

УДК 621.3.002.5:621.311.61:621.313.001.5

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. И. Ломонос, Д. И. Родькин, Д. А. Мосюндз

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: zylon@ukr.net

Проведена аналитическая оценка направлений исследований и разработок, которые позволили бы при комплексном подходе создать условия для повышения ресурса работоспособности машин постоянного тока с использованием возможностей испытательных комплексов и систем испытания электроремонтных предприятий. Рассмотренный энергетический метод является доступным средством решения сложных электротехнических задач по определению параметров нагрузочных режимов.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, накопитель энергии, машина постоянного тока, энергетический метод.

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ З НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

А. І. Ломонос, Д. Й. Родькін, Д. А. Мосюндз

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: zylon@ukr.net

Проведено аналітичну оцінку напрямів досліджень і розробок, які дозволили б під час комплексного підходу створити умови для підвищення ресурсу працездатності машин постійного струму з використанням можливостей випробувальних комплексів і систем випробування електроремонтних підприємств. Розглянутий енергетичний метод є доступним засобом вирішення складних електротехнічних задач з визначення параметрів навантажувальних режимів.

Ключові слова: електротехнічний комплекс, накопичувач енергії, машина постійного струму, енергетичний метод.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Задача оценки работоспособности электрических машин является актуальной на протяжении последних десятилетий по целому ряду причин. Одна из них – старение и износ машин, находящихся в эксплуатации.

В значительной мере это касается машин постоянного тока (МПТ) – составной части систем регулируемого электропривода большой и средней мощности горнодобывающих предприятий, металлургического производства, транспортных систем и, прежде всего, железнодорожного подвижного состава. Направление технического производства таково, что машины постоянного тока и системы привода на их базе постепенно будут вытеснены из эксплуатации более эффективными приводными системами с машинами переменного тока разных конструкций и типом исполнения при питании их от преобразователей частоты. Анализ и опыт показывает, что машины постоянного тока будут эксплуатироваться на протяжении десятилетий в условиях промышленных производств стран с ограниченными финансовыми и техническими возможностями. Таким государством, по мнению аналитиков, является и наша страна.

Изложенное с обеих позиций указывает на продолжение научных работ, направленных на создание благоприятных условий для продления ресурса работоспособности МПТ средней и большой мощности с известными системами возбуждения. Устройства, системы, методы и режимы эксплуатации – арсенал тех результатов, которые будут востребованы на предприятиях отечественного народнохозяйственного комплекса.

Целью работы является аналитическая оценка направлений исследований и разработок, которые позволили бы при комплексном подходе создать условия для повышения ресурса работоспособности МПТ с использованием возможности испытательных комплексов и систем испытания электроремонтных предприятий.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В условия электроремонтных предприятий в качестве документов, регламентирующих технические и технологические приёмы методов оценки работоспособности электрооборудования, используются стандарты 60–70-х гг., отраслевые условия на испытание и т.п. Возможности улучшения качества испытательных приёмов, как правило, не доходят до рабочих мест, несмотря на то, что они базируются на принципиально новых компьютерных технологиях, высокоэффективных преобразовательных и измерительных устройствах и приборах. Финансовые ограничения лежат в основе отмеченного явления. Сказанное объясняет и то, что достаточно часто используются решения, затрагивающие лишь одну сторону вопроса, в данном случае связанного с определением ресурса работоспособности электрической машины (ЭМ).

Тенденции развития технологических процессов таковы, что при работе подвергается старению не только ЭМ, но в равной степени и механическое оборудование. В этой связи ресурс электрооборудования приходится доводить до износа механического оборудования, за которым предполагается полное обновление производства на новом высокопроизводительном электромеханическом оборудовании.

Процесс определения характеристик электрооборудования после его текущего или капитального ремонта включает следующие этапы:

- определение выходных параметров ЭМ, обеспечивающих электрическую прочность изоляции, т.е. возможность безопасной работы с электрооборудованием;
- выяснение возможности принципиальной работоспособности электромеханического преобразователя энергии при заданных скоростных режимах;
- определение электромагнитных параметров электрической машины (сопротивлений, индуктивностей и др.);
- испытания ЭМ на термическую устойчивость под нагрузкой с установленным режимом нагружения;
- определение эксплуатационных характеристик (перегрузочная способность по току, моменту, устойчивость и качество коммутации, уровни вибраций и шума).

Из изложенного следует, что три последних пункта в приведенном перечне выходят полностью или частично за рамки регламентированных операций при испытаниях двигателей после их ремонта. Выполнение не совсем стандартных операций в последнее время находится в поле зрения исследователей. Одна из таких операций – токовое и механическое нагружение электрической машины с исключением наиболее трудоемкой операции механического агрегирования испытуемой и вспомогательной машин. Операция в особенности трудоемка тогда, когда исследуются машины разной мощности, разных типов исполнений и др.

