

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»

УДК 621.313.323

СНИЖКО А.А., аспирант
КОЛЫЧЕВ С.В., к.т.н., доцент
НИЗИМОВ В.Б., д.т.н., профессор

Днепродзержинский государственный технический университет

ДИНАМИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С МНОГОСТУПЕНЧАТЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Введение. Задача пуска мощных синхронных двигателей (СД) с токоограничением не теряет своей актуальности, в первую очередь для разворота механизмов со значительными моментами инерции статического сопротивления (шаровые и стержневые мельницы, барабанные окомкователи, дробилки, скребковые конвейеры), а также в условиях питания двигателей от протяженных электрических сетей, что характерно для приводов механизмов буровых установок нефте- и газодобывающей промышленности и турбокомпрессоров газоперекачивающих станций.

Параметрические способы пуска с использованием реакторов, автотрансформаторов и тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) обеспечивают ограничение пусковых токов, однако не позволяют создать необходимые пусковые моменты для разворота выше перечисленных механизмов.

Повышение пускового момента СД может быть достигнуто:

- 1) применением специальных законов управления контуром возбуждения (дискретное управление напряжением возбуждения, непрерывное или ступенчатое изменение величины сопротивления пускового резистора, а также их совместное управление) [1...3];
- 2) усложнением системы возбуждения СД (пусковые индукционные сопротивления в роторе, системы возбуждения с преобразователями двусторонней проводимости, емкостные накопители энергии в контуре возбуждения) [4...6];
- 3) изменением конструкции собственно СД (применение расщепленных обмоток возбуждения с последовательными конденсаторами, размещение поперечной обмотки возбуждения) [7...9].

Однако перечисленные способы не позволяют создать значительные пусковые моменты при ограничении токов статора на заданном уровне.

Постановка задачи. Задачей работы является повышение пускового момента СД для разворота механизмов с большим моментом статического сопротивления при одновременном ограничении токов статора и пусковой обмотки.

Результаты работы. В режиме асинхронного пуска СД электромагнитный момент создается в основном пусковой (демпферной) обмоткой, а обмотка возбуждения (ОВ) загружена не полностью. В зависимости от конструкции СД амплитуда пускового тока ОВ частоты скольжения лежит в пределах 0,8...1,6 номинального тока возбуждения. Для обеспечения устойчивости двигателя обмотка возбуждения должна выдерживать токовую нагрузку не менее 1,4-кратного значения номинального тока возбуждения в течении 20...50 с., что обычно значительно больше, чем время пуска. Как показано в работе [10], для крупного СД мощностью 3150кВт, 500 об/мин привода стержневой мельницы за время асинхронного пуска превышение температуры обмоток статора составило 10,4°C, ОВ – 0,087°C. В то же время токи отдельных стержней пусковой обмотки лежат в пределах 9500...10500 А, а превышение температуры достигает

95...103°С. По элементам короткозамкнутых колец пусковые токи достигают значений в 25000...36000 А.

Относительная незначительность электромагнитного момента, создаваемого ОВ, связана с фазовым сдвигом между ЭДС и током возбуждения, близким к 90 эл. град. Поэтому для увеличения пускового момента СД необходимо уменьшить фазовый сдвиг между током и ЭДС, что достигается включением емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Это также позволяет частично компенсировать индуктивное сопротивление контура возбуждения, повысить амплитуду его тока, что приведет к перераспределению токовой нагрузки между пусковой и обмоткой возбуждения.

Вследствие одноосного эффекта электромагнитный момент, создаваемый ОВ, суммируется с моментом, создаваемым пусковой обмоткой, а после полусинхронной скорости – вычитается. При некоторых значениях величины емкости ЕНЭ возможны значительные тормозные моменты, что может привести к явлению «застывания» ротора в зоне полусинхронной скорости, что снижает надежность пуска двигателя. Во избежание уменьшения суммарного электромагнитного момента после прохождения полусинхронной скорости необходимо выводить емкостные накопители из контура возбуждения.

Существенным недостатком конденсаторного пуска СД является зависимость увеличения электромагнитного момента от скольжения. Это связано с тем, что максимум момента двигателя достигается при полной компенсации емкостным сопротивлением накопителя сопротивления рассеяния контуров ротора по продольной оси. Для этого емкостное сопротивление накопителя должно изменяться в функции скольжения нелинейно по закону:

$$X_c = \frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}, \quad (1)$$

где $A = x_{\sigma kd} s^2 + 2x_{\sigma f} s^2 + \frac{r_{kd}^2}{x_{\sigma kd}}$; $B = x_{\sigma f} x_{\sigma kd} s^4 + x_{\sigma f}^2 s^4 + \frac{r_{kd}^2}{x_{\sigma kd}} x_{\sigma f} s^2 + R_f^2 s^2$,

Поскольку создание емкостного накопителя энергии с нелинейными параметрами представляет собой достаточно сложную техническую задачу, альтернативой ему может послужить многоступенчатый емкостной накопитель энергии (МЕНЭ), состоящий из батареи конденсаторов, коммутируемых с помощью электронных ключей.

Функциональная схема пускового устройства, содержащего ТРН и МЕНЭ, представлена на рис.1.

Управление выходным напряжением тиристорного регулятора (ТРН) осуществляется в зависимости от величины тока статора, данные о котором с помощью датчиков ТА, ТУ поступают на микропроцессорный модуль (MCU). Он, в свою очередь, формирует управляющие сигналы для блока управления тиристорами (AUZ) и осуществляет контроль выходного напряжения ТРН. Коммутация ключей МЕНЭ и, соответственно, изменение его емкости производится в функции скольжения, вычисляемого посредством измерения частоты вращения ротора двигателя.

При подаче напряжения от ТРН на статор СД ток в ОВ замыкается через резистор R1 и последовательно соединенный с ним МЕНЭ (C1, C2 и C3). По мере увеличения частоты вращения ротора суммарная емкость МЕНЭ должна увеличиваться в соответствии с (1), что достигается последовательным включением ключей K1, K2 и K3.

При замыкании ключа K3 МЕНЭ выводится из контура возбуждения, и ток в ОВ протекает через часть резистора R1, что приводит к увеличению входного момента СД. Для ограничения перенапряжений на конденсаторах в схеме предусмотрены разрядные цепи, состоящие из тиристорных ключей VS7 и VS8 и резисторов R2 и R3. При достижении на конденсаторах уровня напряжения, допустимого по электрической прочности

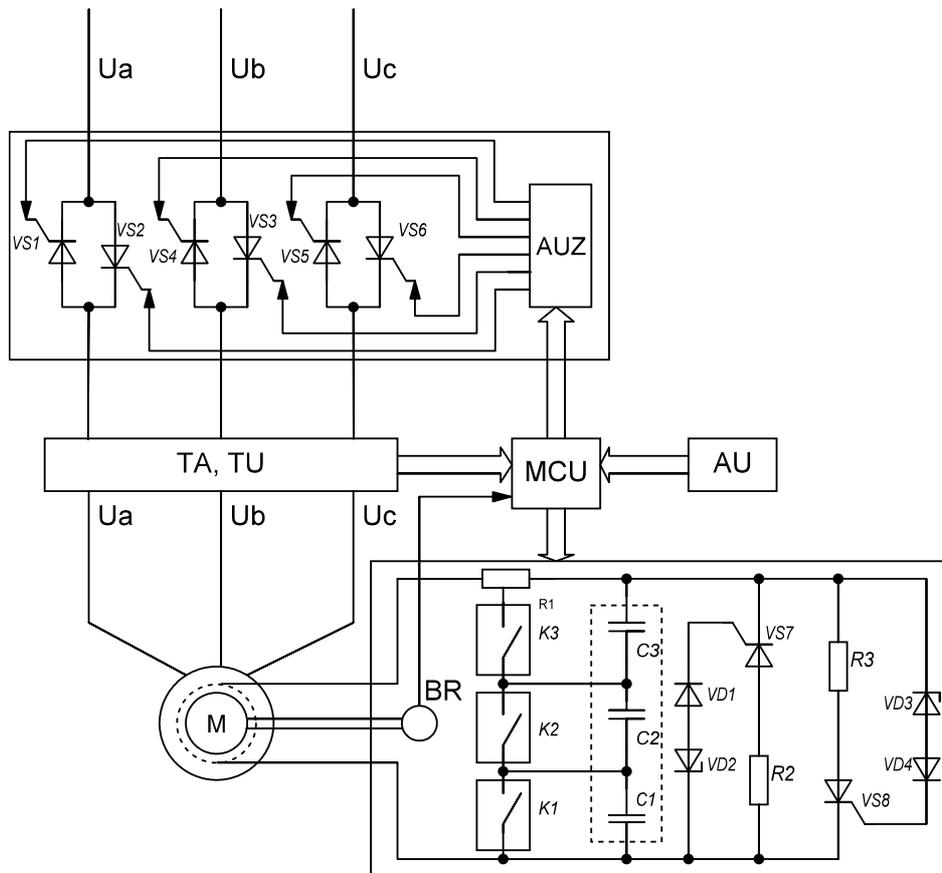


Рисунок 1 – Функциональная схема пускового устройства с МЕНЭ в контуре возбуждения и ТРН в статоре СД

изоляции обмотки возбуждения, пробиваются стабилитроны VD3 или VD2 в зависимости от полярности напряжения, и через диоды VD1 и VD4 поступает управляющий сигнал на открытие тиристора VS7 или VS8, и накопители разряжаются на соответствующие резисторы.

Блок AU служит для задания на ограничение максимального тока статора.

В результате моделирования пуска СД типа СДС3-2000-100 привода шаровой барабанной мельницы с рассмотренным устройством, выполненного в ортогональной системе координат d-q [11], были получены расчетные переходные процессы. Номинальные параметры двигателя: $P_n=2000$ кВт, $U_{1n}=6000$ В, $I_n=229$ А, $n_n=100$ об/мин. Параметры обмотки возбуждения: $U_{fn}=51$ В, $I_{fn}=276$ А. На рис.2 представлены характеристики пуска двигателя с применением предложенной системы, а на рис.3 – прямой асинхронный пуск с десятикратным добавочным резистором без накопителя энергии.

Анализ приведенных расчетных зависимостей показывает, что, несмотря на ограничение тока статора на шестикратном уровне относительно номинального, ток в ОВ вырос с 2,5 при прямом асинхронном пуске до 5 значений от номинального при включении МЕНЭ. Это позволило повысить развиваемый двигателем электромагнитный момент с двукратного до 2,5 от номинального на время работы накопителя. Вследствие перераспределения токовой нагрузки между роторными контурами ток в демпферной обмотке при пуске с использованием МЕНЭ снизился в среднем на один номинал в продольной и поперечной обмотках.

