

УДК 621.313.333

ОЦЕНКА НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин, Н. А. Руденко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: Romashykhin.iurii@gmail.com

Активные и индуктивные сопротивления обмоток ротора, которые являются одними из основных электромагнитных параметров асинхронного двигателя, являются сложными функциями тока ротора. Изменение сопротивлений ротора связано с эффектом вытеснения тока. Большинство существующих методов идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей для эффекта вытеснения тока в роторе нуждаются в наличии информации о геометрических размерах пазов и стержней ротора. В работе предлагается подход к определению параметров двигателя, учитывающий эффект вытеснения тока в роторе в зависимости от тока. Для определения параметров асинхронных двигателей предлагается использовать энергетический метод, в соответствии с которым система идентификации состоит из уравнений баланса мгновенной мощности. Система идентификационных уравнений формируется для принятой эквивалентной схемы замещения, которая учитывает зависимость сопротивления ротора в функции тока. Показано, что предлагаемый подход позволяет определить электромагнитные параметры схемы замещения асинхронного двигателя с учетом эффекта вытеснения тока в роторе с необходимой точностью.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, нелинейные параметры, эффект вытеснения тока.

ОЦІНКА НЕЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Д. Й. Родькін, Ю. В. Ромашихін, М. А. Руденко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: Romashykhin.iurii@gmail.com

Опір ротора, який є одним з основних електромагнітних параметрів асинхронного двигуна, є складною функцією струму ротора. Зміна опору ротора пов'язана з ефектом витіснення струму. Більшість існуючих методів ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів для ефекту витіснення струму в роторі потребують наявності інформації щодо геометричних розмірів пазів і стрижнів ротора. У роботі пропонується підхід до визначення параметрів двигуна, що враховує ефект витіснення струму в роторі залежно від струму. Для визначення параметрів асинхронних двигунів пропонується використовувати енергетичний метод, відповідно до якого система ідентифікації складається з рівнянь балансу миттєвої потужності. Система ідентифікаційних рівнянь формується для прийнятої еквівалентної схеми, яка враховує залежність опору ротора у функції струму. Показано, що запропонований підхід дозволяє визначити електромагнітні параметри асинхронного двигуна з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі з необхідною точністю.

Ключові слова: асинхронний електропривод, нелінійні параметри, ефект витіснення струму.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. История исследований по проблематике частотного асинхронного электропривода насчитывает многие десятилетия – с момента появления теории и освоения производства электрических машин данного класса [1]. В течение первых десятилетий прошлого века по известным причинам преобладали работы по проектированию асинхронных машин и их математическому описанию.

Развитие теории электрических машин сделало возможным исследование путей управления скоростью и моментом асинхронных машин разного класса и исполнения. В этот же период были получены базовые теоретические предпосылки по управлению электрическими машинами, в частности, были обоснованы так называемые законы частотного регулирования асинхронных двигателей (АД) [2, 3]. Техническая база создания частотного электропривода не позволяла осуществить широкое его использование ввиду известных недостатков, присущих известным в то время преобразователям частоты, в основном машинным: большой металлоемкостью,

значительными потерями в преобразовательных агрегатах, низкой управляемостью частотой и напряжением.

Появление вентильных преобразователей в 30-е годы вызвало повышенный интерес к регулируемому электроприводу переменного тока, в том числе и к асинхронному частотно-регулируемому, вентильным каскадам, машинам двойного питания и др. Регулируемый электропривод при этом развивался в основном как привод больших мощностей. Теоретические исследования при этом развивались достаточно интенсивно, касаясь, в частности, вопросов создания систем регулирования частотного асинхронного электропривода, который по своим показателям не уступал бы регулируемому приводу постоянного тока.

Примечательно, что выполняющиеся исследования в основном базировались на асинхронной машине, обладающей параметрами схемы замещения, имеющими линейный характер изменения, т.е. без учета известных на то время нелинейностей.

Появление и освоение полупроводниковой техники дало мощный импульс для ширококомасштабной практической реализации частотно-регулируемого электропривода в народном хозяйстве на базе инверторов напряжения, инверторов тока и непосредственных преобразователей частоты. В ходе реализации этого направления были получены оценки экономической эффективности использования регулируемого электропривода в разных отраслях промышленности для различных технологических механизмов. Указанные задачи в основном были решены при использовании тиристорных преобразователей частоты.