Единственная оправдывающая себя операция – использование схем, исключающих механическое соединение валов – так называемых схем динамического нагружения ЭМ [1–3]. Теоретически вопросы динамического нагружения проработаны достаточно полно [1–5]. К числу требующих внимания вопросов при реализации таких систем следует отнести создание таких систем и режимов, при которых удовлетворительно решается задача электромагнитной совместимости станций динамического нагружения с электроснабжающими сетями, находящимися в эксплуатации. Сущность вопроса в том, что электроремонтные цеха, как потребители электрической энергии, не относятся к разряду энергоёмких предприятий, в то время как возникает необходимость испытывать под нагрузкой двигателя большой мощности. В схемах динамического нагружения в такой ситуации происходит изменение режима энергопотребления настолько, что в целом предприятие частично условно можно перевести в разряд энергоёмких производств на ограниченное время испытаний под нагрузкой. Хотя время нагружения лишь условно можно считать ограниченным, однако в течение этого периода требуется получить информацию о тепловом режиме как машины в целом, так и отдельных ее частей. При этом время нагружения должно быть не менее постоянной нагревания электрической машины.

Мгновенная мощность якорной цепи при этом состоит из постоянной P_0 и переменной $P_k(t)$ составляющих:

$$P(t) = P_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} P_k(t). \quad (1)$$

В режиме нагружения без механической связи с нагрузочной машиной: P_0 – мощность активных потерь в двигателе и преобразовательном оборудовании; $P_k(t)$ – знакопеременные составляющие мощности, циркулирующей в якорной цепи, на выходе и входе преобразовательного устройства.

С учетом того, что P_0 близка к мощности потерь и при испытаниях должна быть равна им, сумма знакопеременных составляющих при этом сравнима или превышает мощность испытуемой ЭМ, которая, как и преобразователь, может быть сравнима или превышать мощность питающего трансформатора. Очевидна недопустимость такого режима.

Решение задачи может быть достигнуто двумя путями:

- путем установки преобразовательного оборудования и питающего трансформатора соответствующей мощности (сравнимой с мощностью наиболее крупной электрической машины). Этот этап – путь неоправданного завышения затрат на электрооборудование исполнительной станции;
- использованием таких схемных решений, которые бы обеспечивали исключение знакопеременных составляющих мощности в цепи преобразовательного устройства, питающего трансформатора и энергосистеме. Этот путь – использование накопительно-компенсирующих устройств в силовой части питания испытываемой электрической машины, что наиболее полно соответствует правилу компенсировать знакопеременные составляющие мощности в том месте, где они образуются.

Использование накопительно-компенсирующих устройств и систем в настоящее время является наиболее кардинальным решением, обеспечивающим практически максимальные энергоресурсосберегающие режимы в системах регулируемого электропривода.

Исследования показали оправданность применения машинных накопителей-компенсаторов в условиях испытательных станций электроремонтных предприятий.

В качестве компенсатора может быть использована стандартная электрическая машина постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 1,а); могут применяться машинные компенсаторы с асинхронными машинами с инверторами напряжения (рис. 1,б).

Режимы работы схемы с машинным преобразователем рассмотрены в [1, 5]. Их особенность в том, что напряжение ТП в процессе нагружения не регулируется, а изменяются токи возбуждения электрических машин.

Сущность системы динамического нагружения заключается в создании с помощью сформированных соответствующим образом управляющих воздействий на источники питания силовых цепей и

цепей возбуждения периодически повторяющихся энергообменных процессов между сетью и двигателем, двигателем и другими преобразователями энергии. В этих процессах участвуют элементы конст-

рукции электрической машины, определяющие ее техническую сущность как электромеханического преобразователя: вращающиеся массы ротора, индуктивности обмоток, их активные сопротивления.

