

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Введение.** Надежность является важнейшим технико-экономическим показателем качества любого технического устройства, в частности электрической машины, определяющим ее способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации. Качество электрических машин представляет совокупность свойств, определяющих их пригодность для эксплуатации.

Несмотря на совершенствование технологий изготовления конструкционных материалов и технологий ремонта, во всем мире показатели надежности электрооборудования примерно таковы. Из общего числа поврежденных электродвигателей примерно 78% ремонтируется и 22% заменяются резервными. Типы аварий включают пробой и короткое замыкание на землю (28%), электрические неисправности (32%) и механические повреждения (31%). В большей части повреждения проявляются в изоляции обмоток (50%) и подшипниковых узлах (29%). В качестве причин аварий можно выделить: пробой изоляции (30%), перегрев (26%) и механические повреждения (20%). Причины аварий вызваны нормальным физическим старением и износом (34%), неудовлетворительной смазкой (15%), повышенной влажностью (10%), неисправностями, обнаруженными во время осмотра (30%). Ответственность за аварии ложится на недостаточное профилактическое обслуживание (17%), неправильное применение (9%), завод изготовитель (15%), отсутствие профилактического обслуживания (2%).

Это обусловлено тем, что с каждым годом парк электрических машин и электромеханического оборудования физически все больше и больше устаревает, так как выпуск новых электрических машин существенно снизился. Это хорошо видно из анализа статистических данных выпуска электрических двигателей [1] (рис.1) за период 1940-2002гг.

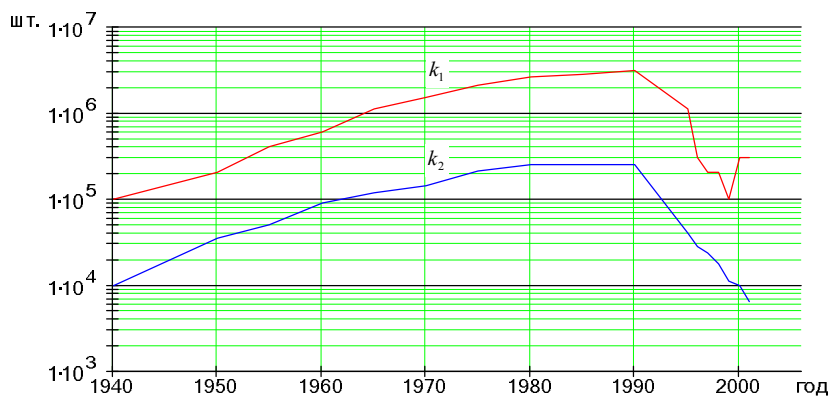


Рис. 1. Статистические данные по выпуску электрических двигателей:  $k_1$  - электромашин, включая погружные электродвигатели,  $k_2$  - взрывобезопасные электродвигатели

стического оборудования, нарушения технологии восстановления и ремонта и пр.

Такая ситуация приводит к снижению общей надежности всех узлов и элементов электромеханического оборудования – магнитной системы, обмоток статора и ротора, подшипников, коллектора или контактных колец и щеточного устройства. Выход из строя любой из этих частей приводит к отказу в работе машины. Следует отметить, что отказу обычно предшествуют внутренние изменения в машине, как-то: возрастание потерь, температуры нагрева, потребляемой мощности и т. д.

**Анализ предыдущих исследований.** В настоящее время вопросам надежности и долговечности электрических машин уделяется все более значительное внимание. В этом направлении ведутся обширные исследования. Однако еще отсутствуют обобщающие результаты исследований вопросов надежности электрических машин, которые необходимы многочисленным специалистам, работающим в научно-исследовательских организациях и промышленных предприятиях по проектированию, производству и эксплуатации электрических машин как общего, так и специального применения. Особенно остро стоит необходимость в рассмотрении вопросов определения или оценки остаточного ресурса. Настолько остро, что это находит отражение в документах правительства [2]. Проблема надежности электрических машин за последнее десятилетие резко обострилась, что объясняется следующими объективными причинами. С одной стороны, увеличением сложности технических систем и экстремальностью условий их эксплуатации, интенсивностью и повышением требований к качеству работы систем. С другой стороны, и по нашему мнению, это является в настоящее время преобладающим, сокращение выпуска электрических машин приводит к необходимости эксплуатировать машины, которые длительное время находятся в эксплуатации или подвергались ремонтам различной степени сложности. Установленным является факт, что ремонтировавшиеся