Реализация устройств управления режимами работы асинхронных двигателей на базе полупроводниковых модулей, не требующих специальных устройств коммутации (полностью управляемых полупроводниковых элементов), и создание на их базе высокоэффективных преобразователей частоты позволило сделать вывод о том, что решена проблема частотно-регулируемого электропривода для самых разнообразных сфер применения в техническом плане.

Решение указанной проблемы позволило сконцентрировать внимание несколько на иных направлениях. Здесь следует отметить прежде всего теоретические исследования, касающиеся оптимизации режимов работы асинхронных регулируемых электроприводов при пуске, эффективной работы в разных технологических режимах, снижения потерь энергии как в электродвигателе, так и в технологических устройствах, кинематических передачах и т.п. [2]

Существенно изменился и спектр исследований, касающихся непосредственно самого двигателя. Здесь прежде всего следует отметить, что предметом исследований являются процессы преобразования энергии с учетом присущих в той или иной мере нелинейностей асинхронного двигателя и, как следствие, сложности энергетических процессов преобразования электрической энергии в механическую при работе двигателя с постоянными значениями напряжения и частоты, а также при их регулировании.

Нелинейности параметров схемы замещения асинхронного двигателя – это, в основном, проявление физических свойств и явлений в конструктивных материалах под действием электрических и электромагнитных воздействий, происходящих в процессе преобразования электрической энергии в механическую [4, 5]. Изготовление электрических машин с отсутствием нелинейных свойств практически невозможно ввиду того, что изделие при таком решении проектной задачи может иметь низкие удельные характеристики по весу и стоимости, а также неудовлетворительные динамические показатели и др. В то же время создание электромеханических преобразователей с рациональным или оптимальным использованием активных материалов неизбежно ведет к большему проявлению нелиней-

ных свойств и характеристик электрической машины в тех или иных режимах работы [6, 7]. Хорошо известные особенности электрических машин при их длительной эксплуатации изменяются вследствие несоблюдения тепловых, климатических, эксплуатационных условий и требований, свойств конструкционных материалов, что приводит к изменению свойств электротехнической стали, т.е. к ее старению. Эти свойства прежде всего касаются роста потерь в стали вследствие изменения характеристики намагничивания электротехнической стали, что не может не проявиться на нелинейных характеристиках асинхронного двигателя. Указанное выше, а также другие проявления процесса старения в конечном итоге вызывают изменения энергетических и динамических показателей электрической машины [2, 6, 7].

Наличие нелинейностей в параметрах асинхронной машины влияет на ее механические, а, соответственно, и на эксплуатационные характеристики – на значения пускового и критического моментов, на допустимую механическую нагрузку и др. В этой связи становится понятной потребность в определении реальных характеристик с учетом тех особенностей, которые имеются в электрической машине благодаря физическим свойствам как материалов, так и конструкции двигателя.

Таким образом, становится необходимым учет нелинейностей асинхронной машины как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации в ходе выполнения операций мониторинга состояния оборудования, а также в ходе испытаний их после ремонта.

Знание параметров нелинейностей асинхронных машин востребовано в двух характерных случаях [7]:

- при проектировании машин нового поколения, в частности, предназначенных для регулируемого частотного электропривода с целью реализации систем, обеспечивающих максимальный пусковой момент, максимальную перегрузочную способность, минимальную рабочую температуру при заданной нагрузке и др.;

- при определении полных электромагнитных параметров асинхронного двигателя в ходе производственных испытаний после ремонта или при мониторинге параметров электрооборудования, находящегося в эксплуатации с целью определения реальных значений пускового момента, перегрузочной и нагрузочной способности электродвигателей.

Отмеченное характерно в том отношении, что известные по результатам идентификации параметров электрической машины значения активных и реактивных сопротивлений, как правило, относятся к режиму работы при скольжениях меньше критического, когда некоторые нелинейности асинхронного двигателя не проявляются ввиду их незначительности при частотах 5–7 герц и ниже. Определение значения пускового момента в соответствии с параметрами двигателя, характерными для есте-

ственной характеристики, как правило, связано со значительными ошибками. В этом случае игнорируется факт изменения параметров в пусковом режиме.