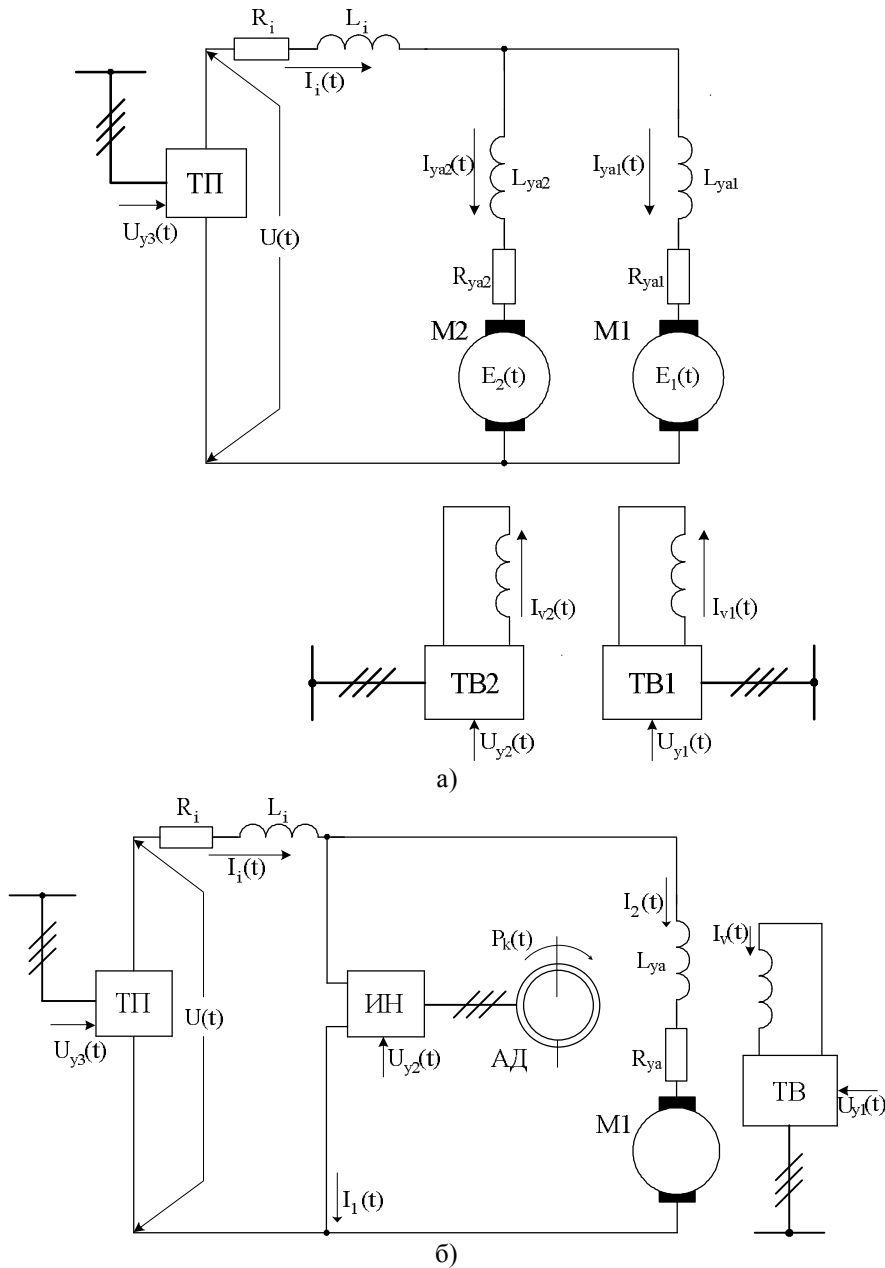


Рисунок 1 – Схема систем испытания: а) с электрической машиной-компенсатором; б) с асинхронной управляемой машиной

Создание электрооборудования, базирующегося на энергообменных процессах и рассматривающемся как цель работы, включает разработку целого ряда вопросов, охватывающих, кроме обоснования принципиальной возможности создания таких систем, принципы формирования управляющих воздействий, изучение энергообменных процессов, определение требований к источнику питания, измерительно-диагностическому оборудованию и т.п.

Первая сторона вопроса включает качественный анализ процессов с целью определения вида управляющих воздействий и может быть рассмотрена с

общих позиций энергобаланса, предполагающих наличие принципиально работоспособной электрической машины с запасенными кинетической и электромагнитной составляющими энергии.

В системах динамического нагружения в качестве накопителей выступают вращающиеся части (якорь двигателя, муфты, маховики), запасующие кинетическую энергию, а также индуктивности обмоток, запасующие электромагнитную энергию. Введя соответствующие обозначения для составляющих энергии, уравнение энергобаланса принимает вид:

$$W_I = W_C + W_K + W_M, \quad (2)$$

где W_I – энергия, потребляемая от источника питания; W_C – энергия, рассеиваемая нагрузочным устройством; W_K – энергия вращающихся частей; W_M – энергия магнитного поля в зазоре машины.

Рассматривая машину без нагрузки на валу, исключим из левой и правой частей приведенного уравнения энергию потерь. В результате уравнение энергобаланса примет вид:

$$W_I = W_K + W_M. \quad (3)$$

Мощность, циркулирующая между электрической машиной и сетью, включая цепь возбуждения:

$$P_I(t) = \frac{d}{dt} W_I.$$

Выполним анализ для двигателя постоянного тока, приняв при этом во внимание, что

$$W_K = J \frac{\omega^2}{2},$$

где J – момент инерции якоря; ω – скорость его вращения.

