Добавочные потери 228
7-7. Суммарные потери в машине постоянного тока и ее к. п. д. 229
7-8. Изменение к. п. д. машины постоянного тока с изменением нагрузки и максимальный к. п. д. 231
7-9. Опытное определение к. п. д. машины постоянного тока 232

Глава восьмая. **Генераторы постоянного тока** 233

8- 1. Предварительные замечания . . . . . —
8- 2. Классификация генераторов постоянного тока по способу возбуждения 234
8- 3. Энергетический процесс генератора постоянного тока 235
8- 4. Уравнение э. д. с. генератора $n = \text{const}$. . . . . —
8- 5. Электромагнитный момент генератора 236
8- 6. Уравнение моментов генератора 238
8- 7. Основные характеристики генераторов постоянного тока 239
8- 8. Характеристики генератора независимого возбуждения . . . . . —
8- 9. Характеристики генератора параллельного возбуждения 248
8-10. Генератор последовательного возбуждения 252
8-11. Генератор смешанного возбуждения 253

Глава девятая. **Совместная работа генераторов постоянного тока** . . 256

9-1. Общие соображения . . . . . —
9-2. Параллельная работа генераторов параллельного возбуждения . . . —
9-3. Параллельная работа генераторов смешанного возбуждения 259

Глава десятая. **Двигатели постоянного тока** 261

10- 1. Принцип обратимости электрических машин . . . . . —
10- 2. Классификация двигателей постоянного тока 262
10- 3. Энергетический процесс и энергетическая схема двигателей постоянного тока 263
10- 4. Уравнение э. д. с. двигателя . . . . . —
10- 5. Уравнение моментов двигателя 264
10- 6. Характеристики двигателей 266
10- 7. Способы пуска двигателей постоянного тока 267
10- 8. Безреостатный пуск двигателя . . . . . —
10- 9. Реостатный способ пуска. Пусковые реостаты 269
10-10. Пуск двигателей с помощью специального агрегата 272
10-11. Рабочие характеристики двигателей . . . . . —
10-12. Механические характеристики двигателей постоянного тока $n = f(M)$ 279
10-13. Тормозные характеристики двигателей постоянного тока 282
10-14. Регулировочные характеристики двигателей постоянного тока . . . 285

10-15. Регулирование скорости вращения посредством реостата в цепи якоря 286
10-16. Регулирование скорости двигателя изменением возбуждения 288
10-17. Регулирование скорости посредством изменения напряжения сети . 293

Глава одиннадцатая. **Основные и специальные типы машин постоянного тока и перспективы их развития** 296

11-1. Предварительные замечания . . . . . —
11-2. Основные типы машин постоянного тока . . . . . —
11-3. Прокатные двигатели постоянного тока 304
11-4. Машины постоянного тока с гладким якорем 307
11-5. Тяговые двигатели пульсирующего тока 311
11-6. Специальные машины постоянного тока 318

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Глава двенадцатая. **Основные определения и элементы конструкции трансформаторов** 334

12-1. Развитие трансформаторостроения . . . . . —
12-2. Основные определения 336
12-3. Номинальные величины 337
12-4. Основные принципиальные и конструктивные типы выполнения трансформаторов 338
12-5. Основные конструктивные элементы трансформаторов 347
12-6. Примеры выполненных мощных высоковольтных трансформаторов 358

Глава тринадцатая. **Физические условия работы трансформаторов** 362

13-1. Принцип работы трансформатора . . . . . —
13-2. Уравнения н. с. и э. д. с. трансформатора 363
13-3. Коэффициент трансформации напряжений трансформатора 366
13-4. Уравнения н. с. и э. д. с. при синусоидальном изменении напряжений и токов . . . . . —
13-5. Приведенный трансформатор 367
13-6. Уравнения н. с. и э. д. с. приведенного трансформатора 369
13-7. Схема замещения трансформатора . . . . . —