электрические машины имеют характеристики, которые отличаются от проектных [3]. Ни типовые, ни контрольные испытания электрических машин не дают достаточных сведений об их надежности, для определения которой требуются специальные испытания. Каждый из параметров контрольных испытаний в известной мере характеризует состояние определенного участка технологического процесса. Ток холостого хода АД, например, зависит от величины воздушного зазора между статором и ротором; потери холостого хода связаны с качеством штамповки и сборки листовой стали, а после ремонта от состояния пакета: закороченных или распушенных листов, наличия графа или механических повреждений; сопротивление статора и ротора зависит от качества намотки и заливки и т.п. Все это приводит к некачественности преобразования энергии. Данные явления становятся причиной повышения энергопотребления, снижения надежности и срока службы электропривода.

В практике эксплуатации принято считать, что эффективность работы всех электротехнических установок и особенно систем электрического привода, использующих электрическую энергию переменного тока, во многом определяется качеством электрической энергии в сетях питания [4,5]. Качество используемой электроэнергии определяется существующим межгосударственным стандартом на электроэнергию 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Эти нормативные документы определяют влияние качества электроэнергии на исправный электрический и магнитно-симметричный электромеханический преобразователь, но только в части увеличения дополнительных потерь и нагрева. По существу, ГОСТ показывает снижение КПД и выход ЭМ из строя через перегрев, но совсем не учитывает ту часть энергии, которая преобразована, но идет не на выполнение полезной работы, а, например, на вибрацию.

При проектировании эта особенность учитывается введением коэффициентов запаса прочности. Однако, определение количественных зависимостей показателей надежности узлов электрических машин от коэффициентов запаса прочности требует накопления статистических данных изменения механических свойств материалов в процессе эксплуатации или после ремонта. Методики расчета показателей надежности должны учитывать не только связь между принимаемыми коэффициентами запаса прочности и уровнем надежности, но и физическими процессами, вызывающими выход из строя. Это обуславливает то, что статистические данные об отказах электрических машин и их узлов не могут служить исходной базой для расчета показателей надежности машин, поступивших в эксплуатацию после ремонта, поскольку конструкция отдельных узлов и деталей подверглась изменениям в процессе эксплуатации или ремонта. Дополнительные данные могут быть получены путем использования коэффициентов, отражающих характер процессов преобразования энергии - коэффициентов качества преобразования энергии. Изменение показателей качества преобразования приводит к качественному изменению энергетических процессов [6]. В этой связи можно утверждать, что изменение качества преобразования энергии ассоциируются с отклонениями от нормируемых и, соответственно, является причиной быстрого выхода из строя ЭМ, а совокупность показателей качества энергопроцессов определяет допустимую границу их использования в промышленных условиях [6].

**Цель работы.** Целью работы является обоснование состава показателей качества преобразования энергии для оценки и контроля за состоянием электрооборудования систем электропривода.

**Материал и результаты исследований.** В электромеханике до настоящего времени отсутствует четкая структура показателей, характеризующих с качественной и количественной стороны процесс преобразования энергии в электрической машине [7]. Полный перечень таких показателей может быть сформирован в результате исследований по анализу взаимосвязей электромеханических процессов преобразования энергии с системой питания и ее мощностью, конструкцией электромеханического преобразователя и факторов, определяющих работоспособность ее узлов и элементов (рис.2).