Полагая, что скорость вращения пропорциональна напряжению U и обратно пропорциональна коэффициенту э.д.с. $k\Phi$, получим:

$$W_K = J \frac{U^2}{2(k\Phi)^2} = J \frac{U^2}{8C^2(0,5L_V I_V)^2} = A \frac{U^2}{W_M}, \quad (4)$$

где L_V – индуктивность обмотки возбуждения; I_V – ток возбуждения; C – коэффициент пропорциональности $A = \frac{J}{8C}$.

С учетом полученного выражения можно записать:

$$W_I = A \frac{U^2}{W_M} + W_M. \quad (5)$$

Рассматриваемый случай соответствует двигателю независимого возбуждения. Для машин со смешанным возбуждением $W_I = 0,5(L_V I_V^2 + L_C I_{ya}^2)$, а для серийной машины необходим учет энергии, запасенной только в индуктивности L_C серийной обмотки: $W_I = 0,5L_C I_{ya}^2$.

Из полученных зависимостей определяются возможные пути формирования динамического режима. При воздействии на напряжение питания применительно к двигателю независимого возбуждения:

$$P(t) = A \frac{1}{W_M} \frac{d}{dt} U^2(t). \quad (6)$$

При воздействии на поток двигателя ($U = \text{const}$):

$$P(t) = A \frac{U^2 \frac{d}{dt} W_M(t)}{W_M^2(t)} + \frac{d}{dt} W_M(t). \quad (7)$$

Первая составляющая определяет мощность силовой цепи, а вторая – цепи возбуждения. Очевидно, что при определенных условиях мощность, потребляемая из сети, может быть отрицательна при положительной мощности якорной цепи. Это вызвано тем, что при больших значениях L_V уменьшение W_M

должно сопровождаться переводом источника питания обмотки возбуждения в режим рекуперации энергии.

При одновременном воздействии на напряжение питания и ток возбуждения двигателя получаем выражение:

$$P(t) = \frac{A \left[W_M(t) \frac{d}{dt} U^2 - U^2(t) \frac{d}{dt} W_M(t) \right]}{W_M^2(t)} - \frac{d}{dt} W_M(t). \quad (8)$$

Использование комплексов с асинхронными накопительными устройствами базируется на традиционной схеме асинхронного регулируемого электропривода и оправдано в условиях испытательных станций тем, что компенсирующие устройства могут использоваться как нагрузочные системы для испытания асинхронных машин. В этом смысле система для нагружения приобретает универсальный характер, что особенно важно для предприятий с циклами ремонта всех известных электрических машин.

Сущность систем динамического нагружения заключается в создании режимов с заданными значениями тока и момента при циклически повторяющихся процессах накопления энергии в машине и возврате ее в сеть.

Рассмотренный ранее подход к определению путей формирования нагрузочных режимов вполне приемлем для машин переменного тока, например, асинхронных. Выражение для суммарного значения энергии асинхронного двигателя имеет вид:

$$W_I = W_M + W_{M\Sigma} = J \frac{2\pi^2}{p^2} f^2(t) + W_{MA}(t) + W_{MB}(t) + W_{MC}(t), \quad (9)$$

где p – число пар полюсов; $f(t)$ – зависимость частоты питания от времени; W_{MA} , W_{MB} , W_{MC} – составляющие электромагнитной энергии соответствующих фаз двигателя.

Мощность, потребляемая двигателем из сети:

$$P(t) = A \frac{d}{dt} f^2(t) + \frac{d}{dt} [W_{MA}(t) + W_{MB}(t) + W_{MC}(t)];$$

$$A = J \frac{2\pi^2}{p^2} f^2.$$

Энергия фазы двигателя в случае, если пренебречь энергией, сосредоточенной в контурах потоков рассеивания, имеет вид:

$$W_M(t) = \frac{1}{2} L_\mu I_\mu^2(t) = B \frac{U^2(t)}{f^2(t)}; \quad (10)$$

$$B = \frac{1}{8\pi^2 L_\mu}.$$

Суммарное значение электромагнитной энергии симметричной асинхронной машины равно $\frac{3}{2} L_\mu I_\mu$.