Очевидно, что как первый вопрос, так и второй существенно значимы, т.к. при отсутствии полных данных по двигателю невозможно построение системы автоматизированного электропривода, которая бы удовлетворяла требованиям экономичности, надежности и позволяла бы реализовывать специфические требования технологических процессов.

Выше было указано, что нелинейные свойства асинхронного двигателя проявляются при значительных величинах напряжения или тока. Увеличение напряжения на статоре приводит к насыщению стали. При этом важным параметром является не напряжение, а ток намагничивания, зависящий как от напряжения, так и от частоты.

Указанное обстоятельство является наиболее важным, определяющим энергетические характеристики асинхронного двигателя, т.к. оно определяет поток в зазоре машины. Как известно, поток является сложной зависимостью от тока намагничивания, а связь между ними определяется через кривую намагничивания – параметр, фактически не имеющий однозначного математического выражения ввиду зависимости его от свойств электротехнической стали, конструкции электрической машины, условий и срока эксплуатации и т.п.

Другим явлением, определяющим параметры электрической машины, от которого во многих отношениях зависят электромеханические характеристики и, в частности, кратность пускового момента к номинальному, является так называемый поверхностный эффект, проявляющийся во взаимодействии тока в проводнике с магнитным потоком в среде, в которую он помещен. Это, с одной стороны, вытеснение тока магнитным потоком на поверхность проводника, а с другой – формирование вихревых токов в токопроводящем материале тела ротора (листы стали, обмотка ротора) при изменении основного потока. Вихревые токи, с одной стороны, приводят к росту потерь, а с другой – создают соответствующие потоки, направленные навстречу основному потоку.

Указанные явления проявляются при значительной энергонапряженности вследствие протекания процессов преобразования энергии: значительной напряженности магнитного поля магнитной системы (значительных токах возбуждения или токах намагничивания асинхронного двигателя); при существенно превышающих номинальные значения токах ротора; при изменении характеристик электротехнической стали до таких уровней, при которых проявление вихревых токов существенно. Отмеченное говорит в пользу того, что упомянутое проявление специфических явлений – проявление нелинейных свойств как элементов конструкции асинхронной машины, так и изделия в целом.

Развитие направлений теоретических исследований, направленных на достижение определенного эффекта при работе асинхронного двигателя:

- определение параметров асинхронной машины с минимальными массогабаритными показателями;
- минимизация потерь мощности при регулировании скорости вращения двигателя при разных зависимостях статического момента;
- минимизация потребляемой реактивной мощности от источника питания при различных зависимостях статического момента от скорости;
- получение максимально возможного пускового момента;
- получение максимальной перегрузочной способности.

Получение указанных свойств системы управления, как и некоторых других, возможно только с учетом тех нелинейностей, которые проявляются при управлении напряжением и частотой с тем законом, который вытекает из решаемой задачи. Своеобразие и сложность решаемых задач объясняется не только сложностью математического описания асинхронного двигателя с учетом присущих ему нелинейностей, но и особенностями (в том числе и нелинейными свойствами) технологических механизмов.

В последние 10–15 лет вышло большое число работ, посвященных разным аспектам решения задач, связанных с получением режимов и характеристик, приближающихся к оптимальным в результате учета тех или иных нелинейных свойств материалов в конструкции асинхронных машин. Значительное число работ посвящено определению характеристик двигателей с учетом нелинейностей, характеризующих свойства электрических машин [6–13].

Достаточно интересным является подход к вопросу проектирования асинхронных двигателей, предназначенных для работы в составе асинхронного частотного электропривода. При этом учитываются: нелинейности, обусловленные насыщением магнитной системы (изменение параметров контура взаимной индукции); нелинейные зависимости сопротивления ротора и его индуктивности от тока и частоты (эффект вытеснения тока в проводниках ротора); нелинейности, связанные с насыщением верхних слоев зубцовой зоны статора и ротора (из-за проявления вихревых токов), и, естественно, изменение параметров двигателя в результате изменения частоты источника питания. Механизм взаимодействия упомянутых явлений представляется в форме математической модели, позволяющей определить характеристики электрической машины в любых возможных режимах работы двигателя, выбрать необходимые конструктивные параметры для заданных условий работы и ограничений, связанных с энергетическими характеристиками.