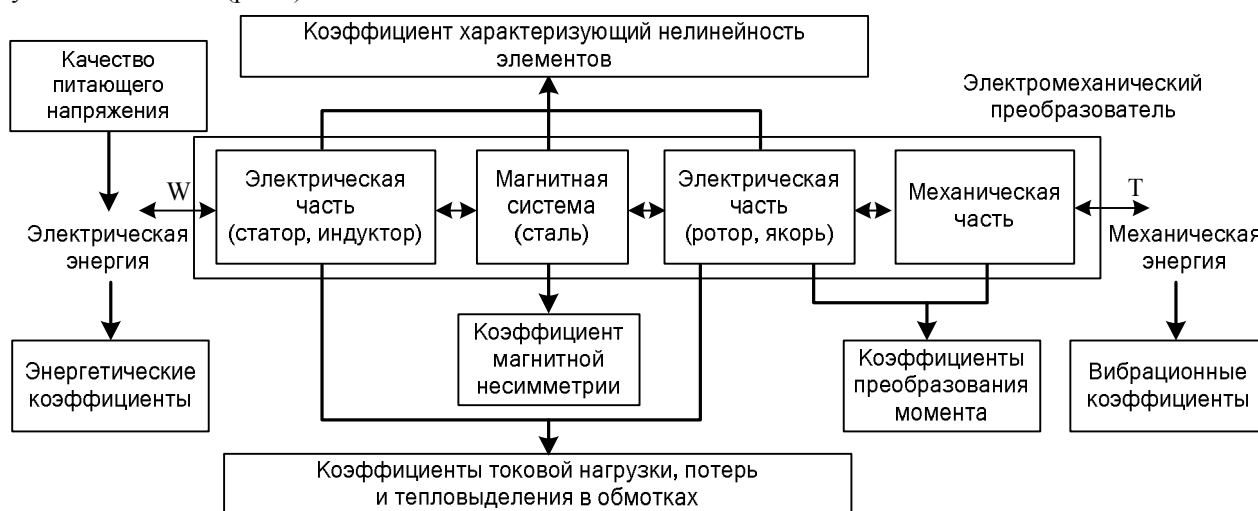


Рис. 2. Структура показателей, характеризующих процесс преобразования энергии в электромеханическом преобразователе

Отсутствие однозначной оценки качества протекания процессов преобразования энергии говорит о сложности этих процессов, с одной стороны, а с другой, об особенностях проявления этих процессов в конкретных физических устройствах и системах. В табл.1 приведены показатели качества преобразования энергии, отражающие про-

текание физических процессов в узлах электромеханического преобразователя (рис.2).