Следует подчеркнуть, что при любой форме несимметрии конструкции или при несимметричном питании меняющаяся составляющая электромагнитной энергии соответствующим образом проявляет себя и это свойство может быть использовано в практических целях. Анализируя случай симметрии

при преобразовании энергии, запишем выражение для мощности:

$$P(t) = \frac{d}{dt} \left[Af^2(t) + B \frac{U^2(t)}{f^2(t)} \right]. \quad (11)$$

Из этого равенства следует, что энергообменные процессы могут быть получены при периодическом изменении частоты (при модуляции частоты), при периодическом изменении напряжения питания (при модуляции амплитуды напряжения), а также при изменении параметров напряжения и частоты в соответствии с некоторыми модулирующими функциями. При изменении частоты питания, но при постоянной амплитуде напряжения мощность будет определяться зависимостью:

$$P(t) = A \frac{d}{dt} f^2(t) - BU^2(t) \frac{\frac{d}{dt} f^2(t)}{f^4(t)}. \quad (12)$$

При изменении только напряжения питания

$$P(t) = \frac{B}{f^2(t)} \frac{d}{dt} U^2(t).$$

Если напряжение и частота изменяются пропорционально друг другу, то зависимость мощности существенно упрощается и принимает вид:

$$P(t) = A \frac{d}{dt} f^2(t).$$

В случае, если процесс нагружения осуществляется при одновременном изменении частоты и напряжения, то выражение для мощности имеет вид:

$$P(t) = A \frac{d}{dt} f^2(t) - B \frac{f^2(t) \frac{d}{dt} U^2(t) - U^2(t) \frac{d}{dt} f^2(t)}{f^4(t)}. \quad (13)$$

На базе вышеописанных уравнений баланса мощностей выполним анализ процессов нагружения с учетом воздействия на поток машины таким образом, чтобы переменная составляющая мощности замыкалась между электрическими машинами и не переходила в питающую сеть. Это позволит дать не только количественную, но и качественную оценку происходящих процессов энергообмена в цепи, а также разработать методику расчета параметров электрооборудования комплекса испытаний.

Анализ энергопроцессов является основным при оценке работоспособности электрических машин при испытании. При этом удобным математическим аппаратом, позволяющим рассмотреть особенности распределения энергии на элементах цепи, является энергетический метод на базе уравнений баланса мгновенной мощности.

На практике приходится решать целый ряд вопросов, затрагивающих как режим нагружения электрических машин, так и идентификации ее некоторых параметров. Рассмотрим некоторые наиболее характерные задачи.

Задача определения параметров двигателя. Известными являются электрические параметры нагруженного режима – ток и напряжение якоря.

Для системы (рис. 1,а) уравнения баланса можно записать в виде:

$$\begin{cases} U_i(t) = E_1(t) + I_{ya}(t)R + L_{ya} \frac{dI_{ya}(t)}{dt}; \\ M_d(t) - M_c(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt}; \\ M_d(t) = I_{ya}(t)k\Phi(t), \end{cases} \quad (14)$$

где M_c , J – момент сопротивления и момент инерции двигателя.

Зависимости, характеризующие режим нагружения, можно представить так:

$$\begin{cases} I_{ya}(t) = I_0 + \sum_{n=1}^N I_n(t); \\ E_1(t) = k\Phi(t)\omega(t) = E_0 + \sum_{m=1}^M E_m(t); \\ k\Phi(t) = k\Phi_0 + \sum_{k=1}^K k\Phi_k(t); \\ \omega(t) = \omega_0 + \sum_{j=1}^J \omega_j(t). \end{cases} \quad (15)$$

Энергетический метод заключается в том, что все электрические параметры представляются в форме тригонометрических рядов, составляются уравнения мгновенной мощности элементов схемы замещения электромеханической системы (ЭМС), с использованием полученных выражений составляются уравнения баланса составляющих мгновенной мощности для каждой из ее гармоник [6–7]. Неизвестные определяются из полученной системы уравнений.

Представим ток якоря, э.д.с., поток, скорость двигателя в виде:

$$\begin{cases} I(t) = I_0 + I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + I_{3a} \cos(3\Omega t) + \\ + I_{3b} \sin(3\Omega t) + I_{5a} \cos(5\Omega t) + I_{5b} \sin(5\Omega t); \\ E(t) = E_0 + E_{1a} \cos(\Omega t) + E_{1b} \sin(\Omega t) + \\ + E_{3a} \cos(3\Omega t) + E_{3b} \sin(3\Omega t) + E_{5a} \cos(5\Omega t) + \\ + E_{5b} \sin(5\Omega t); \\ k\Phi(t) = k\Phi_0 + k\Phi_{1a} \cos(\Omega t) + k\Phi_{1b} \sin(\Omega t) + \\ + k\Phi_{3a} \cos(3\Omega t) + k\Phi_{3b} \sin(3\Omega t) + \\ + k\Phi_{5a} \cos(5\Omega t) + k\Phi_{5b} \sin(5\Omega t); \\ \omega(t) = \omega_0 + \omega_{2a} \cos(2\Omega t) + \omega_{2b} \sin(2\Omega t) + \\ + \omega_{4a} \cos(4\Omega t) + \omega_{4b} \sin(4\Omega t) + \\ + \omega_{6a} \cos(6\Omega t) + \omega_{6b} \sin(6\Omega t). \end{cases} \quad (16)$$