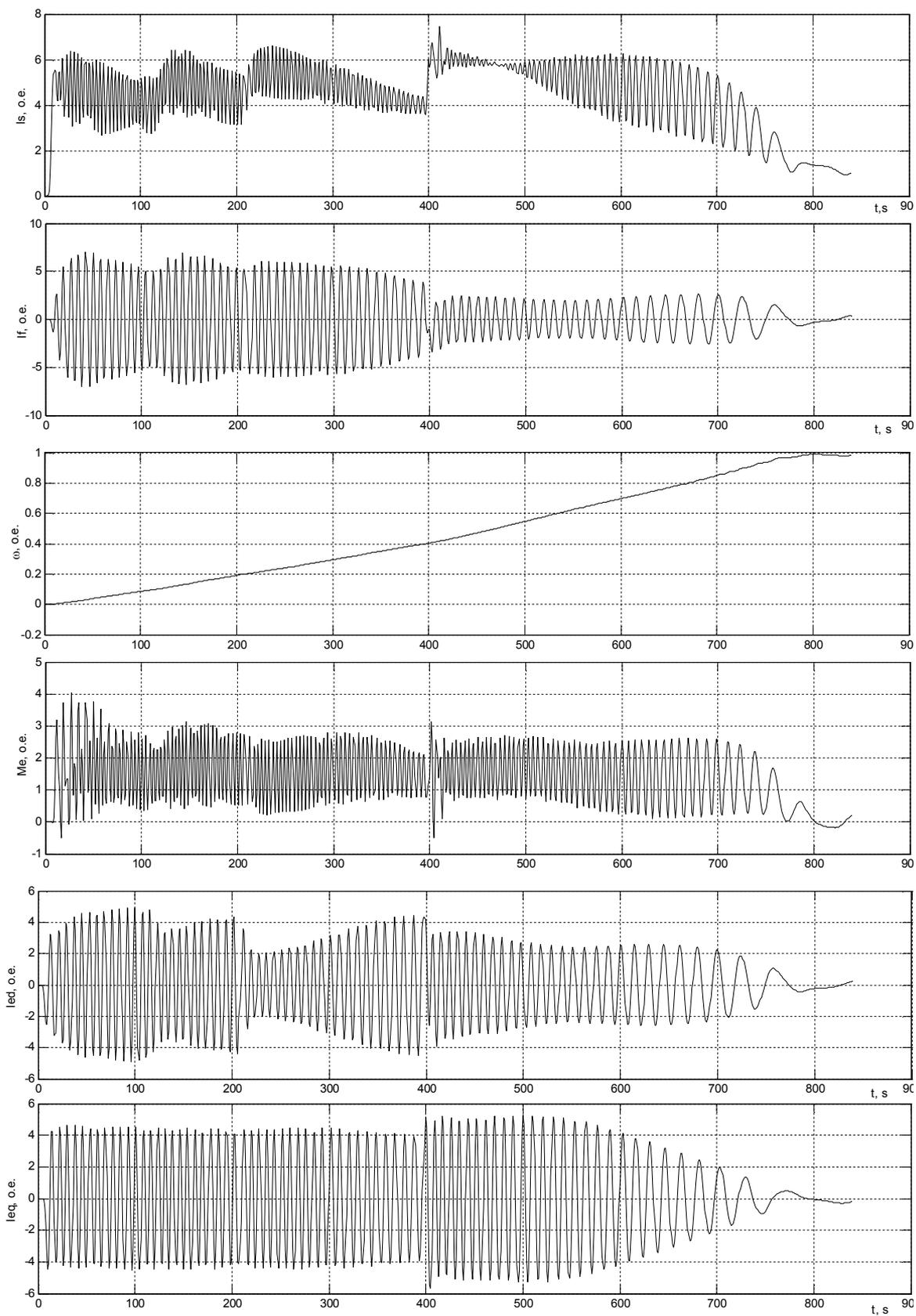


Рисунок 2 – Динамические пусковые характеристики СД с МЕНЭ

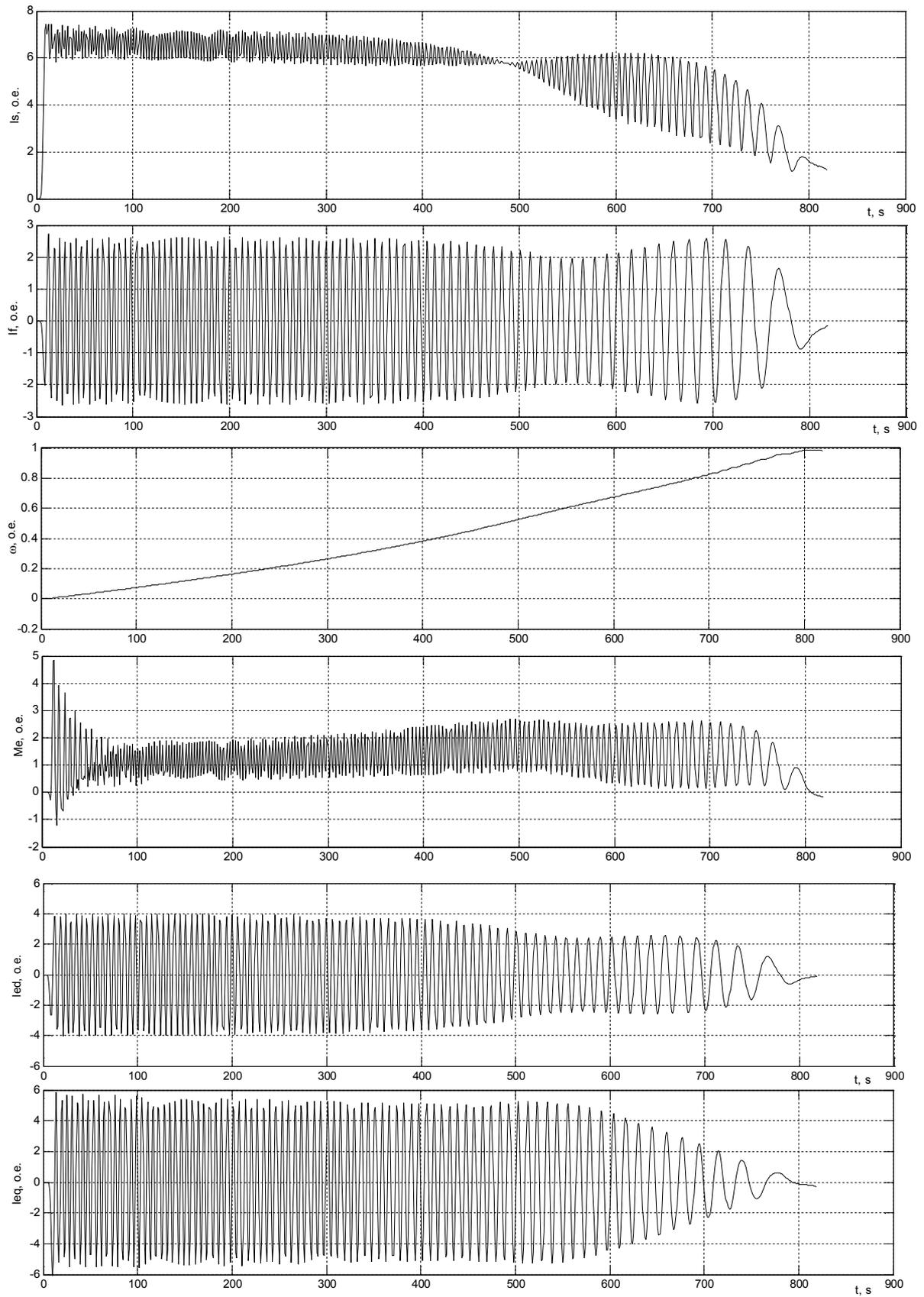


Рисунок 3 – Динамічні характеристики прямого асинхронного пуска СД

Выводы. Применение МЕНЭ, включенного в контур возбуждения СД, позволяет создать и поддерживать значительный электромагнитный момент двигателя во время пуска, достаточный для разворота и надежного запуска двигателя в условиях ограничения напряжения питания на обмотках статора. В результате перераспределения токовой нагрузки между обмотками ротора повысилась эффективность использования ОВ во время пуска, снизилась загрузка демпферных контуров, а также уменьшилось воздействие на контуры термомеханических сил, что способствует продлению срока службы и снижению аварийности двигателя, вызванной частыми пусками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов К.Б. Средства и способы самозапуска электродвигателей / К.Б.Носов, Н.М.Дворак. - Кемерово: Кемеровское книжное изд-во, 1985. – 128 с.
2. Соколов Н.И. Ресинхронизация синхронных двигателей многократной форсировкой возбуждения / Н.И.Соколов, И.А.Сумцов, А.М.Кременецкий // Электричество. - 1975. - №5. - С.43-48.
3. Бабурин В.Б. О повышении продольного электромагнитного момента машин переменного тока в асинхронном режиме / В.Б.Бабурин, И.А.Сумцов // Труды ВНИИЭ. – М.: ВНИИЭ. – 1979. – Вып. 57. – С.65-71.
4. Абрамович Б.Н. Система возбуждения с двухсторонним преобразователем в цепи обмотки возбуждения / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Бирюков, В.М.Вадатурский // Электротехника. – 1971. – №12. – С.7-10.
5. Осипова С.В. Асинхронный пуск синхронного двигателя с максимальными входным и пусковым моментами / С.В.Осипова, А.И.Каяшев // Изв.вузов. Энергетика. – 1974. – №8. – С.119-121.
6. Низимов В.Б. Применение накопителей энергии для асинхронного пуска синхронных двигателей / В.Б.Низимов // Науковий вісник НГА України. – 2000. – №1. – С.49-51.
7. Пивняк Г.Г. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных двигателей / Г.Г.Пивняк, В.И.Кириченко, В.А.Бородай // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». Ч.2. - К.: Національна академія наук України. - 2002. - С.62-65.
8. Ахматов М.Г. Синхронные машины. [Спец. курс: учеб. пособие для втузов] / Ахматов М.Г. – М.: Высшая школа, 1984. – 135с.: 4 ил.
9. Пирматов Н.Б. Исследование работы синхронного двигателя с возбуждением по продольной и поперечной осям при ударной нагрузке / Н.Б.Пирматов, М.Г.Ахматов, И.К.Камалов // Электричество. – 2003. - №2. - С.64-65.
10. Низимов В.Б. Влияние электрической емкости в контуре возбуждения на демпферную обмотку при асинхронном пуске синхронного двигателя / В.Б.Низимов, С.В.Колычев, Ю.И.Зинченко // Придніпровський науковий вісник: технічні науки. – 1998. – №73(140). – С.81-87.
11. Моделирование пусковых режимов СД в пакете MATLAB / В.Б.Низимов, С.В.Количев, А.Ю.Великий, В.И.Хоменко // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні науки) / Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2009. – С.117-123.

Поступила в редколлегию 06.12.2011.

Днепродзержинский государственный технический университет

К ВОПРОСУ О САМОЗАПУСКЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКЕ

Введение. На предприятиях химической, черной и цветной металлургии, где широко используются синхронные двигатели (СД), актуальной проблемой является самозапуск агрегатов с номинальной нагрузкой для обеспечения бесперебойности технологического процесса.

Этой проблеме посвящен целый ряд работ, в которых исследовались способы улучшения процесса ресинхронизации за счет специального регулирования тока возбуждения СД или применения коммутаторов в статорных цепях [1-3].

В данной работе исследован на ЭВМ переходный процесс ресинхронизации и на основании полученных результатов рассматривается возможность успешного самозапуска синхронного электропривода с применением устройства гашения поля с последующей форсировкой возбуждения в функции углового положения ротора.

Непрерывный технологический процесс ряда агрегатов, а также характер изменения переменных и их максимальные значения, оказывающие опасные воздействия на СД, предопределили применение ЭВМ при исследовании переходных процессов ресинхронизации.

Постановка задачи. Задачей работы являются исследования переходных процессов режима ресинхронизации для построения системы облегченного самозапуска СД.

Результаты работы. Исследования проведены применительно к синхронному электроприводу водяных насосов с электродвигателем типа ДС 140-29-6, $P_n = 600$ кВт. Для определения условий успешного самозапуска СД режимы работы электродвигателя промоделированы по уравнениям Парка-Горева, насыщение при этом не учитывалось. Рассматривались случаи перерыва питания на 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 и 0,30 с при моменте статического сопротивления на валу электродвигателя $M_c=0$ и $M_c=M_n$. Решение дифференциальных уравнений произведено методом Рунге-Куты с шагом интегрирования 0,005 с точностью 0,01.

Один из результатов расчета переходного процесса при перерыве питания СД на 0,15 с приведен на рис.1. При решении уравнений в режиме ресинхронизации приняты следующие начальные условия: напряжение статора $U_n=0,95 U_n$; напряжение возбуждения $U_n = 0$; момент статический $M_c = 0$; ток статора по осям d и q $i_d=0$, $i_q=0$, $i_{kd}=0,3963$, $i_{kq} = 0$; угол $\Theta = 0$; скольжение $S = 0$. При этом исходные данные для расчета на ЭВМ взяты, исходя из установившегося режима работы СД.

Исследования показали, что по условиям динамической устойчивости СД в данном случае предельной является длительность перерыва питания 0,15 с. При исследовании режима ресинхронизации с большим временем двигатель выпадает из синхронизма и для успешного самозапуска необходимо обеспечить гашение поля с последующей форсировкой возбуждения. Асинхронный режим нагруженного СД завершается успешной ресинхронизацией лишь после форсировки возбуждения, поданной при благоприятном угле $\Theta=k\pi$.

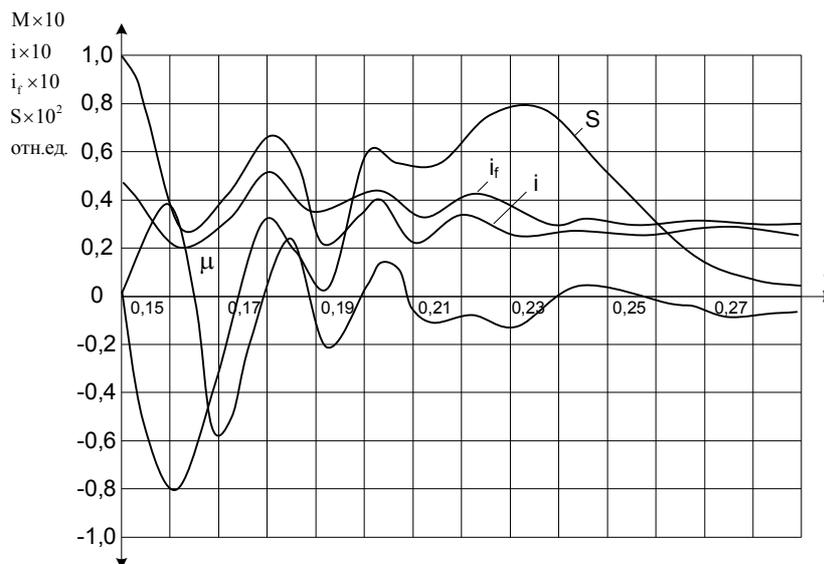


Рисунок 1 – Переходные процессы режима ресинхронизации СД, полученные на ЭВМ

Анализ результатов исследования режима ресинхронизации на ЭВМ показывает, что в начальный момент времени после подачи напряжения $U = 0,95U_H$ наблюдаются колебания скольжения вокруг среднего значения. Если частота и амплитуда этих колебаний таковы, что мгновенные значения становятся равными нулю в процессе ресинхронизации, то благодаря малому ускорению ротора обеспечивается втягивание СД в синхронизм.