В исследованиях ряда авторов [6–13] получены результаты влияния отдельных проявлений нелинейных свойств, например, насыщения стали, т.е. учета нелинейности кривой намагничивания и па-

раметров петли гистерезиса на параметры асинхронного двигателя. При этом характерно, что учет потерь в стали, как проявление активного сопротивления контура намагничивания, осуществляется путем учета эквивалентного сопротивления, включенного последовательно с индуктивностью [14] или включением звена, моделирующего стационарную кривую намагничивания [7].

Опыт показывает, однако, что потери в стали, определяемые таким путем, как правило ниже тех значений, которые характерны для асинхронных машин при глубоком насыщении стали. Этот режим соответствует работе асинхронной машины за коленом кривой намагничивания – вполне реальный режим, получаемый при частотном управлении, – при реализации задач частотного управления экстремального характера.

Исследованиям аномальных потерь в стали при глубоком ее насыщении посвящено большое число работ как отечественных [15–17], так и зарубежных [18, 19] авторов. При этом если авторы [19] объясняют существенный рост потерь влиянием особенностей поведения доменных структур ферромагнетика, что также связано с появлением нелинейности иного характера (не указанного выше), то зарубежные авторы идут другим путем – модифицируют определенным образом известную зависимость для потерь в стали Штейнмеца таким образом, чтобы результаты, получаемые экспериментальным путем для образцов стали, совпадали с расчетными величинами по модифицированным зависимостям.

Подводя итог сказанному, следует отметить, что в центре внимания ученых и специалистов по проектированию специализированных асинхронных машин для частотного регулирования их скорости находятся режимы, в которых наиболее полно проявляются нелинейные свойства конструктивных материалов. Это существенно усложняет как сами исследования, так и практическое использование полученных результатов при создании систем электропривода по причине очевидного усложнения алгоритмов и программ управления.

Самостоятельная часть задачи учета нелинейных свойств асинхронных двигателей относится к сфере идентификации их параметров при их послеремонтных испытаниях и мониторинге состояния электрических машин в ходе их текущей эксплуатации. Большое количество методов определения параметров асинхронных двигателей (известных и широко применяемых на практике) не позволяют осуществить оценку нелинейных характеристик и свойств электрических машин данного класса [20].

При этом в основном определяются параметры линейной части характеристики асинхронного двигателя: активные сопротивления статора и ротора, сопротивления контура намагничивания. Упомянутые параметры в основном используются для практических целей, в частности, для построения систем управления и регулирования. Определение пускового момента и, в меньшей степени, критического че-

рез указанные параметры по известным зависимостям и схемам замещения, как правило, сопряжено со значительными ошибками ввиду того, что расчетные зависимости не учитывают явлений, связанных с нелинейными свойствами асинхронных машин, в частности, вытеснения тока в цепи ротора. В равной степени неизбежны ошибки и в определении режима работы асинхронной машины при повышенном напряжении питания.

Целью работы является обоснование возможности учета эффекта вытеснения тока при определении электромагнитных параметров асинхронных двигателей.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Интерес к вопросу определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей существенно вырос в конце 80-х годов прошлого столетия в связи с освоением статических преобразователей частоты для целей регулируемого электропривода переменного тока общепромышленного применения. В это время появилось большое число работ, посвященных определению активных сопротивлений и индуктивностей применительно к упрощенным и детальным схемам замещения [21]. Наиболее простые решения получены при использовании так называемых Г-образных схем замещения с вынесенным на сетевые зажимы контура намагничивания; более точные результаты получены при использовании так называемой Т-образной схемы замещения, в которой контур намагничивания включен на «зажимы» ЭДС в зазоре, благодаря чему ток намагничивания зависит от падения напряжения в цепи статора. Для многочисленных работ, посвященных анализируемому вопросу, общим для большинства из них является анализ схемы замещения с линейными (постоянными) значениями входящих в нее составляющих и индуктивных сопротивлений. Это удовлетворяло в определенной мере те требования, которые вытекали из практической, прежде всего, потребности – построения достаточно простых, но вполне работоспособных систем управления частотным асинхронным электроприводом.