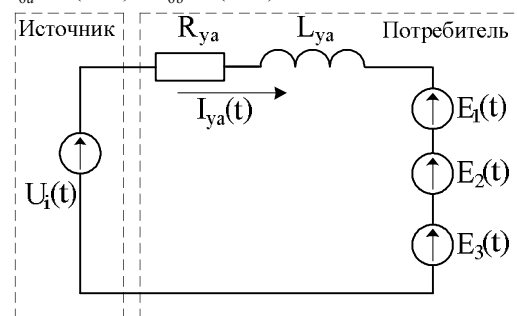


Рисунок 2 – Преобразованная схема замещения испытываемого двигателя

Представим исследуемый участок якорной цепи эквивалентной схемой замещения (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что эквивалентные э.д.с. представляют собой совокупность электромагнитных параметров первой машины. Такой подход позволит разделить задачу по определению необходимых данных на две: в первой задаче определяются элек-

тромагнитные параметры якорной цепи, где в качестве неизвестных будут R_{ya} , L_{ya} , E_0 , $E_1(t)$, ..., $E_n(t)$.

Система идентификационных уравнений для определения $E(t)$, R_{ya} и L_{ya} в общем виде будет иметь вид:

$$\begin{cases}
 U_i I_0 = R_{ya} I_{1a}^2 + R_{ya} I_{1b}^2 + R_{ya} I_{3a}^2 + R_{ya} I_{3b}^2 + R_{ya} I_{5a}^2 + R_{ya} I_{5b}^2 + E_0 I_0 + E_{1a} I_{1a} + E_{1b} I_{1b} + E_{3a} I_{3a} + E_{3b} I_{3b} + E_{5a} I_{5a} + E_{5b} I_{5b}; \\
 0 = R_{ya} I_{1a}^2 - R_{ya} I_{1b}^2 + 2R_{ya} I_{3a} I_{1a} + 2R_{ya} I_{5b} I_{3b} + 2R_{ya} I_{1b} I_{3b} + 2R_{ya} I_{3a} I_{5a} - L\Omega I_{1a} I_{3b} + L\Omega I_{1a} I_{1b} + L\Omega I_{1a} I_{1b} + L\Omega I_{1b} I_{3a} - \\
 - 3L\Omega I_{3a} I_{1b} - 3L\Omega I_{3a} I_{5b} + 3L\Omega I_{1a} I_{3b} + 3L\Omega I_{5a} I_{3b} - 5L\Omega I_{5a} I_{3b} + 5L\Omega I_{3a} I_{5b} + E_{1a} I_{1a} + E_{1a} I_{3a} - E_{1b} I_{1b} + \\
 + E_{1b} I_{3b} + E_{3a} I_{1a} + E_{3a} I_{5a} + E_{3b} I_{1b} + E_{3b} I_{5b} + E_{5a} I_{3a} + E_{5b} I_{3b}; \\
 0 = 2R_{ya} I_{1a} I_{1b} + 2R_{ya} I_{1b} I_{3a} + 2R_{ya} I_{5a} I_{3b} + 2R_{ya} I_{1a} I_{3b} + 2R_{ya} I_{3a} I_{5b} - L\Omega I_{1a}^2 - L\Omega I_{1a} I_{3a} + L\Omega I_{1b}^2 + L\Omega I_{3b} I_{1b} - 3L\Omega I_{3a} I_{1a} - \\
 - 3L\Omega I_{3a} I_{5a} + 3L\Omega I_{3b} I_{1b} + 3L\Omega I_{5b} I_{3b} - 5L\Omega I_{5a} I_{3a} + 5L\Omega I_{5b} I_{3b} + E_{1a} I_{1b} + E_{1a} I_{3b} + E_{1b} I_{1a} + E_{3a} I_{1b} + E_{3b} I_{5b} + \\
 + E_{3b} I_{1a} + E_{3b} I_{5a} + E_{5a} I_{3b} + E_{5b} I_{3a}; \\
 0 = 2R_{ya} I_{3a} I_{1a} + 2R_{ya} I_{5a} I_{1a} - 2R_{ya} I_{1b} I_{3b} + 2R_{ya} I_{1b} I_{5b} + L\Omega I_{1b} I_{3a} - L\Omega I_{5b} I_{1a} + L\Omega I_{3b} I_{1a} + L\Omega I_{1b} I_{5a} + 3L\Omega I_{3a} I_{1b} + \\
 + 3L\Omega I_{1a} I_{3b} - 5L\Omega I_{5a} I_{1b} + 5L\Omega I_{1a} I_{5b} + E_{1a} I_{3a} - E_{1b} I_{3b} + E_{3a} I_{1a} - E_{3b} I_{1b} + E_{1b} I_{5b} + E_{1a} I_{5a} + E_{5a} I_{1a}; \\
 0 = 2R_{ya} I_{3a} I_{1b} + 2R_{ya} I_{1a} I_{3b} - 2R_{ya} I_{1a} I_{5b} + 2R_{ya} I_{1b} I_{5a} - L\Omega I_{1a} I_{3a} + L\Omega I_{1b} I_{3b} - L\Omega I_{1a} I_{5a} + L\Omega I_{1b} I_{5b} - 3L\Omega I_{3a} I_{1a} + \\