Проведенные исследования режима ресинхронизации СД на ЭВМ позволили создать автоматическое устройство, позволяющее обеспечить самозапуск двигателей и во многих случаях предотвратить аварийную остановку непрерывного технологического процесса.

Предложенное устройство позволяет подать напряжение возбуждения синхронного двигателя при ресинхронизации в наиболее благоприятный момент, зависящий от величины угла Θ , что достигается измерением величины угла, сравнением полученного результата с заданием и подачей сигнала на включение возбуждения. Блок-схема устройства ресинхронизации представлена на рис.2.

В устройство ресинхронизации входят: датчик напряжения (ДН), датчик углового положения ротора (ДУП), устройство измерения угла Θ (УИ), устройство сравнения (УС), датчик определения полярности напряжения в цепи ротора (ДОП), логический элемент (ЛЭ) и блок задания (БЗ). Устройство ресинхронизации управляет работой силового выпрямителя (СВ) с системой импульсно-фазового управления (СИФУ). Величина угла Θ в УИ определяется как фазовый сдвиг между импульсными сигналами, поступающими из ДН и ДУП, и выдается в цифровой форме. Результат измерения, полученный в двоично-десятичном коде, сравнивается с кодом задания в устройстве сравнения. При совпадении кода измеренного угла Θ и заданного в БЗ выдается сигнал на включение возбуждения. Величина заданного угла выбирается в каждом конкретном случае. При этом учитывается полярность напряжения в цепи ротора. Подача возбуждения может происходить как в положительный полупериод напряжения в цепи ротора, так и с упреждением.

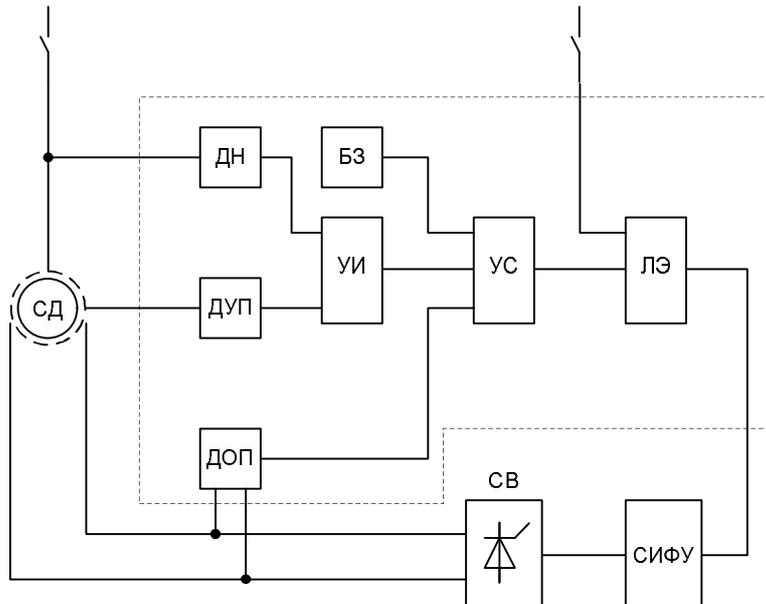


Рисунок 2 – Блок-схема устройства подачи возбуждения в функции угла Θ

Сигнал, получаемый с устройства сравнения, подается на логический элемент ЛЭ, где суммируется с сигналами от других устройств, участвующих в процессе ресинхронизации.

Выводы. Результаты исследований показали, что по условиям динамической устойчивости СД предельной является длительность перерыва питания 0,15с. Для успешного самозапуска необходимо обеспечить гашение поля с последующей форсировкой возбуждения. Исследование режима ресинхронизации на ЭВМ показывает, что в начальный момент времени после подачи напряжения наблюдаются колебания скольжения вокруг среднего значения.

Если частота и амплитуда этих колебаний таковы, что мгновенные значения становятся равными нулю в процессе ресинхронизации, то благодаря малому ускорению ротора обеспечивается втягивание СД в синхронизм.

Проведенные исследования позволили предложить устройство, которое обеспечивает подачу напряжения возбуждения СД при ресинхронизации в наиболее благоприятный момент, зависящий от величины угла Θ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей / Ю.М.Голоднов, А.Х.Хоренян. – М.: Энергия, 1974. – 148с.
2. Ландорф Л.С. О допустимости несинхронного включения синхронных двигателей / Л.С.Ландорф, М.И.Слодарк // Промышленная энергетика. – 1971. – № 10. – С.25-30.
3. Щигель П.М. Ресинхронизация синхронных двигателей с тиристорным возбуждением / П.М.Щигель // Промышленная энергетика. – 1976. – № 11. – С.11-15.

Поступила в редколлегию 24.01.2012.

Днепродзержинский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Введение. Синхронные машины (СМ) с одной обмоткой возбуждения на роторе широко применяются как в энергетике, так и в других областях промышленности, работая в качестве генераторов, двигателей и компенсаторов.

Существенное улучшение их эксплуатационных характеристик и энергетических показателей может быть достигнуто применением двух обмоток возбуждения на роторе, сдвинутых на угол, обычно составляющий 90 эл. град. [1].

Применение СМ с двухосным возбуждением позволяет управлять ориентацией вектора магнитного потока, повышать динамическую устойчивость машины, более эффективно гасить колебания ротора в электроприводах механизмов с переменной и ударной нагрузкой, а также отдавать в сеть или потреблять из нее реактивную мощность в зависимости от значения тока возбуждения.

Теоретические исследования СМ продольно-поперечного возбуждения в основном посвящены вопросам их статической и динамической устойчивости [2, 3], а работы, посвященные исследованиям пусковых режимов, отсутствуют, хотя проблемам пуска СД одноосного возбуждения посвящено обширное количество публикаций [4-7].

Постановка задачи. Задачей работы является исследование влияния поперечной обмотки на пусковые характеристики синхронного двигателя двухосного возбуждения.

Результаты работы. В режиме асинхронного пуска электромагнитный момент СМ создается, в основном, пусковой (демпферной) обмоткой при незначительной нагрузке обмоток продольного и поперечного возбуждения. Относительная незначительность электромагнитного момента продольной обмотки возбуждения связана с фазовым сдвигом, близким к 90 эл. градусов, между ЭДС, наводимой в обмотке, и током возбуждения, протекающим в ней. Если знаки ЭДС и тока обмотки возбуждения (ОВ) совпадают, создается двигательный момент, в противном случае – тормозной. Поэтому для увеличения момента от продольной ОВ уменьшают фазовый сдвиг между ЭДС и током, что и достигается включением пускового резистора или емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) [8].

Между ЭДС и током поперечной обмотки также имеется фазовый сдвиг, который, однако, меньше, чем в продольной ОВ из-за ее значительного активного сопротивления. Хотя включение пускового резистора в поперечную обмотку возбуждения и уменьшает фазовый сдвиг между ЭДС и током, оно может привести к значительным перенапряжениям на этой обмотке в процессе пуска. Поэтому для увеличения электромагнитного момента, создаваемого поперечной обмоткой, целесообразно включать в контур возбуждения емкостные накопители энергии.

Для исследования влияния компенсированной поперечной обмотки на пусковые характеристики СМ составим дифференциальные уравнения контуров машины. С учетом общепринятых допущений [2] уравнения составляющих напряжения статора СМ по продольной d и поперечной q осям в системе относительных единиц имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= \eta i_d + p \Psi_d - \Psi_q \omega; \\ U_q &= \eta i_q + p \Psi_q + \Psi_d \omega. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Уравнения напряжений электрических контуров ротора:

$$\left. \begin{aligned} U_{fd} &= r_{fd}(K+1)i_{fd} + p \Psi_{fd}; \\ U_{fq} &= r_{fq}i_{fq} + \frac{1}{p} x_{cq}i_{fq} + p \Psi_{fq}; \\ 0 &= r_{kd}i_{kd} + p \Psi_{kd}; \\ 0 &= r_{kq}i_{kq} + p \Psi_{kq}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где K – кратность пускового резистора, $K = 2 \dots 10$.

В режиме асинхронного пуска $U_{fd} = 0$, $U_{fq} = 0$.

Потокосцепления контуров СД:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= x_{\sigma}i_d + x_{ad}(i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma}i_d + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_q &= x_{\sigma}i_q + x_{aq}(i_q + i_{kq}) = x_{\sigma}i_q + \Psi_{\delta q}; \\ \Psi_{fd} &= x_{\sigma fd}i_{fd} + x_{ad}(i_d + i_{fd} + i_{kd}) = x_{\sigma fd}i_{fd} + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_{fq} &= x_{\sigma fq}i_{fq} + x_{aq}(i_q + i_{fq} + i_{kq}) = x_{\sigma fq}i_{fq} + \Psi_{\delta q}; \\ \Psi_{kd} &= x_{\sigma kd}i_{kd} + x_{ad}(i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma kd}i_{kd} + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_{kq} &= x_{\sigma kq}i_{kq} + x_{aq}(i_q + i_{kq}) = x_{\sigma kq}i_{kq} + \Psi_{\delta q}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Уравнение движения ротора:

$$\Psi_d i_q - \Psi_q i_d - M_c = J p \omega. \quad (4)$$

Из уравнений (1), (2) и (3) найдем выражения для потокосцеплений контуров:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= (x_{\sigma}i_d + \Psi_{\delta d}) = \frac{1}{p} (U_d + \Psi_q \omega - \eta i_d); \\ \Psi_q &= (x_{\sigma}i_q + \Psi_{\delta q}) = \frac{1}{p} (U_q - \Psi_d \omega - \eta i_q); \\ \Psi_{fd} &= (x_{\sigma fd}i_{fd} + \Psi_{\delta d}) = \frac{1}{p} (U_{fd} + r_{fd} [K+1] i_{fd}); \\ \Psi_{fq} &= (x_{\sigma fq}i_{fq} + \Psi_{\delta q}) = \frac{1}{p} \left(U_{fq} + r_{fq} i_{fq} + \frac{1}{p} x_{cq} i_{fq} \right); \\ \Psi_{kd} &= (x_{\sigma kd}i_{kd} + \Psi_{\delta d}) = -\frac{1}{p} r_{kd} i_{kd}; \\ \Psi_{kq} &= (x_{\sigma kq}i_{kq} + \Psi_{\delta q}) = -\frac{1}{p} r_{kq} i_{kq}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

На основе уравнений (4) и (5) получим структурную схему СД с емкостной компенсацией индуктивности поперечной обмотки двухосного возбуждения (рис. 1).