Как показывает анализ, имеется несколько вполне очевидных факторов, благодаря которым интерес к обсуждаемому вопросу до настоящего времени не только не ослабевает, но и заметно смещается в сторону детализации отдельных сторон. Это вытекает непосредственно из того, что новые, важные результаты по созданию качественных систем регулирования частотой вращения, повышения качества систем электропривода, оценки ресурса работоспособности электрических машин, входящих в систему электропривода, могут быть получены при использовании более сложных моделей-схем замещения асинхронных двигателей. Здесь акцент ставится на известных положениях, касающихся нелинейных свойств АД как конструкции, включающей систему обмоток со сталью, благодаря чему постоянство электромагнитных параметров двигате-

ля можно принимать лишь с возможными большими ошибками.

Проявление нелинейных свойств элементов двигателя, как правило, связано с изменением потоков энергии, преобразуемых в электромагнитной системе электрической машины. Наиболее характерные нелинейности асинхронного двигателя проявляются в таких режимах:

- увеличения тока намагничивания в результате увеличения напряжения при постоянной частоте, при уменьшении частоты при неизменном напряжении, при одновременном изменении напряжения и частоты соответствующим образом;
- изменения активного сопротивления ротора из-за явления вытеснения тока ротора из его проводников при скольжениях, близких к единице;
- изменения индуктивного сопротивления рассеяния ротора из-за явления поверхностного эффекта, вызывающего вытеснение тока ротора;
- изменения сопротивления, отвечающего за потери в стали. Последние исследования [19] показывают на сложную зависимость потерь в стали от степени насыщения стали – явление, неизбежно присутствующее при частотном управлении асинхронными двигателями и генераторами в режимах минимизации потерь.

Исследованию поведения асинхронной машины в режимах, отмеченных выше, посвящено большое число работ [20], затрагивающих, преимущественно, одну из перечисленных особенностей работы асинхронной машины, – проявление нелинейных свойств, главным образом, в режимах со значительными энергетическими нагрузками (пуск двигателя с питанием от сети, насыщение стали и др.). Комплексное исследование асинхронной машины с учетом значительного числа нелинейностей практически отсутствует в основном из-за сложности математического описания процессов в нелинейных элементах.

Сфера использования результатов, которые необходимо получить при анализе процессов в нелинейностях электрической машины, достаточно обширна (рис. 1) и затрагивает разные стороны практического применения электромеханических систем. Особенно следует отметить область повышения энергетических показателей промышленных электроприводов, определение ресурса работоспособности электромеханических преобразователей – электродвигателей из-за несогласованности параметров нагрузки и приводных двигателей, изменения их параметров в процессе эксплуатации или из-за влияния особенностей технологий капитального ремонта электродвигателей. Указанные изменения характеристик даже в незначительном весе могут оказывать существенное влияние на температурный режим электрической машины и, в конечном итоге, на допустимую нагрузку, расчетный срок эксплуатации и т.п.

Здесь подчеркнем очень важное, первостепенное значение того факта, что нелинейности асинхронной

машины проявляются только при энергонасыщенном состоянии элементов конструкции: насыщении стали машины, увеличенных потерях в стали, значительных токовых нагрузках.

Сказанное носит принципиальный характер в том отношении, что при определении параметров асинхронных машин возможны ошибочные результаты при использовании экспериментальных данных режима холостого хода или близкого к нему. Так, например, параметры нелинейности кривой намагничивания могут быть получены при токах возбуждения, превышающих номинальный, данные по вытеснению тока из стержней ротора могут быть получены только в режимах работы, достаточно близких к пусковому.