 + 3L\Omega I_{3b} I_{1b} - 3L\Omega I_{5a} I_{1a} + 3L\Omega I_{5b} I_{1b} + E_{1a} I_{3b} + E_{1a} I_{5b} + E_{1b} I_{3a} + E_{1b} I_{5a} + E_{3a} I_{1b} + E_{5a} I_{1b} + E_{3a} I_{1b} + E_{5b} I_{1a}; \\
 0 = -R_{ya} I_{3b}^2 + 2R_{ya} I_{5a} I_{1a} - 2R_{ya} I_{1b} I_{5b} + L\Omega I_{5b} I_{1a} + L\Omega I_{1b} I_{5a} + 3L\Omega I_{3a} I_{3b} + 3L\Omega I_{1a} I_{3b} + 5L\Omega I_{5a} I_{1b} + 5L\Omega I_{1a} I_{5b} + \\
 + E_{1a} I_{5a} - E_{1b} I_{5b} + E_{3a} I_{3a} - E_{3b} I_{3b} + E_{1a} I_{5a} - E_{5b} I_{1b}; \\
 0 = 2R_{ya} I_{1a} I_{5b} + 2R_{ya} I_{1b} I_{5a} + 2R_{ya} I_{3b} I_{3a} - 3L\Omega I_{1a}^2 + 3L\Omega I_{3b}^2 + L\Omega I_{1b} I_{5b} - L\Omega I_{1a} I_{5a} + 5L\Omega I_{5a} I_{1a} + 5L\Omega I_{5b} I_{1b} + \\
 + E_{1b} I_{5a} + E_{3a} I_{3b} + E_{3b} I_{3a} + E_{5a} I_{1b} + E_{5b} I_{1a}; \\
 0 = 2R_{ya} I_{5a} I_{3a} - 2R_{ya} I_{5b} I_{3b} + 3L\Omega I_{3a} I_{5b} + 3L\Omega I_{5a} I_{3b} + 5L\Omega I_{5a} I_{3a} + 5L\Omega I_{3a} I_{5b} + E_{3a} I_{5a} - E_{3b} I_{5b} + E_{5a} I_{3a} - E_{5b} I_{3b}; \\
 0 = 2R_{ya} I_{3a} I_{5b} + 2R_{ya} I_{3b} I_{5a} - 3L\Omega I_{3a} I_{5a} + 3L\Omega I_{3b}^2 - 5L\Omega I_{5a} I_{3a} + 5L\Omega I_{5b} I_{3b} + E_{3b} I_{5a} + E_{3a} I_{5b} + E_{5a} I_{3b} + E_{5b} I_{3a}; \\
 0 = R_{ya} I_{5a}^2 - R_{ya} I_{5b}^2 + 5L\Omega I_{5a} I_{5b} + 5L\Omega I_{3a} I_{3b} + E_{5a} I_{5a} - E_{5b} I_{5b}; \\
 0 = 2R_{ya} I_{5a} I_{5b} - 5L\Omega I_{5a}^2 + 5L\Omega I_{5b}^2 + E_{5a} I_{5b} + E_{5b} I_{5a}.
 \end{cases} \quad (17)$$

Полученная система разрешима известными математическими методами.

Задача вторая заключается в определении электромеханических параметров ЭМС при известных, т.е. определенных в первой задаче, значениях составляющих. Уравнение мгновенной мощности:

$$E(t)I_{ya}(t) = k\Phi(t)\omega(t)I_{ya}(t) + J\omega(t)\frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (18)$$

Составление системы идентификационных уравнений производится, как и ранее. Неизвестными являются коэффициенты, составляющие в совокупности зависимости $k\Phi(t)$ и $\omega(t)$ в форме тригонометрических рядов.

Особенностью является то, что в отличие от ранее рассмотренной задачи, в данной осуществляется перемножение трех зависимостей $I_{ya}(t)$, $k\Phi(t)$ и $\omega(t)$, что связано с достаточно сложными и специфическими частотными преобразованиями. Упомянутая специфика в том, что умножение трех тригонометрических функций позволяет получить четыре компоненты с различными частотами. Решение полученной системы идентификационных уравнений – известная математическая процедура.