Таблица 1 – Показатели, характеризующие процесс преобразования энергии

| Характеристика   | Коэффициент  |
|--|--|
| <p><b>Коэффициент эффективности использования потребляемой энергии.</b> Этот показатель может характеризовать машину в целом и пофазно</p>   | <p>Коэффициент, характеризующий качество преобразования в целом:</p> $\varepsilon_p = \frac{P_0(t)}{P_3(t)} 100\% ;$ <p>пофазно - <math>\varepsilon_{pi} = \frac{P_{0i}(t)}{P_3(t)} 100\% ,</math></p> <p>где <math>i = A, B, C</math>, <math>P_0(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_i^{A, B, C} P_i(t) dt</math> - среднее значение мощности трех фаз; <math>P_{0i}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T P_i(t) dt</math>, - среднее значение мощности фазы;</p> $P_3(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_0(t))^2 dt}$ - эквивалентное значение мощности двигателя. |
| <p><b>Коэффициенты неравномерности тепловыделения и токовой загрузки фаз</b><br/>Отражают качественную сторону процесса преобразования энергии и позволяют судить о ее эффективности</p>   | $K_{нп\tau(j)} = \frac{3 \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^N I_{k(j)}^2} R_A}{\sqrt{\sum_{k=1}^N I_{k(A)}^2 R_A} + \sqrt{\sum_{k=1}^N I_{k(B)}^2 R_B} + \sqrt{\sum_{k=1}^N I_{k(C)}^2 R_C}} ;$ $K_{нп\tau(j)} = \frac{3 \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^N I_{k(j)}^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N I_{k(A)}^2} + \sqrt{\sum_{k=1}^N I_{k(B)}^2} + \sqrt{\sum_{k=1}^N I_{k(C)}^2}} ,$ <p>где <math>j = A, B, C</math> - соответствующая фаза АД; <math>I_k</math> - амплитуда тока <math>k</math> - й гармоники.</p>   |
| <p><b>Коэффициент магнитной несимметрии</b><br/>Несимметрия может быть учтена анализом взаимной индуктивности <math>x_{\mu}</math>, которая характеризует зазор. Несимметрия существует при <math>x_{\mu A} \neq x_{\mu B} \neq x_{\mu C}</math></p> | $x_{\mu, \text{ср}} = \frac{1}{3} \sum_i^{A, B, C} x_{\mu i} ,$ <p>где <math>\Delta x_{\mu i} = \frac{x_{\mu i} - x_{\mu \text{ср}}}{x_{\mu \text{ср}}} 100\%</math> - пофазные отклонения.</p>  |
| <p><b>Коэффициент некачественности преобразования момента</b></p>  | $K_{нп м} = 1 - \frac{M_0}{M_d} ,$ <p>где <math>M_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(t_i)</math> - постоянная составляющая электромагнитного момента; <math>M_d = \sqrt{M_0^2 + \sum_{k=1}^N M_k^2}</math> - среднеквадратичный момент; <math>M_k</math> - амплитуда момента <math>k</math> - й гармоники.</p>   |
| <p><b>Коэффициент, отражающий ухудшение вибрационных характеристик</b></p>   | $K_{нпв} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N M_k^2}}{\sqrt{M_0^2 + \sum_{k=1}^N M_k^2}} .$  |

Продолжение таблицы 1

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Коэффициент вариации момента</b><br/>Отражает долю высших гармоник в электромагнитном моменте</p>   | $k_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N M_k^2}}{\sqrt{2M_0}}$   |
| <p><b>Коэффициент увеличения нагрузки на элементы двигателя</b><br/>Характеризует увеличение нагрузки на элементы электромеханического преобразователя за счет высших гармоник момента</p>  | $k_m = m\sqrt{1 + k_v^2},$ <p>где <math>m = M_0 / M_n</math> - коэффициент нагрузки двигателя.</p>  |
| <p><b>Коэффициент контроля за вибрационным старением изоляции</b><br/>При <math>C \geq 1</math> вариация момента превышает допустимую и дальнейшая эксплуатация двигателя нежелательна;<br/>при <math>C &lt; 1</math> процесс старения изоляции требует внимания, так как может произойти выход двигателя из строя.</p> | $C = \frac{k_m}{\sqrt[n]{\alpha}},$ <p>где <math>n</math> - параметр, зависящий от температуры; <math>\alpha</math> - кратность снижения срока службы изоляции.</p>   |
| <p><b>Коэффициент, характеризующий нелинейность элементов электромеханического преобразователя</b><br/>Позволяет установить появление несинусоидального тока двигателя по причине питающего напряжения или некачественности преобразования энергии.</p>   | <p>Без учета питающей сети</p> $k_y = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N \left(\frac{I_k}{I_1} k\right)^2}}{\sqrt{\sum_{k=2}^N \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2}}$ <p>С учетом питающей сети</p> $k_y = 2 \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N \left(\frac{I_k}{I_1} k\right)^2}}{\sqrt{\sum_{k=2}^N \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2 + \sum_{k=2}^N 2k \frac{U_k}{U_1} \frac{I_k}{I_1} \sin(\varphi_k - \psi_k) + \sum_{k=2}^N \left(\frac{I_k}{I_1} k\right)^2}}$ |