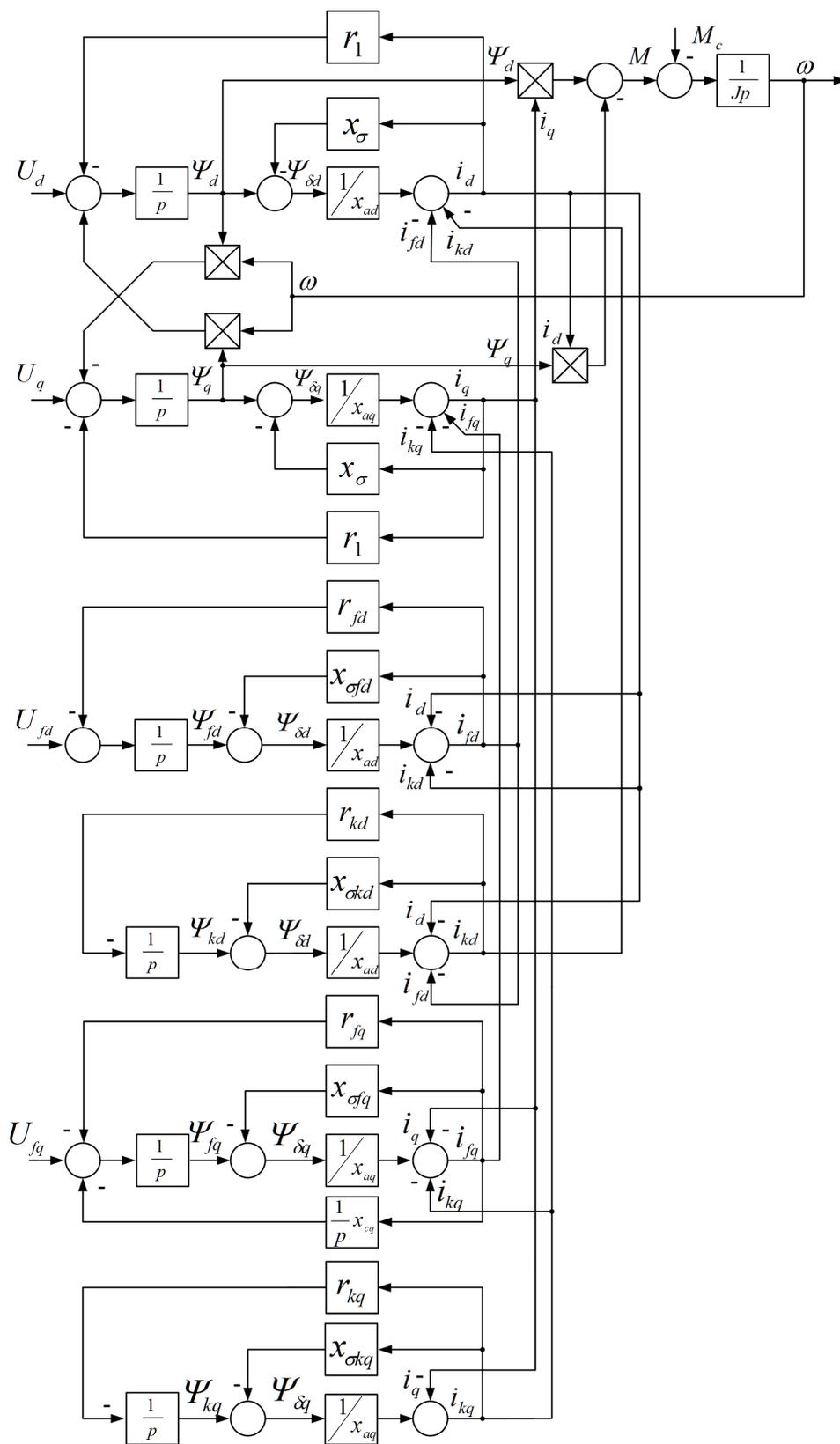
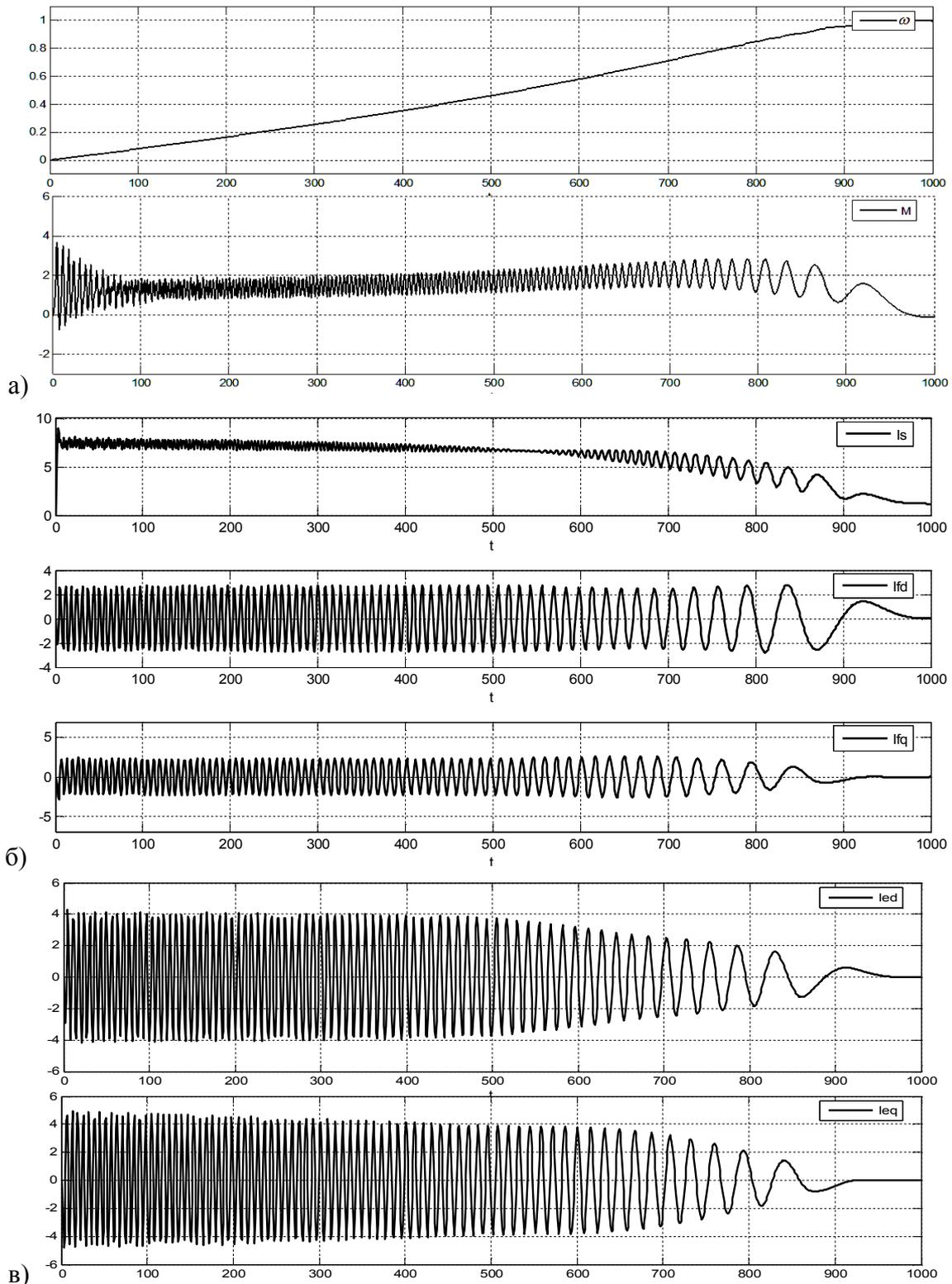


Рисунок 1 – Структурная схема СД с компенсированной поперечной обмоткой

Разработанная математическая модель позволяет исследовать режимы асинхронного пуска СД с двухосным возбуждением. Расчетные пусковые характеристики

СД с добавочным резистором $R_{fdл}=4R_{fd}$ в продольной оси и $R_{fqл}=20R_{fd}$ в поперечной при номинальном напряжении питания представлены на рис.2.



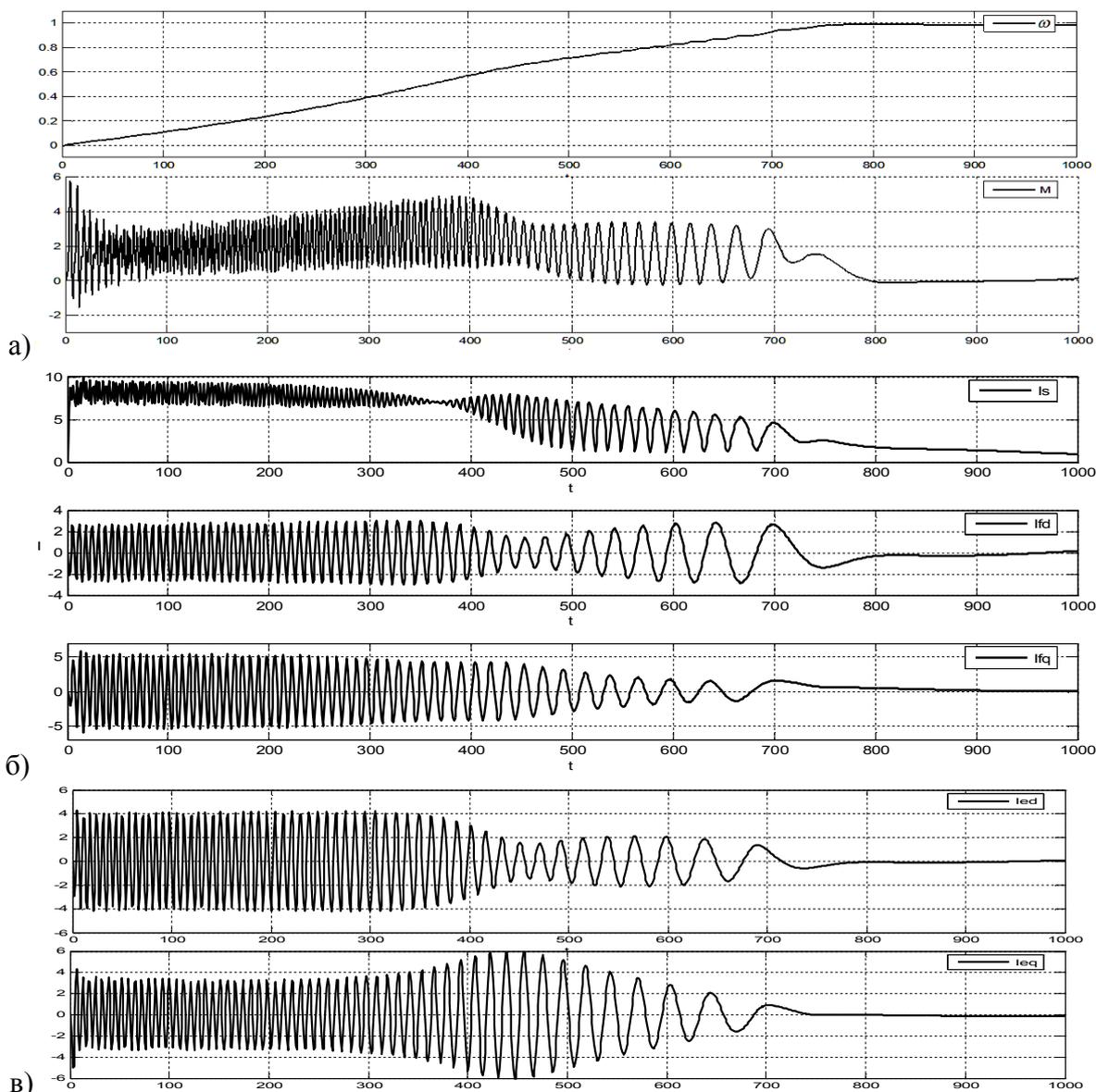
а) механические характеристики; б) токи статора и токи обмоток возбуждения;
в) токи демпферных контуров

Рисунок 2 – Пусковые характеристики СД двухосного возбуждения при резисторном пуске

На рисунках прийняті наступні позначення: ω – частота вращения ротора; M – електромагнітний момент двигателя; I_s – огибающая амплитуд тока статора ($I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$); I_{fd} и I_{fq} – токи продольной и поперечной обмоток соответственно; I_{kd} и I_{kq} – токи демпферных контуров продольной и поперечной осей соответственно; t – время в электрических секундах.

Анализ расчетных зависимостей (рис.2) показывает, что величина среднего асинхронного момента изменяется от 1,2 до 2 о.е. Огибающая амплитуд тока статора близка к 7,5 о.е. Ток в продольной обмотке возбуждения составляет 2 о.е., а в поперечной – 2,5 о.е. Токи демпферных контуров лежат в пределах 4-х о.е. Время пуска составило 1000 эл. с.

Расчетные зависимости пусковых характеристик СД для случая включения ЕНЭ в поперечную обмотку возбуждения приведены на рис.3.



а) механические характеристики; б) токи статора и токи обмоток возбуждения;
в) токи демпферных контуров

Рисунок 3 – Пусковые характеристики СД двухосного возбуждения с емкостной компенсацией поперечной обмотки возбуждения

Анализ расчетных зависимостей показывает, что величина среднего асинхронного момента двигателя превышает 2 о.е. практически на всем протяжении пуска, а локальные максимумы превышают отметку в 4 о.е. Огибающая амплитуд тока статора близка к 8 о.е.

Ток продольной обмотки возбуждения составляет 2,5 о.е., а поперечной - возрос до 5 о.е. Ток в продольном демпферном контуре достигает 4 о.е., а после прохождения полусинхронной скорости вращения падает до 2 о.е. Ток в поперечном демпферном контуре возрос с 4 о.е. в первой половине процесса пуска до 6 о.е. на его завершающем этапе. Время пуска двигателя составило 800 эл.с.

Сравнительный анализ расчетных зависимостей, приведенных на рис.2, 3, показывает, что емкостная компенсация индуктивности поперечной обмотки приводит к возрастанию величины среднего асинхронного момента на 35% при увеличении тока статора на 14%, а время пуска сократилось на 20%.