Третья задача – задача чисто нагрузочного характера. Известно напряжение испытания $U(t)$ и зависимость параметра $k\Phi(t)$ в форме постоянной составляющей $k\Phi_0$, одной или нескольких гармо-

ник соответствующей частоты. Неизвестными являются составляющие тока $I_{ya}(t)$ и скорости $\omega(t)$.

Не останавливаясь на деталях составления уравнений и в целом окончательной системы, укажем, что рассмотренный энергетический метод является вполне доступным средством решения достаточно сложных электротехнических задач по определению параметров нагрузочных режимов, а также идентификации параметров электрооборудования, в том числе и с нелинейными характеристиками.

ВЫВОДЫ. В работе рассмотрены возможности применения энергетического метода при расчете электромагнитных параметров машин постоянного тока. Показано, что использование уравнений баланса мгновенных мощностей по каждой гармонике позволяет получить достаточное количество уравнений при любом количестве неизвестных. Предложен математический аппарат для определения электромагнитных параметров двигателя, включающий два этапа, что позволяет значительно упростить расчет.

Таким образом, в работе показаны возможности определения эквивалентных э.д.с. $E(t)$, активного сопротивления R_{ya} , индуктивности на обмотках якоря L_{ya} , а также определение функции магнитного потока $k\Phi(t)$. Следует отметить, что при известном токе возбуждения $I_v(t)$ легко перейти к зависимостям $k\Phi(I_v)$ и $E(I_v)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при после-ремонтных испытаниях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
2. Родькин Д.И., Давидкович В.М. Оценка эффективности систем динамического нагружения асинхронных двигателей // *Электротехника*. – 1994. – № 11.
3. Давидкович В.М., Родькин Д.И. Устройства динамического нагружения асинхронных двигателей при амплитудной модуляции напряжения. – *Электротехника*. – 1994. – № 4. – С. 28–33.
4. Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Сравнительный анализ способов формирования динамического нагружения машин постоянного тока // *Вісник*

КДПУ: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 172–177.

5. Ломонос А.И. К обоснованию выбора источника питания для систем динамического нагружения машин постоянного тока // *Вісник КДПУ: Наукові праці КДПУ*. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 3/2008 (50), ч. 1. – С. 163–167.

6. Родькин Д.И., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническим напряжением и током // *Электротехника*. – 2004. – № 6. – С. 37–42.

7. Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Исследование нелинейностей электромеханических преобразователей энергетическим методом // *Электротехника і електромеханіка*. – Харків: НТУ“ХПІ”. 2004. – № 1. – С. 19–22.

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES WITH ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR TESTING ELECTRIC MACHINE

A. Lomonos, D. Rodkin, D. Mosyundz

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: zylon@ukr.net

Analytical evaluation of areas of research and development was carried out, which enabled an integrated approach to create the conditions for improving the resource efficiency of direct current motors using the capabilities of test facilities and test systems electrical repair companies. Energy method is considered affordable means of solving complex electrical problems to determine the parameters of the load mode.

Key words: electrotechnical complex, energy storage, direct current motor, energy method.

REFERENCES

1. Rodkin D.I. *Dynamic load systems and motor diagnosis at test after repair*. – Moscow: Nedra, 1992. – 236 p. [in Russian]
2. Rodkin D.I., Davidkovich V.M. Evaluating the effectiveness of systems of dynamic loading of asynchronous motors // *Electrical Engineering*. – 1994. – № 11. [in Russian]
3. Davidkovich V.M., Rodkin D.I. Dynamic loading device asynchronous motors for amplitude modulation voltage // *Electrical Engineering*. – 1994. – № 4. – PP. 28–33. [in Russian]
4. Byalobrzhesky A.V., Lomonos A.I. Comparative analysis of methods of forming dynamic loading of DC motors // *Bulletin KSPU: Proceedings KSPU*. – Kremenchuk: KSPU, 2005. – Iss. 3/2005 (32). – PP. 172–177. [in Russian]

5. Lomonos A.I. Justification of choice of power supply systems for the dynamic loading of DC motors // *Bulletin KSPU: Proceedings KSPU*. – Kremenchuk: KSPU, 2005. – Iss. 3/2008 (32). – PP. 163–167. [in Russian]

6. Rodkin D.I., Byalobrzhesky A.V., Lomonos A.I. Indicators of energy processes online with poly harmonic voltage and current // *Electrical Engineering*. – 2004. – № 6. – PP. 37–42. [in Russian]

7. Byalobrzhesky A.V., Lomonos A.I. A study of nonlinear electromechanical converters energy method // *Electrical and Electromechanical Engineering*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2004. – № 1. – PP. 19–22. [in Russian]

Стаття надійшла 12.08.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Садовим О.В.