Для анализа информативности и количественных показателей коэффициентов (табл.1) разработана математическая модель АД [8], которая позволяет имитировать параметрическую электрическую, магнитную и конструктивную несимметрию двигателя. Изменение показателей качества преобразования энергии при параметрической несимметрии рассмотрены в других работах авторов, поэтому анализу подвергнут случай дисбаланса ротора (рис.3,

4). Коэффициент  $\delta = 1 - \frac{\Delta_{дб}}{\Delta_{норм}}$  отражает степень дисбаланса: 0 – дисбаланс отсутствует, 1 – ротор касается статора,

где  $\Delta_{норм}$  – величина зазора при отсутствии дисбаланса, одинакова по всей окружности;  $\Delta_{дб}$  – величина минимального зазора при дисбалансе.

По результатам моделирования получены зависимости изменения показателей качества преобразования энергии в режимах холостого хода и работы АД с номинальной нагрузкой с различной степенью статического и динамического дисбаланса.

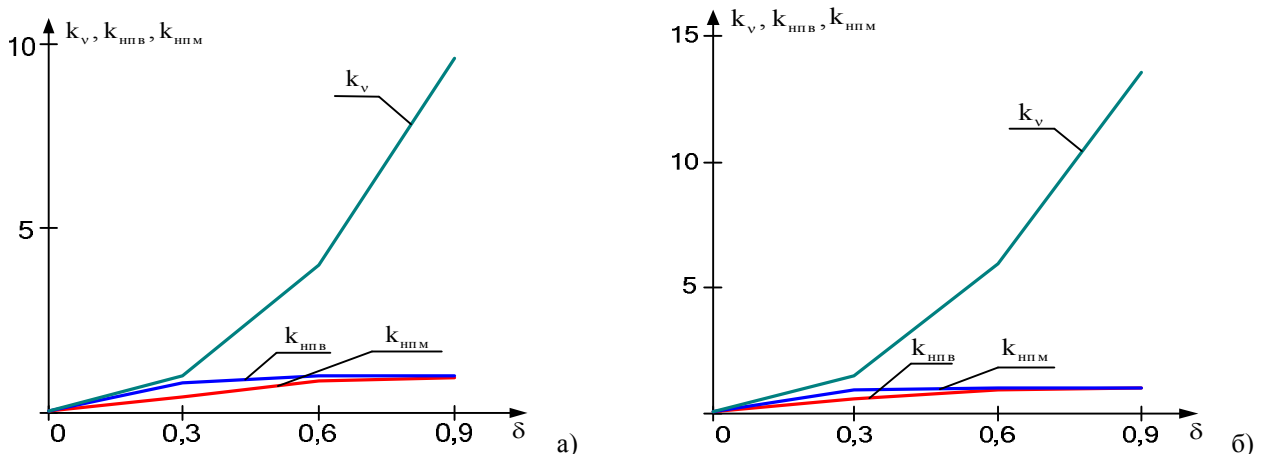


Рис. 3. Изменение коэффициентов качества преобразования энергии АД в режиме холостого хода при динамическом – а), статическом – б) дисбалансе