Глава четырнадцатая. **Холостой ход однофазного трансформатора** 372

14-1. Предварительные замечания . . . . . —
14-2. Работа однофазного трансформатора в режиме холостого хода . . . —
14-3. Холостой ход простейшего трансформатора 373
14-4. Холостой ход реального однофазного трансформатора 378
14-5. Потери холостого хода трансформатора 380
14-6. Влияние формы кривой напряжения на величину потерь в стали . . . 384
14-7. Схема замещения при холостом ходе трансформатора 385
14-8. Опыт холостого хода трансформатора . . . . . —

Глава пятнадцатая. **Классификация магнитных систем и способов соединения обмоток трехфазных трансформаторов. Э. д. с. трехфазных трансформаторов** . . 386

15-1. Классификация магнитных систем трехфазных трансформаторов . . —
15-2. Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов 389
15-3. Э. д. с. трехфазных обмоток трансформатора . . . . . —
15-4. Соединение трехфазной обмотки трансформатора звездой 390
15-5. Соединение трехфазной обмотки трансформатора треугольником . . . 393
15-6. Соединение трехфазной обмотки трансформатора зигзагом 394
15-7. Стандартные способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов в СССР . . . . . —
15-8. Схемы и группы соединений обмоток 395
15-9. Области применения различных способов соединения обмоток 399

Глава шестнадцатая. **Холостой ход трехфазного трансформатора** 400

16-1. Холостой ход трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу $Y/Y_0 - 12$ . . . . . —
16-2. Холостой ход трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Δ/Y 403
16-3. Холостой ход трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Y/Δ 404
16-4. Соединение $Y/Y_0 - 12$ трехфазного трансформатора с третичной обмоткой 405
16-5. Данные холостого хода трехфазных трансформаторов . . . . . —
16-6. Численный пример . . . . . —

Глава семнадцатая. **Режим короткого замыкания трансформаторов. Рассеяние в трансформаторах** 406

17- 1. Предварительные замечания . . . . . —
17- 2. Напряжение короткого замыкания 407
17- 3. Физические условия работы трансформатора при коротком замыкании . . . . . —
17- 4. Диаграмма короткого замыкания приведенного трансформатора . . 408
17- 5. Схема замещения трансформатора при коротком замыкании 409
17- 6. Треугольник короткого замыкания трансформатора 410
17- 7. Потери при коротком замыкании 411
17- 8. Определение параметров короткого замыкания трансформатора . . . 412
17- 9. Короткое замыкание трехфазных трансформаторов . . . . . —
17-10. Рассеяние в трансформаторах с концентрическими и чередующимися обмотками 413
17-11. Численный пример 418

Глава восемнадцатая. **Работа трансформаторов под нагрузкой** . . 419

18- 1. Предварительные замечания . . . . . —
18- 2. Работа под нагрузкой простейшего трансформатора . . . . . —
18- 3. Работа под нагрузкой действительного трансформатора 420
18- 4. Векторные диаграммы замещенного трансформатора 422
18- 5. Упрощенные векторные диаграммы трансформатора 423
18- 6. Зависимость приведенного вторичного напряжения от $\cos \varphi_2$ нагрузки 424
18- 8. Определение изменения вторичного напряжения 425
18- 8. Численный пример 426
18- 9. Внешняя характеристика трансформатора 427
18-10. Коэффициент полезного действия (к. п. д.) трансформатора . . . . . —
18-11. Численный пример 429

Глава девятнадцатая. **Несимметричные режимы работы трехфазных трансформаторов** 430

19- 1. Предварительные замечания . . . . . —
19- 2. Метод симметричных составляющих . . . . . —
19- 3. Условия анализа несимметричных режимов и коротких замыканий . 432
19- 4. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при отсутствии нулевого провода 433
19- 5. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении обмоток по способу $\Delta/Y - 11$ . . . . . —
19- 6. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении обмоток по способу Y/Y без заземления нуля 436
19- 7. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при наличии заземленного нулевого провода при соединении обмоток по схеме Y/Y_0 —
19- 8. Двухфазное короткое замыкание трехфазного трансформатора при стандартном соединении Y/Y_0 440
19- 9. Однофазное короткое замыкание трехфазного трансформатора при соединении обмоток по способу Y/Y_0 442