Выводы. Емкостная компенсация индуктивности поперечной обмотки возбуждения приводит к возрастанию среднего асинхронного момента СД на 35% и сокращению времени пуска на 20%. Токи поперечных контуров возрастают, однако их значения по условиям нагрева не превышают допустимый уровень. Амплитудные значения токов продольных контуров уменьшаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахматов М.Г. Синхронные машины [спец. курс: учеб. пособие для вузов] / М.Г.Ахматов. – М.: Высшая школа, 1984. – 135с.: ил.
2. Осин И.Л. Электрические машины: синхронные машины / И.Л.Осин, Ю.Г.Шакарян. – М.: Высшая школа, 1990. - 304с.: ил.
3. Пирматов Н.Б. Исследование работы синхронного двигателя с возбуждением по продольной и поперечной осям при ударной нагрузке / Н.Б.Пирматов, М.Г.Ахматов, И.К. Камалов // Электричество. – 2003. - №2. - С.64-65.
4. Носов К.Б. Средства и способы самозапуска электродвигателей / К.Б.Носов, Н.М.Дворак. – Кемерово: Кемеровское книжное изд-во, 1985. – 128 с.
5. Низимов В.Б. Применение накопителей энергии для асинхронного пуска синхронных двигателей / В.Б.Низимов // Науковий вісник НГА України. – 2000. – №1. – С.49-51.
6. Пивняк Г.Г. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных двигателей / Г.Г.Пивняк, В.И.Кириченко, В.А.Бородай // Технічна електродинаміка: тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». - К.: Національна академія наук України. – 2002. – Ч.2. – С.62-65.
7. Осипова С.В. Асинхронный пуск синхронного двигателя с максимальными входным и пусковым моментами / С.В.Осипова, А.И. аяшев // Изв. вузов. Энергетика. – 1974. – №8. – С.119-121.
8. Низимов В.Б. Влияние электрической емкости в контуре возбуждения на демпферную обмотку при асинхронном пуске синхронного двигателя / В.Б.Низимов, С.В.Колычев, Ю.И.Зинченко // Придніпровський науковий вісник: технічні науки. – 1998. – №73(140). – С.81-87.

Поступила в редколлегию 26.03.2012.

Днепродзержинский государственный технический университет

ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКОЙ

Введение. Задача асинхронного пуска мощных высоковольтных синхронных двигателей (СД) с непосредственным питанием от электросети не теряет своей актуальности в первую очередь для электроприводов механизмов со значительными моментами инерции и статического сопротивления (шаровые и стержневые мельницы, барабанные окомкователи, дробилки, скребковые конвейеры), а также в условиях питания двигателей от протяженных электрических сетей, что характерно для приводов механизмов буровых установок нефте- и газодобывающей промышленности и турбокомпрессоров газоперекачивающих станций.

Анализ способов и средств повышения вращающего момента СД в режиме асинхронного пуска [1...7] показывает, что наиболее распространенными из них являются использование специальных законов управления контуром возбуждения, его усложнение путем включения новых активных или пассивных элементов, изменение конструкции СД, применение расщепленных или дополнительных обмоток [8...9].

Наиболее эффективным из перечисленных способов и средств является включение емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) в контур возбуждения СД, поскольку это не требует серьезной доработки конструкции двигателя и позволяет в значительной степени повысить пусковой момент по сравнению с другими способами.

Существенным недостатком этого способа пуска является зависимость электромагнитного момента, развиваемого двигателем при пуске, от степени емкостной компенсации индуктивного сопротивления ОВ. Поскольку величина ЕНЭ обратно пропорциональна квадрату скольжения, то с уменьшением последнего емкостное сопротивление возрастает, что в итоге приводит фактически к разрыву контура возбуждения. Поэтому ЕНЭ выполняют многоступенчатыми с шунтированием на определенном этапе пуска. В идеальном случае емкость накопителя должна изменяться в функции скольжения, что возможно достичь применением емкостных стержней в структуре демпферной обмотки [10].

Постановка задачи. Задачей работы является исследование влияния компенсированной демпферной обмотки на пусковые характеристики синхронного двигателя.

Результаты работы. В режиме асинхронного пуска СД электромагнитный момент, создаваемый контурами ротора, пропорционален произведению ЭДС и тока ротора. Фазовый сдвиг между ЭДС, наводимой в обмотке возбуждения (ОВ), и током, протекающим в ней, близкий к 90 эл. град. В режиме асинхронного пуска СД между ЭДС и током стержней демпферной обмотки также имеется фазовый сдвиг, который, однако, меньше, чем в ОВ из-за большего активного сопротивления этой обмотки. При совпадении знаков ЭДС и тока создается двигательный момент, а при разноименных знаках – тормозной. Поэтому для увеличения момента от ОВ необходимо уменьшить фазовый сдвиг между ЭДС и током, что и достигается включением пускового резистора или емкостных накопителей энергии через контактные кольца ротора [11, 12].

Для емкостной компенсации индуктивного сопротивления демпферная обмотка может быть выполнена в виде емкостных стержней, соединенных между собой и уло-

женных в пазы полюсов ротора синхронного двигателя [10]. Причем каждый из емкостных стержней состоит из плоских шин, разделенных слоем композитного диэлектрика переменной толщины, и изолирован пазовой изоляцией.

В начальный момент пуска из-за явления вытеснения тока в шинах емкостных стержней их эффективная площадь минимальна, что и определяет начальное значение емкости накопителя энергии. По мере разгона СД падает частота тока в шинах емкостных стержней, что приводит к увеличению эффективной площади и величины емкости накопителя энергии.

Для исследования влияния компенсированной демпферной обмотки на пусковые характеристики СД составим систему дифференциальных уравнений электрического и механического равновесий. С учетом общепринятых допущений [12] уравнения составляющих напряжения электрических контуров СД по продольной d и поперечной q осям в системе относительных единиц имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= r_1 i_d + p \Psi_d - \Psi_q \omega; \\ U_q &= r_1 i_q + p \Psi_q + \Psi_d \omega; \\ U_f &= r_f (K + 1) i_f + p \Psi_f; \\ 0 &= r_{kd} i_{kd} + \frac{1}{p} x_{cd} i_{kd} + p \Psi_{kd}; \\ 0 &= r_{kq} i_{kq} + \frac{1}{p} x_{cq} i_{kq} + p \Psi_{kq}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U_d и U_q – напряжения продольного и поперечного контуров статора соответственно; U_f – напряжение контура возбуждения; x_{cd} и x_{cq} – реактивные сопротивления ЕНЭ в продольном и поперечном контурах пусковой обмотки соответственно; K – кратность пускового резистора.

Запишем выражения для потокосцеплений контуров СД:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= x_{\sigma} i_d + x_{ad} (i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma} i_d + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_q &= x_{\sigma} i_q + x_{aq} (i_q + i_{kq}) = x_{\sigma} i_q + \Psi_{\delta q}; \\ \Psi_f &= x_{\sigma f} i_f + x_{ad} (i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma f} i_f + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_{kd} &= x_{\sigma kd} i_{kd} + x_{ad} (i_d + i_f + i_{kd}) = x_{\sigma kd} i_{kd} + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_{kq} &= x_{\sigma kq} i_{kq} + x_{aq} (i_q + i_{kq}) = x_{\sigma kq} i_{kq} + \Psi_{\delta q}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Уравнение движения ротора:

$$\Psi_d i_q - \Psi_q i_d - M_c = J p \omega. \quad (3)$$

С учетом уравнений (1) перепишем выражения для потокосцеплений контуров (2) в форме, более удобной для моделирования:

$$\Psi_d = (x_\sigma i_d + \Psi_{\delta d}) = \frac{1}{p} (U_d + \Psi_q \omega - r_1 i_d);$$

$$\Psi_q = (x_\sigma i_q + \Psi_{\delta q}) = \frac{1}{p} (U_q - \Psi_d \omega - r_1 i_q);$$

$$\Psi_f = (x_{\sigma f} i_f + \Psi_{\delta d}) = \frac{1}{p} (U_f + r_f [K + 1] i_f); \tag{4}$$

$$\Psi_{kd} = (x_{\sigma kd} i_{kd} + \Psi_{\delta d}) = -\frac{1}{p} \left(r_{kd} i_{kd} + \frac{1}{p} x_{cd} i_{kd} \right);$$

$$\Psi_{kq} = (x_{\sigma kq} i_{kq} + \Psi_{\delta q}) = -\frac{1}{p} \left(r_{kq} i_{kq} + \frac{1}{p} x_{cq} i_{kq} \right).$$

На основе уравнений (4) получим структурную схему СД с компенсированной демпферной обмоткой (рис.1).

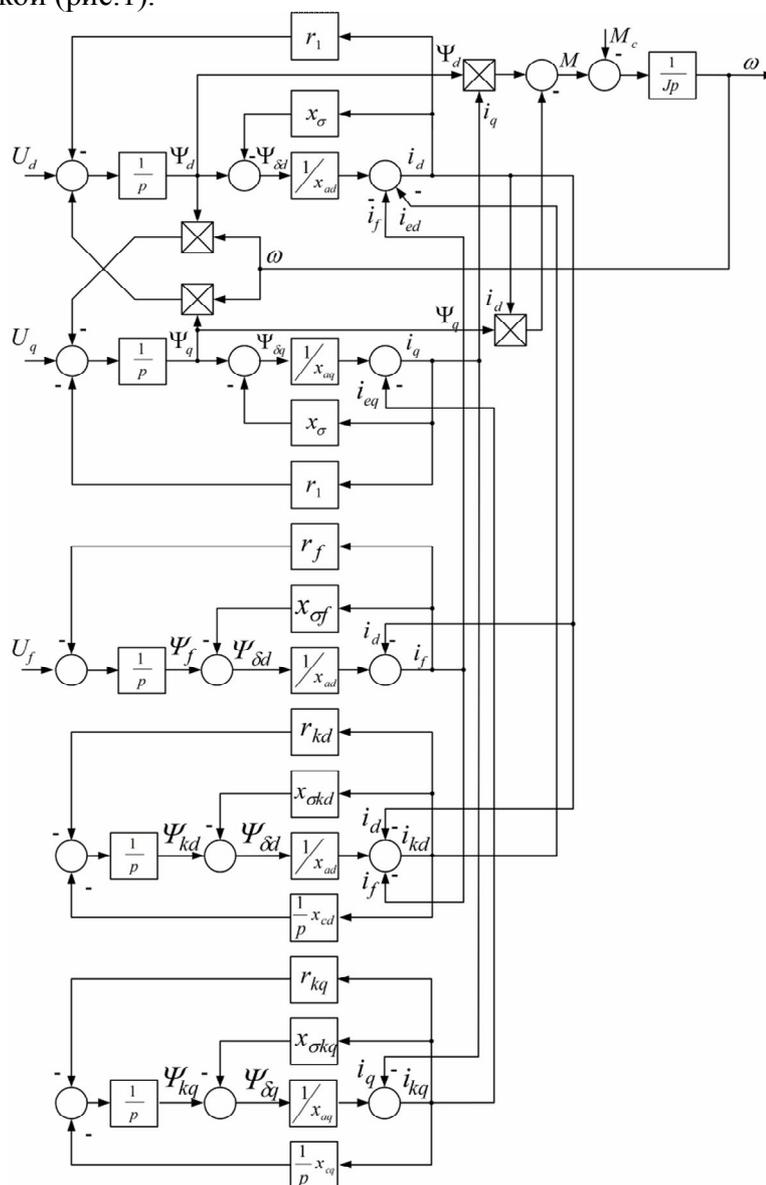


Рисунок 1 – Структурная схема СД с компенсированной демпферной обмоткой

Расчетные характеристики асинхронного пуска СД выполнены для двигателя СДС3-2000-100 со стандартной демпферной обмоткой и для этого же двигателя с компенсированной демпферной обмоткой. Параметры предложенной демпферной обмотки, как и стандартной, по продольной и поперечной оси различны из-за явнополюсности ротора СД.

Расчетные зависимости процесса пуска СД со стандартной демпферной обмоткой, полученные в результате моделирования, приведены на рис.2.