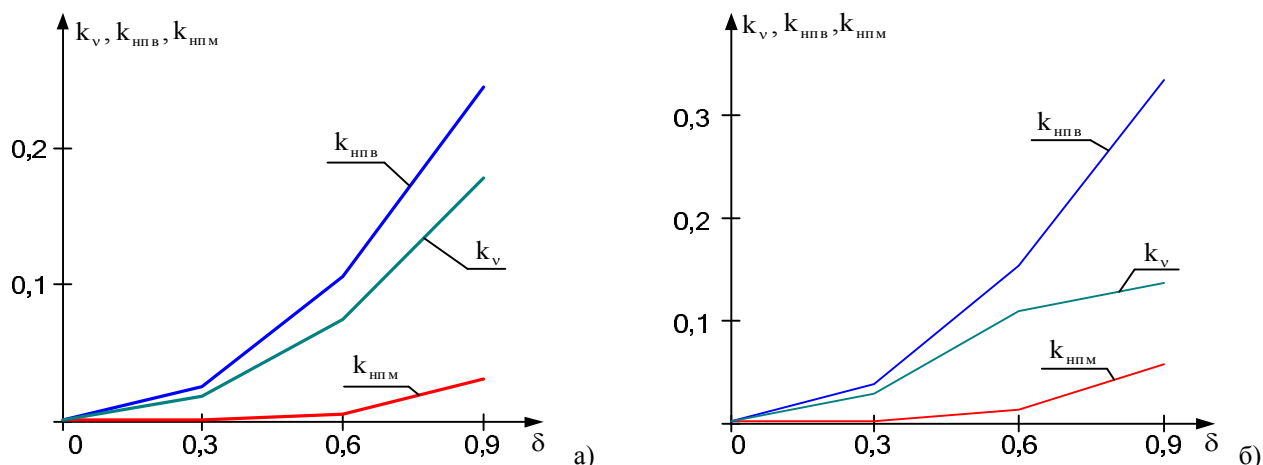


Рис. 4. Изменение коэффициентов качества преобразования энергии АД при номинальной нагрузке при динамическом – а), статическом – б) дисбалансе

Наиболее информативными для выявления возникающих вибраций при дисбалансе являются коэффициент некачественности преобразования момента, коэффициент, отражающий ухудшение вибрационных характеристик и коэффициент вариации момента. Дополнительная информация в режиме холостого хода может быть получена при анализе коэффициентов эффективности использования потребляемой энергии.

**Выводы.** Сформулированные коэффициенты качества преобразования энергии позволяют установить качественную сторону процессов преобразования энергии и судить о ее эффективности. Например, дисбаланс ротора не влияет на коэффициенты неравномерности тепловыделения и токовой загрузки фаз – их отклонение на холостом ходу при различных видах дисбаланса составляет не более 1,5%, а при работе под нагрузкой изменений не наблюдается вовсе; наиболее информативными показателями, отражающими появление вибраций на холостом ходу, являются коэффициент вариации момента и коэффициент эффективности использования потребляемой энергии, а в режиме работы под нагрузкой – коэффициент, отражающий ухудшение вибрационных характеристик; большее изменение коэффициентов наблюдается при статическом дисбалансе. Коэффициенты могут использоваться для контроля за состоянием электромеханических преобразователей систем электропривода, расширяют возможности выявления потенциальных скрытых дефектов, приобретенных в ходе эксплуатации, предремонтной или непосредственно ремонта и могут быть положены в основу системы оценки состояния электрической машины и системы электропривода, оценки вероятности безотказной работы, выработки рекомендаций по ее эксплуатации в части вывода в ремонт или создания щадящих режимов работы, что позволит существенно увеличить ресурс электрической машины. Их применение позволяет значительно упростить процедуру определения ресурса электромеханического оборудования и автоматизировать этот процесс при использовании систем мониторинга, оснащенных компьютеризированными измерительно-диагностическими системами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Статистичний щорічник України за 2001 рік. Державний комітет статистики України. К.: Техніка, 2002. – 645 с.
2. Про затвердження Порядку проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки. Постанова Кабінету міністрів України №687 від 26.05.2004р.
3. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. – 240с.
4. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173с.
5. Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.– Кременчук: КДПУ. – 2002. – Вип.1. – С. 81–85.
6. Родькин Д.И. О преобразовании энергии в электромеханических системах // Научные труды Кременчугского политехнического института «Проблемы создания новых машин и технологий». - Кременчуг: КГПУ, 2000. - Вып.1. - С. 106-112 .
7. Черный А.П. Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. - 2004, вип.15 – С. 160-168.
8. Калінов А.П., Мамчур Д.Г. Математичні моделі для дослідження впливу конструктивних несиметрій електричних машин на їх електромагнітні параметри // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2007. Вип. 3/2007 (44), Частина 2. – С. 150-154.