19-10. Диаграмма однофазного короткого замыкания трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Y/Y_0 446
19-11. Несимметричная нагрузка трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу $\Delta/Y_0 - 11$ 447
19-12. Однофазное короткое замыкание трехфазного трансформатора при соединении его обмоток по способу Δ/Y_0 448
19-13. Определение сопротивления нулевой последовательности 449
19-14. Работа трехфазного трансформатора при открытом треугольнике . . —

Глава двадцатая. **Параллельная работа трансформаторов** 452

20-1. Условия параллельной работы трансформаторов . . . . . —
20-2. Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации 453
20-3. Параллельная работа трехфазных трансформаторов с различными группами соединения обмоток 457
20-4. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания 459

Глава двадцать первая. **Переходные режимы трансформаторов** . 462

21-1. Классификация переходных режимов . . . . . —
21-2. Сверхтоки . . . . . —
21-3. Термические явления при коротком замыкании 466
21-4. Механические усилия при внезапном коротком замыкании 467
21-5. Причины и характер перенапряжений в трансформаторах 469
21-6. Схема замещения трансформатора при перенапряжениях 470
21-7. Начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора 472
21-8. Переходный процесс и конечное распределение напряжения 473
21-9. Защита трансформаторов от перенапряжений 475

Глава двадцать вторая. **Нагревание и охлаждение трансформаторов** 478

22- 1. Предварительные замечания . . . . . —
22- 2. Способы охлаждения масляных трансформаторов . . . . . —
22- 3. Тепловые потоки и условия рассеяния тепла в масляном трансформаторе . . . . . —
22- 4. Нагревание сердечника трансформатора 480
22- 5. Нагревание обмотки трансформатора 481
22- 6. Роль масла и бака в охлаждении трансформатора 483
22- 7. Наибольшие допускаемые превышения температуры 485
22- 8. Влияние температуры на срок службы трансформатора . . . . . —
22- 9. Постоянные времени нагревания трансформатора 487
22-10. Нагрузочная способность трансформатора . . . . . —
22-11. Контроль за температурой и тепловая защита трансформаторов . . . 489

Глава двадцать третья. **Специальные типы трансформаторов** . . 491

23-1. Общие сведения . . . . . —
23-2. Автотрансформаторы . . . . . —
23-3. Трехобмоточные трансформаторы 495
23-4. Трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой . . . 502
23-5. Трансформаторы с плавным регулированием напряжения 505
23-6. Трансформаторы для ртутных выпрямителей (выпрямительные трансформаторы) 506
23-7 Испытательные трансформаторы 514
23-8. Сварочные трансформаторы 517
23-9. Краткие сведения о трансформаторах разных типов . . . . . —

Глава двадцать четвертая. **Старение изоляции и нагрузочная способность трансформаторов и реакторов** 520

Список литературы 524

Предметный указатель 534

Михаил Полиевктович Костенко

Людвик Марианович Пиотровский

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. Ч. 1

Научный редактор *А. Р. Дембо*
Редактор *Л. М. Пархоменко*
Художественный редактор *Г. А. Гудков*
Технический редактор *В. И. Семенова*
Корректор *А. Ф. Кузнецова*

Сдано в набор 5/VII 1972 г. Подписано в печать 20/X 1972 г. М-06781. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 3. Бум. л. 17. Печ. л 34. Уч.-изд. л. 37,82. Тираж 60 000 (1-й завод 1—30 000). Заказ № 1485. Цена 1 р. 82 к.

Ленинградское отделение издательства «Энергия», Марсово поле, 1

Матрицы изготовлены в типографии № 4 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, ул. Социалистическая, 14.

Отпечатано в типографии № 6 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Заказ 2121,
Московский пр., 91.