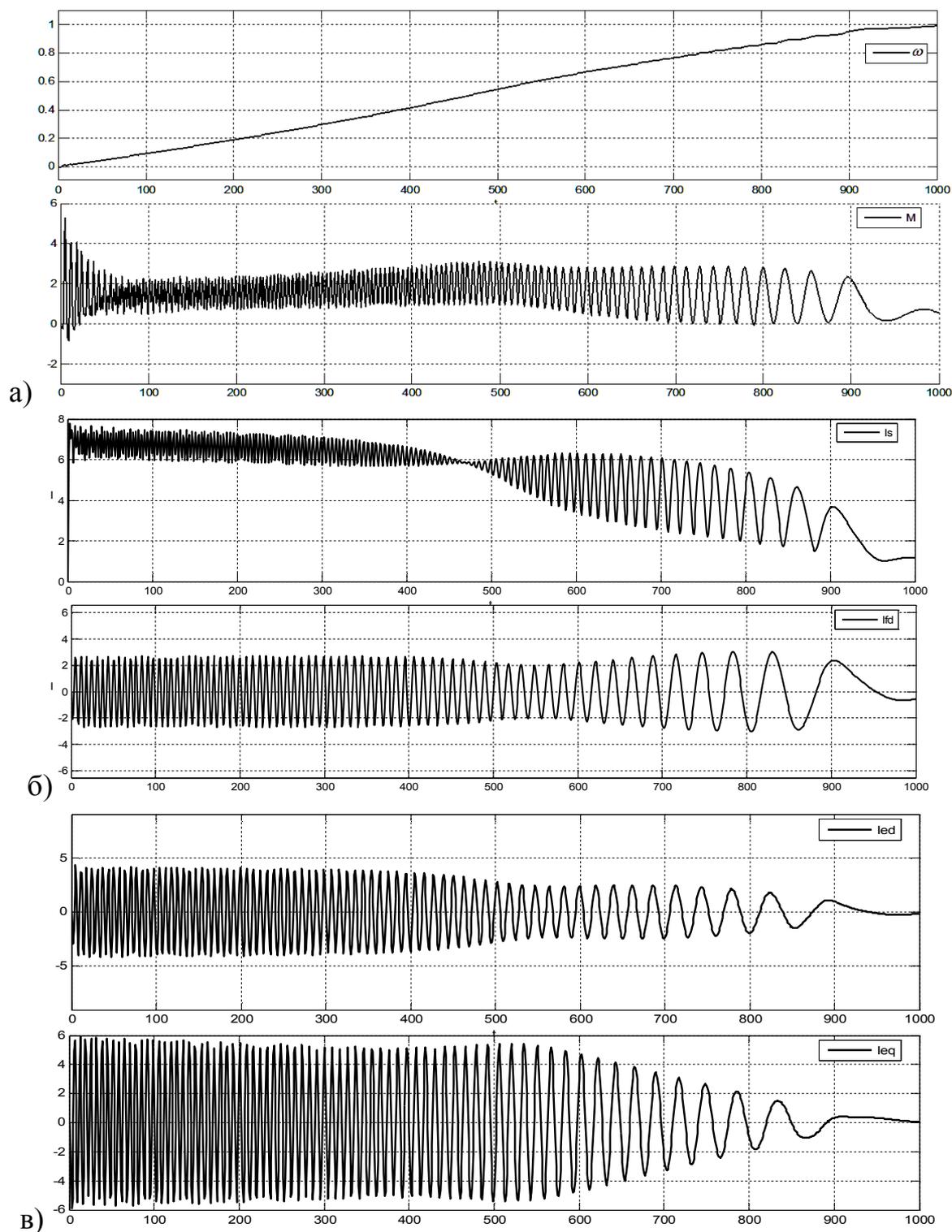


Рисунок 2 – Резисторный пуск СД с четырехкратным добавочным сопротивлением

Из анализа расчетных зависимостей следует, что среднее значение электромагнитного момента изменяется от 1,2 о.е. до 2 о.е. при семикратной величине огибающих амплитуд тока статора. Время пуска СД составило 1000 эл. с. Ток в обмотке возбуждения составляет 2 о.е., ток в продольном демпферном контуре не превышает значения 5 о.е., в поперечном – не более 6 о.е.

Расчетные зависимости прямого асинхронного пуска СД с компенсированной демпферной обмоткой приведены на рис.3.

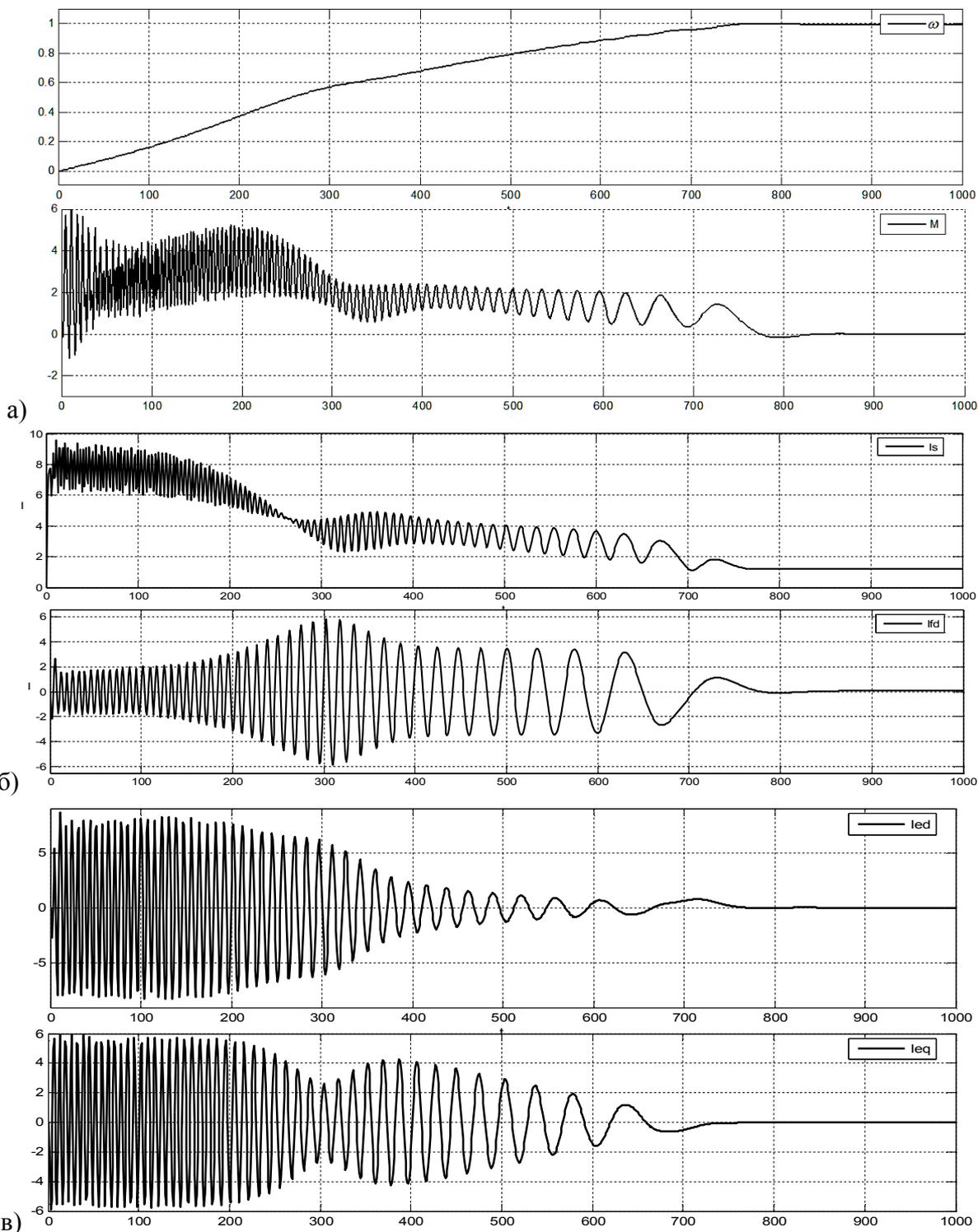


Рисунок 3 – Емкостная компенсация продольного и поперечного демпферных контуров $R=4R_f$, X_{kcd} падает от X_{ad} до 0 за 700с, X_{kcq} падает от X_{aq} до 0 за 400с

Из их анализа следует, что среднее значение электромагнитного момента лежит в пределах от 2 о.е. с локальным максимумом до 5 о.е. в области, близкой к полусинхронной скорости вращения ротора. Огибающая амплитуд тока статора близка к 8 о.е. Происходит также существенное перераспределение токов в контурах ротора с возрастанием тока ОВ от 2 о.е. до 6 о.е. Токи в демпферных контурах близки к 6 о.е. с различным временем затухания. Время пуска СД с компенсированными демпферными контурами составило 750 эл. с., что на 25% меньше по сравнению с пуском СД со стандартной обмоткой.

Выводы. Емкостная компенсация индуктивности демпферной обмотки позволяет увеличить среднее значение электромагнитного момента СД и сократить время его пуска при незначительном возрастании токов контуров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов К.Б. Средства и способы самозапуска электродвигателей / Носов К.Б., Дворак Н.М. - Кемерово: Кемеровское книжное изд-во, 1985. – 128 с.
2. Соколов Н.И. Ресинхронизация синхронных двигателей многократной форсировкой возбуждения / Н.И.Соколов, И.А.Сумцов, А.М.Кременецкий // Электричество. - 1975. – №5. – С.43-48.
3. Бабурин В.Б. О повышении продольного электромагнитного момента машин переменного тока в асинхронном режиме / В.Б.Бабурин, И.А.Сумцов // Труды ВНИИЭ. – М.: ВНИИЭ. – 1979. – Вып. 57. – С.65-71.
4. Осипова С.В. Асинхронный пуск синхронного двигателя с максимальными входным и пусковым моментами / С.В.Осипова, А.И.Каяшев // Изв. вузов. Энергетика. – 1974. – №8. – С.119-121.
5. Абрамович Б.Н. Система возбуждения с двухсторонним преобразователем в цепи обмотки возбуждения / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Бирюков, В.М.Вадатурский // Электротехника. – 1971. – №12. – С.7-10.
6. Низимов В.Б. Применение накопителей энергии для асинхронного пуска синхронных двигателей / В.Б.Низимов // Науковий вісник НГА України. – 2000. – №1. – С.49-51.
7. Пивняк Г.Г. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных двигателей / Г.Г.Пивняк, В.И.Кириченко, В.А.Бородай // Технічна електродинаміка: тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». - К.: Національна академія наук України. – 2002. – Ч.2. – С.62-65.
8. Ахматов М.Г. Синхронные машины. [спец. курс: учеб. пособие для втузов] / М.Г.Ахматов. – М.: Высшая школа, 1984. – 135с.: ил.
9. Пирматов Н.Б. Исследование работы синхронного двигателя с возбуждением по продольной и поперечной осям при ударной нагрузке / Н.Б.Пирматов, М.Г.Ахматов, И.К.Камалов // Электричество. – 2003. – №2. – С.64-65.
10. А.С. 1377992 СССР, МКИ Н 02 Н 1/50. Электропривод / Низимов В.Б., Клименко Ю.М., Колычев С.В. (СССР). – № 3938462/24-07; заявл. 07.08.86; опубл. 29.08.88, Бюл. №8.
11. Низимов В.Б. Влияние электрической емкости в контуре возбуждения на демпферную обмотку при асинхронном пуске синхронного двигателя / В.Б.Низимов, С.В.Колычев, Ю.И.Зинченко // Придніпровський науковий вісник: технічні науки. – 1998. – №73(140). – С.81-87.
12. Моделирование пусковых режимов СД в пакете MATLAB / В.Б.Низимов, С.В.Колычев, А.Ю.Великий, В.И.Хоменко // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2009. – С.117-123.

Поступила в редколлегию 26.03.2012.

Днепродзержинский государственный технический университет

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА СИСТЕМЫ ПЯТОГО ПОРЯДКА, ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ПРИ ПОДВИЖНЫХ ГРАНИЦАХ ОБЛАСТИ

Введение. Для позиционных электроприводов с упругой связью метод N-i переключений позволяет выполнить синтез релейных систем оптимального управления. Математический аппарат метода устанавливает однозначную аналитическую взаимосвязь настроек каскада регуляторов с параметрами расчётной траектории оптимального по быстродействию переходного процесса, протекающего при отсутствии ограничений фазовых координат [1]. Сходимость расчётной переходной траектории, на которой лежат точки единичных переключений, служит предпосылкой к устойчивости синтезируемых данным методом регуляторов, но не является достаточным условием существования их скользящих режимов, поскольку нелинейная переходная траектория не принадлежит целиком гиперплоскостям скольжения, а только пересекает их. Данное обстоятельство делает актуальной задачу проверки устойчивости скользящего режима релейных регуляторов систем, оптимизированных по быстродействию.

Постановка задачи. Дифференциальные уравнения динамики позиционной двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} p\Phi &= \Omega; \\ p\Omega &= \frac{M_y - M_c}{J}; \\ pM_y &= C_{ж}(k_p \omega_{дв} - \Omega); \\ p\omega_{дв} &= \frac{M_{дв} - M_y k_p}{J_{дв}}; \\ pM_{дв} &= c \cdot \frac{u - R \cdot M_{дв}/c - c \cdot \omega_{дв}}{L} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\Phi, \Omega, \omega, M_y, M_{дв}$ – соответственно угловые положение и скорость исполнительного вала, скорость вала двигателя, упругий момент и момент двигателя; u – напряжение преобразователя; $k_p, c, R, L, J, J_{дв}, C_{ж}$ – параметры ЭМС; $p = d/dt$.

Первая производная положения исполнительного вала Φ (регулируемой координаты данной ЭМС) определяется непосредственно координатой Ω . Вместе с тем, старшие производные регулируемой координаты, порядком со второго по пятый включительно, пропорциональны соответственно углу закручивания упругого элемента, угловым скорости, ускорению и рывку вала двигателя относительно исполнительного вала. На этом основании обозначим старшие производные выходной переменной Φ символами $\varphi, \omega, \varepsilon, a$, принятыми в работах [1-3] для координат позиционного привода. Введение для вектора канонических координат ЭМС (1) обозначения

$$\left(\Phi, p\Phi, p^2\Phi, p^3\Phi, p^4\Phi \right) = \left(\Phi, \Omega, \varphi, \omega, \varepsilon \right) \quad (2)$$

позволит в неизменном виде заимствовать результаты алгоритмического синтеза из работ [1-3] и представить описание регуляторов системы управления объектом (1)

$$\left. \begin{aligned} u_{R\Phi} = \Omega^* &= -\Omega_{\max} \cdot \text{sign}\left(\Phi - \Phi^* + K_{\Phi\Omega} \cdot \Omega + K_{\Phi\varphi} \cdot \varphi + K_{\Phi\omega} \cdot \omega + K_{\Phi\varepsilon} \cdot \varepsilon\right) \\ u_{R\Omega} = \varphi^* &= -\varphi_{\max} \cdot \text{sign}\left(\Omega - \Omega^* + K_{\Omega\varphi} \cdot \varphi + K_{\Omega\omega} \cdot \omega + K_{\Omega\varepsilon} \cdot \varepsilon\right) \\ u_{R\varphi} = \omega^* &= -\omega_{\max} \cdot \text{sign}\left(\varphi - \varphi^* + K_{\varphi\omega} \cdot \omega + K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon\right) \\ u_{R\omega} = \varepsilon^* &= -\varepsilon_{\max} \cdot \text{sign}\left(\omega - \omega^* + K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon\right) \\ u_{R\varepsilon} = a^* &= -a_{\max} \cdot \text{sign}\left(\varepsilon - \varepsilon^*\right) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где u_{Ri} – сигнал i -го (считая от входа) регулятора; символом «*» отмечены заданные значения координат, как внешнее, так и формируемые регуляторами; индексами «max» отмечены уровни ограничений координат.

Внутренние контуры системы подчинённого регулирования (СПР), образованные каскадом регуляторов $R_\varphi, R_\omega, R_\varepsilon$ из состава системы (3) и частью объекта управления (1), представляют собой подсистему третьего порядка, идентичную позиционному электроприводу. Их параметры были синтезированы в принятой системе обозначений (2) в работе [3]. Это позволило выполнить анализ устойчивости данной подсистемы путём определения корней характеристических уравнений её контуров регулирования как функций расчётной длительности интервала стабилизации рывка T_{sa} .

Задачей настоящей работы является определение условий устойчивости контуров четвёртого и пятого порядков релейной системы подчинённого регулирования положения двухмассовой ЭМС.

Результаты работы. Найденные в [2] параметры регулятора скорости исполнительного вала R_Ω обеспечивают отработку оптимальной по быстродействию траектории, локализованной в области пространства состояний с подвижными границами, то есть при отсутствии наперёд заданных ограничений координат. При этом уровни ограничения канонических координат, заложенные в настройках каскада регуляторов (3), равны их максимальным значениям, достигаемым на расчётной траектории (рис.1), и являются функциями воспроизводимого скачка задающего воздействия. Для такого случая коэффициенты обратных связей R_Ω выражаются через расчётную длительность интервалов стабилизации рывка T_{sa} следующим образом:

$$K_{\Omega\varphi} = 2T_{sa}, \quad K_{\Omega\omega} = \frac{17}{12}T_{sa}^2, \quad K_{\Omega\varepsilon} = \frac{5}{12}T_{sa}^3. \quad (4)$$

Регулятор R_Ω образует с частью объекта управления, описываемой уравнениями 2-5 системы (1), подсистему четвертого порядка. Однако, с учетом понижения на единицу порядка релейных систем, линеаризуемых в скользящем режиме, проверка устойчивости контура на основе R_Ω сводится к анализу характеристического уравнения третьего порядка вида

$$1 + K_{\Omega\varphi} \cdot p + K_{\Omega\omega} \cdot p^2 + K_{\Omega\varepsilon} \cdot p^3 = 0. \quad (5)$$

Аналитическая связь корней кубического уравнения с его коэффициентами является достаточно сложной, поэтому проверку устойчивости идеального скользящего

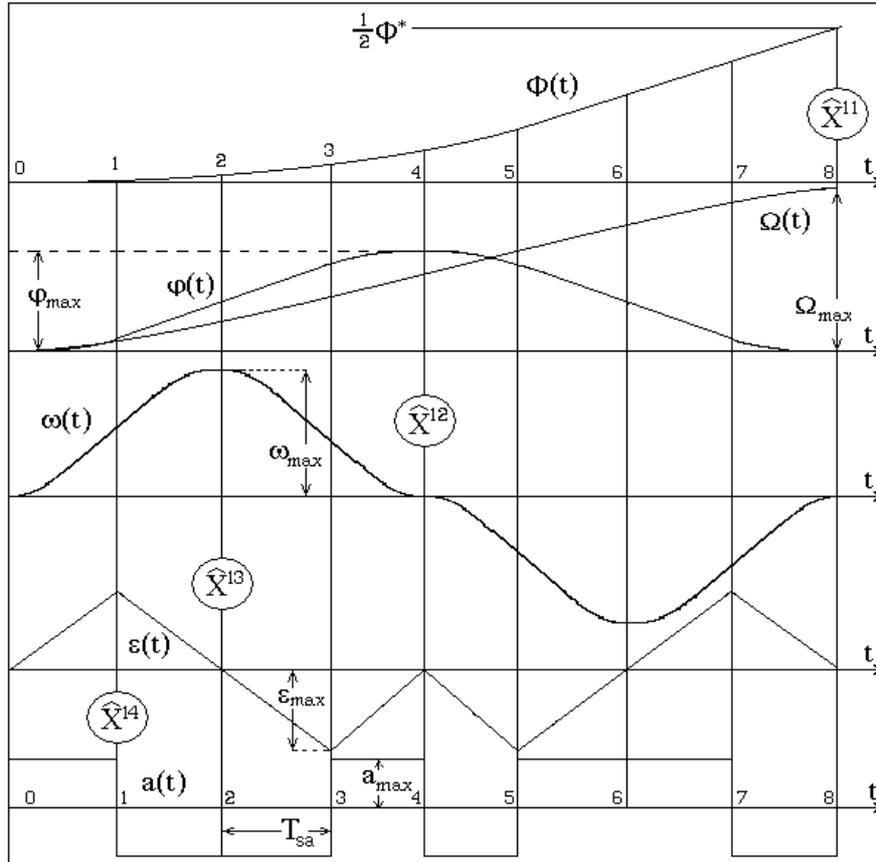


Рисунок 1 – Расчётные траектории при подвижных границах области

режима R_Ω целесообразно выполнить с помощью косвенного алгебраического критерия Рауса-Гурвица [4], который для уравнения (5) дает систему неравенств:

$$K_{\Omega\omega} > 0; \begin{vmatrix} K_{\Omega\omega} & 1 \\ K_{\Omega\varepsilon} & K_{\Omega\varphi} \end{vmatrix} > 0; \begin{vmatrix} K_{\Omega\omega} & 1 & 0 \\ K_{\Omega\varepsilon} & K_{\Omega\varphi} & 0 \\ 0 & K_{\Omega\omega} & 1 \end{vmatrix} > 0. \quad (6)$$

Положительные значения всех коэффициентов обратных связей вытекают из вида выражений (4), следовательно, условие устойчивости (6) сводится к следующему неравенству:

$$K_{\Omega\omega} K_{\Omega\varphi} - K_{\Omega\varepsilon} > 0. \quad (7)$$

Подстановка в неравенство (7) коэффициентов (4)

$$2T_{sa} \cdot \frac{17}{12} T_{sa}^2 - \frac{5}{12} T_{sa}^3 > 0$$

позволяет выполнить упрощение, результат которого имеет вид

$$2 \frac{5}{12} T_{sa}^3 > 0,$$

что свидетельствует об устойчивости синтезированной методом N-i переключений подсистемы четвертого порядка, поскольку длительности интервалов T_{sa} положительны для всех физически реализуемых траекторий.

Полученные в [1] выражения параметров регулятора положения исполнительного вала R_{Φ} , обеспечивающих оптимальную по быстродействию обработку траектории при подвижных границах области, имеют вид:

$$K_{\Phi\Omega} = 4T_{sa}, \quad K_{\Phi\varphi} = 5\frac{3}{4}T_{sa}^2, \quad K_{\Phi\omega} = 3\frac{2}{3}T_{sa}^3, \quad K_{\Phi\varepsilon} = 1\frac{1}{30}T_{sa}^4. \quad (8)$$

Динамика релейной системы пятого порядка в скользящем режиме характеризуется уравнением четвертого порядка вида:

$$1 + K_{\Phi\Omega} \cdot p + K_{\Phi\varphi} \cdot p^2 + K_{\Phi\omega} \cdot p^3 + K_{\Phi\varepsilon} \cdot p^4 = 0. \quad (9)$$

Характеристические полиномы четвёртого и выше порядков не имеют аналитического решения, поэтому с целью проверки устойчивости скользящего режима регулятора R_{Φ} системы (3) составим для уравнения (9) систему неравенств с использованием определителя Гурвица и его диагональных миноров:

$$K_{\Phi\omega} > 0; \begin{vmatrix} K_{\Phi\omega} & K_{\Phi\Omega} \\ K_{\Phi\varepsilon} & K_{\Phi\varphi} \end{vmatrix} > 0; \begin{vmatrix} K_{\Phi\omega} & K_{\Phi\Omega} & 0 \\ K_{\Phi\varepsilon} & K_{\Phi\varphi} & 1 \\ 0 & K_{\Phi\omega} & K_{\Phi\Omega} \end{vmatrix} > 0; \begin{vmatrix} K_{\Phi\omega} & K_{\Phi\Omega} & 0 & 0 \\ K_{\Phi\varepsilon} & K_{\Phi\varphi} & 1 & 0 \\ 0 & K_{\Phi\omega} & K_{\Phi\Omega} & 0 \\ 0 & K_{\Phi\varepsilon} & K_{\Phi\varphi} & 1 \end{vmatrix} > 0. \quad (10)$$

Все коэффициенты обратных связей положительны согласно (8), следовательно, условие устойчивости (10) сводится к положительности предпоследнего минора определителя Гурвица [4], что приводит к неравенству:

$$K_{\Phi\Omega}(K_{\Phi\omega}K_{\Phi\varphi} - K_{\Phi\varepsilon}K_{\Phi\Omega}) - K_{\Phi\omega}^2 > 0. \quad (11)$$

После подстановки коэффициентов (8) неравенство (11) примет вид

$$4T_{sa} \left(3\frac{2}{3}T_{sa}^3 \cdot 5\frac{3}{4}T_{sa}^2 - 1\frac{1}{30}T_{sa}^4 \cdot 4T_{sa} \right) - \left(\frac{11}{3} \right)^2 \cdot T_{sa}^6 > 0.$$

Результат его упрощения

$$54\frac{16}{45}T_{sa}^6 > 0$$

свидетельствует об устойчивости идеального скользящего режима синтезированной методом N-i переключений релейной системы пятого порядка.

Следует отметить, что длительность интервала T_{sa} расчётной траектории (рис.1) согласно [1-3] является функцией воспроизводимого системой скачка задающего воздействия, то есть полученный результат распространяется на все возможные значения параметров оптимальных регуляторов при настройке их на обработку траекторий переходного процесса, протекающего без ограничений промежуточных координат электро-механической системы.

Выводы. В настоящей работе доказана устойчивость скользящего режима систем, оптимизированных по быстродействию методом N-i переключений. Это позволяет исключить из процедуры самонастройки адаптивных систем, построенных на основе данного метода, какие-либо операции численной проверки устойчивости регуляторов

при расчёте их параметров. Представленные исследования выполнены для контуров регулирования положения и скорости электропривода с упругой связью. Однако, подвергнутые анализу уравнения скольжения связывают канонические координаты релейной системы, что позволяет распространить положительный результат проверки устойчивости на контуры четвертого и пятого порядка с любой структурой объектов управления, которая допускает синтез данным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовой А.В. Оптимизация по быстродействию режима малых перемещений двухмассовой электромеханической системы методом N-i переключений на подвижных границах области / А.В.Садовой, А.Л.Дерец // Электротехнические и компьютерные системы: науч.-техн. журнал Одесского национального политехнического университета. – К.: Техника. – 2011. – С.89-91.
2. Садовой А.В. Синтез методом N-i переключений релейной системы четвертого порядка без внутренних ограничений / А.В.Садовой, А.Л.Дерец // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного техн. ун-та (технические науки). – Днепродзержинск. – 2008. – Выпуск 1(9). – С.167-171.
3. Садовой А.В. Оптимизация по быстродействию методом N-i переключений режимов малых перемещений позиционного электропривода / А.В.Садовой, А.Л.Дерец // Вестник КГПУ. – Кременчуг. – 2007. – Выпуск 3/2007 (44). – С.15-17.
4. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Юревич Е.И. – Л.: Энергия, 1969. – 375с.:ил.

Поступила в редколлегию 19.03.2012.

УДК 621. 316. 72 /088.8

КАРАЧУНСКИЙ П.Ш., к.т.н, доцент
ЧЕРНОИВАН В.П., к.т.н, доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

БЕСКОНТАКТНЫЕ АВТОМАТЫ ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

Введение. В современных синхронных электроприводах, оборудованных электромашинными или тиристорными системами возбуждения, автоматическое гашение поля цепи возбуждения (АГП) чаще всего реализуется путем введения в строго определенное время в цепь индуктора разрядного резистора.

Достаточно быстрый физический износ электромашинных возбудителей и присутствующие им серьезные недостатки, а также низкая эффективность указанного метода гашения поля обусловили широкое внедрение тиристорных систем возбуждения с соответствующими устройствами АГП. Распространенная система возбуждения с инвертированием тиристорного возбудителя в процессе гашения поля требует усложнения силовой схемы и цепей управления преобразователем. Кроме того, в режиме короткого замыкания при глубокой посадке или полном исчезновении напряжения указанные системы возбуждения не обеспечивают режим форсированного гашения поля из-за отсутствия коммутирующей э.д.с. или значительного снижения тока тиристорного возбудителя. Быстродействие таких систем ограничивается периодическим или линейным характером изменения тока в контуре гашения поля.

Постановка задачи. Задачей данной работы является повышение быстродействия системы гашения магнитного поля синхронной машины за счет обменных энергопроцессов между э.д.с. обмотки возбуждения и конденсатором АГП.

Результаты работы. Свободным от недостатков известных систем АГП является предлагаемая система разработанного бесконтактного автомата гашения поля (БАГП) с емкостным прерыванием тока тиристорного возбудителя. Такой автомат позволяет реализовать аperiodический, линейный или колебательный процесс изменения тока в контуре гашения. Один из вариантов тиристорной системы возбуждения синхронного двигателя с БАГП представлен на рис.1. Пусковые режимы синхронного двигателя MS обеспечивает пускозащитная цепь, состоящая из разрядного резистора R_2 , пуско-защитного диода VD1 и тиристора VS2, управление которым производится в функции э.д.с. скольжения ротора через диод VD2 и группу стабилитронов VD6.

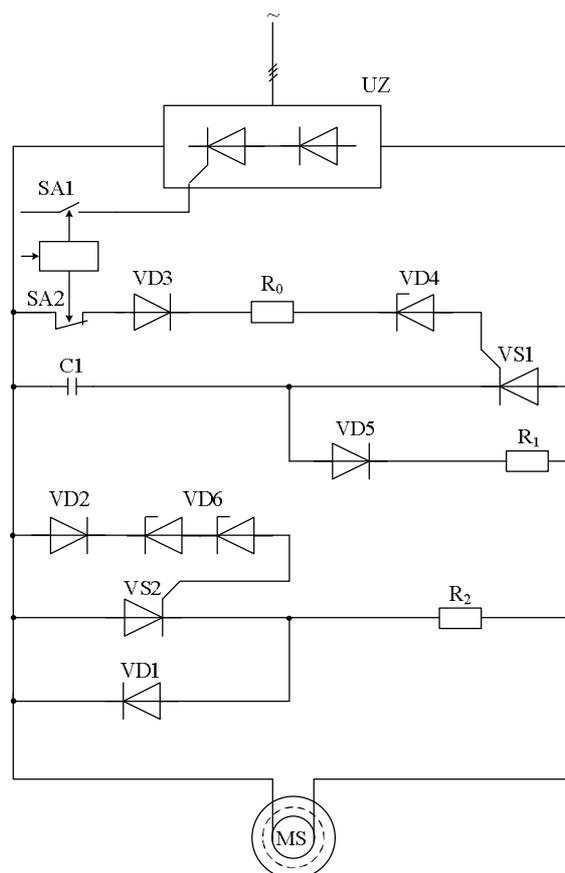


Рисунок 1 – Схема синхронного двигателя с автоматом гашения поля

Режим форсированного гашения поля возбуждения двигателя обеспечивает бесконтактный автомат, в состав которого входят коммутирующий конденсатор $C1$ и гасящий тиристор $VS1$, управление которым производится от предварительно заряженного конденсатора $C1$ через ключ $SA2$ и токоограничивающую цепочку: стабилитрон $VD4$, диод $VD3$, резистор R_0 . Зарядный диод $VD5$ и токоограничивающий резистор R_1 обеспечивают предварительный заряд коммутирующего конденсатора напряжением необходимой величины и полярности при асинхронном пуске машин и при ее синхронизации от тиристорного возбудителя UZ . Блок управления гасящим тиристором (БУГТ) кроме ключа $SA2$ управляет еще ключом $SA1$, который снимает импульсы управления с UZ .

В режиме форсированного гашения поля по команде, поступающей на блоке управления гасящим тиристором (БУГТ), снимается управление с UZ , а ключом $SA2$ включается гасящий тиристор $VS1$. При включении $VS1$ встречным напряжением коммутирующего конденсатора запирается тиристорный возбудитель. Одновременно про-

исходит колебательный разряд конденсатора на обмотку возбуждения машины, что приводит к форсированному снижению тока в контур гашения. Перезаряженный конденсатор положительным потенциалом запирает VS1 и разряжается через VD5 и R₁ на обмотку возбуждения. Распределение тока по контурам и характер переходного процесса (апериодический или колебательный) зависит от параметров схемы.

Экспериментальные исследования режимов работы БАГП проводились на физической модели электропривода (рис.1) с синхронной машиной.

В общем случае принимаемые допущения позволяют описать процесс при помощи линейных дифференциальных уравнений. Расчетная схема процесса гашения поля при колебательном режиме представлена на рис.2. Для этой схемы исходное уравнение цепи на интервале проводимости тиристора VS1 имеет вид:

$$L_f \frac{di_f}{dt} + i_f R_f + \frac{1}{C_1} \int i_f dt = U_0, \quad (1)$$

где L_f; R_f – индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения, U₀ – начальное напряжение конденсатора.

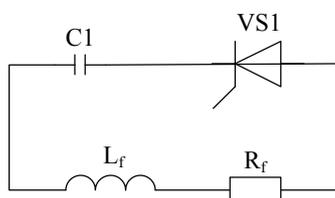


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса гашения поля

Дифференциальное уравнение для рассматриваемого интервала времени с учетом начальных условий в операторной форме может быть представлено в следующей форме:

$$L_f \cdot p \cdot I(p) - L_f \cdot I_0 + I(p) \cdot R_f + \frac{1}{C_p} \cdot I(p) = \frac{U_0}{p}, \quad (2)$$

где I₀ – ток в обмотке возбуждения до начала процесса гашения поля.

После преобразования уравнение в операторной форме принимает вид

$$I(p) \cdot (p^2 + 2\beta p + \omega_0^2) = \frac{U_0}{L_f} + I_0 \cdot p, \quad (3)$$

где $\beta = \frac{R_f}{2L_f}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_f \cdot C_1}}$.

Операторный ток определяется выражением

$$I(p) = \frac{I_0 \left(\frac{U_0}{I_0 \cdot L_f} + p \right)}{p^2 + 2\beta p + \omega_0^2}. \quad (4)$$

При комплексно-сопряженных корнях характеристического уравнения оригинал тока определяется выражением

$$I_f = \frac{I}{\sigma} \sqrt{\left(\frac{U_0}{I_0 \cdot L_f} - \beta \right)^2 + \sigma^2} \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\sigma t + \varphi), \quad (5)$$

где $\sigma = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$; $\varphi = \arctg \frac{\sigma}{\frac{U_0}{L_f \cdot I_0} - \beta}$.

Напряжение обмотки возбуждения

$$U_f = L_f \frac{di_f}{dt} + i_f R_f. \tag{6}$$

С учетом выражения для оригинала тока имеем

$$U_f = \frac{L_f \cdot I_0 \cdot \omega_0}{\sigma} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_0}{I_0 \cdot L_f} - \beta\right)^2 + \sigma^2} \cdot \sin(\sigma t + \varphi + \Psi), \tag{7}$$

где $\Psi = \arctg \frac{\sigma}{\beta}$.

При достижении током i_f нулевого значения тиристор VS1 запирается, а перезаряд конденсатора происходит через диод VD5 (рис.3).

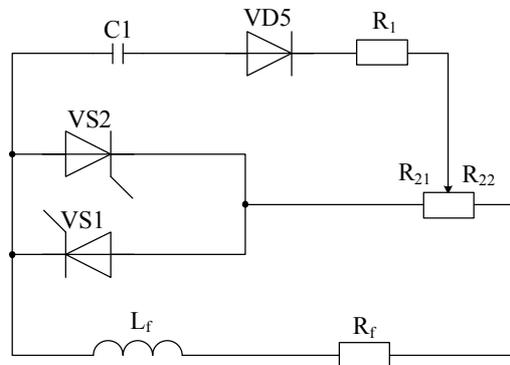


Рисунок 3 – Схема перезаряда конденсатора

Для этого интервала времени переходный процесс описывается уравнением

$$L_f \frac{di_f}{dt} + (R_f + R) i_f + \frac{1}{C_1} \int i_f dt = U_c(t_0), \tag{10}$$

где $R=R_1+R_{22}$ – сопротивление контура; $U_c(t_0)$ –напряжение на конденсаторе после перезаряда.

В операторной форме уравнение принимает вид

$$L_f \cdot p \cdot I(p) + (R_f + R) I(p) + \frac{I(p)}{C_1 \cdot p} = \frac{U_c(t_0)}{p}. \tag{11}$$

Вводя обозначения $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_f \cdot C_1}}$ и $\gamma = \frac{R+R_f}{2L_f}$, получим следующее решение

при комплексно-сопряженных корнях характеристического уравнения:

$$i_f = \frac{U_c(t_0)}{L_f \cdot \rho} \cdot e^{-\gamma t} \cdot \sin \rho t, \tag{12}$$

где $\rho = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$.

Выводы. Опытные-промышленные испытания БАПП были проведены на синхронном двигателе СДСЗ 2000-100 шаровой мельницы 1А тракта топливоприготовления Криворожской ГРЭС-2 с номинальными данными: мощность 2000 кВт, напряжение и ток статора 6000 В, 229 А, ток ротора 210 А, напряжение ротора 188 В. Тиристорный возбудитель машины – трехфазный мостовой, несимметричный, согласующий трансформатор типа ТСЗ 50/05 мощностью 50 кВА.

Параметры бесконтактного автомата гашения поля:	
коммутирующий конденсатор	КМ2-0,66
емкость одного элемента, мкФ	200
число элементов, шт	5
рабочее напряжение, В	660
гасящий тиристор	T630
зарядный диод	V320
зарядный резистор, Ом	1,05;
параметры пускозащитной цепи:	
тиристор	T630
диод	V500
разрядный резистор, Ом	5.

Проведение испытания в режиме эксплуатационного отключения двигателя при внезапном исчезновении напряжения дали положительные результаты.

Вид процессов гашения поля в предложенной системе определяется не только параметрами элементов, но и схемным решением, обеспечивающим пусковой режим во время асинхронного разгона машины. Для упрощения анализа переходного процесса гашения магнитного поля примем следующие допущения: в схеме используются идеальные тиристоры, индуктивность контуров коммутации носит линейный характер, влияние демпферных контуров и насыщения магнитной цепи синхронной машины не учитывается.

Напряжение на обмотке возбуждения для этого интервала времени определяется выражением

$$U_f = U_c(t_0) \cdot e^{-\gamma t} \cdot \left[\frac{2\beta - \gamma}{\rho} \cdot \sin \rho t + \cos \rho t \right]. \quad (13)$$

Из составления расчетных и экспериментальных данных следует:

– время гашения поля расчетное	– 0,066 с;
– время гашения поля экспериментальное	– 0,072 с;
– максимальный выброс напряжения на обмотке возбуждения:	
расчетный	– 81,3 В;
экспериментальный	– 82,5 В.

Выявленные расхождения обусловлены переменным значением реальной индуктивности обмотки возбуждения в режиме гашения поля, которая является сложной функцией поля возбуждения.

Обработка экспериментальных значений указанных величин и сопоставление их с расчетными позволяют сделать вывод о приемлемости полученных аналитических выражений для определения времени гашения поля и возможных всплесков напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карачунский П.Ш. К вопросу улучшения работы тракта топливоподачи / П.Ш.Карачунский, А.Д.Пивненко. – М., 1988. – 8с. – Деп. в ВИНТИ СССР №11/109.

Поступила в редколлегию 26.01.2012.