Отмеченное позволяет сделать вывод о том, что при определении параметров асинхронных короткозамкнутых двигателей, учитывающих влияние указанных выше явлений, необходимо осуществление нескольких последовательных экспериментов с разными значениями энергетических состояний элементов конструкции машины. Усреднение параметров, полученных для разных значений энергонапряженности, вряд ли допустимо, т.к. задача определения параметров короткозамкнутых двигателей должен быть таким, по которым можно определить значения моментов при пуске наряду с определением параметров двигателя, где указанные явления насыщения не оказывают существенного влияния. Последние характерны не для пусковых режимов, а для работы двигателя на естественной характеристике.



Рисунок 1 – Области использования электромагнитных параметров

Показательными являются данные по электромагнитным параметрам, приведенные в [25] для двигателей от 0,25 до 110 кВт, где приведены параметры двигателей на естественной характеристике; пусковой момент двигателя, определенный по таким параметрам, существенно ниже того значения, которое определяется путем умножения номинального момента на кратность пускового момента. При этом следует учесть, что сказанное относится не к глубо-

копазным двигателям, а к двигателям общепромышленного применения.

Таким образом, определение параметров асинхронных двигателей, включая и его пусковые характеристики, являются не менее важной задачей, чем практические расчеты характеристик с учетом реальных размеров магнитной системы и обмоточных данных. Эта задача относится к ряду идентификационных и может базироваться на тех методах, которые хорошо известны. При этом предпочтение следует отдавать тем методам, которые реализуются путем тестового воздействия на цепь статора от источника синусоидального напряжения.

Указанным требованиям в полной мере отвечает энергетический метод идентификации, разработанный авторами [14].

Анализ рассчитанных с использованием Т-образной схемы замещения механических характеристик [21] показал, что значение пускового момента (M_{np}) не соответствует каталожному ($M_{нк} = k_n M_n$, где k_n – кратность пускового момента согласно каталожным данным; M_n – номинальный момент двигателя), определяемому путем механического нагружения. Это расхождение связано с увеличением активного сопротивления ротора под действием эффекта вытеснения тока, что приводит к увеличению пускового момента. Это объясняется тем, что в каталожных данных приводятся значения параметров АД, определенные для рабочего участка механической характеристики, на величину которых влияние эффекта вытеснения тока практически не оказывает влияния, в отличие от пусковых режимов, когда действие указанного эффекта максимально. В связи с этим необходимо учитывать увеличение активного сопротивления ротора из-за проявления эффекта вытеснения тока как во время пуска АД ($s = 1$), так и при $s > s_k$.

Анализ литературных источников [22] показал, что активное сопротивление ротора имеет нелинейный характер изменения из-за влияния эффекта вытеснения тока и может быть аппроксимировано полиномом четной степени:

$$R = R_0 + k_{R2}I^2 + k_{R4}I^4 + \dots + k_{Rn}I^n, \quad (1)$$

где R_0 – активное сопротивление без учета его изменения за счет нелинейности; k_{Rn} – коэффициенты аппроксимации нелинейного активного сопротивления.

Детальное и сложное представление зависимости активного сопротивления ротора от тока статора является отдельным направлением исследования и не относится к концептуальному вопросу, рассматриваемому в данной работе.

При этом с достаточной точностью полином для описания активного сопротивления ротора может быть ограничен второй степенью:

$$R_2 = R_{20} + k_r I_2^2. \quad (2)$$

Эффект вытеснения тока в роторе при пуске оказывает влияние и на величину индуктивного сопротивления, которое также может быть выражено нелинейной зависимостью от тока [22]:

$$L_2 = L_{20} - k_l I_2^2, \quad (3)$$

где L_{20} – индуктивность ротора без учета эффекта вытеснения тока; k_l – коэффициент, учитывающий влияния эффекта вытеснения тока в роторе.

Определение ЭМП АД с учетом зависимостей (2) и (3) возможно с использованием энергетического метода. Этот метод основан на использовании полных уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности [7].

Основой энергетического метода являются уравнения баланса мощностей как следствие теоремы Телленджена. Баланс мощностей определяют равенство мощности источника питания $p_u(t)$ и сумм мощностей всех потребителей [23]:

$$p_u(t) = \sum_{i=1}^H p_i(t),$$

где i – индекс соответствующего потребителя; H – количество потребителей.

Применительно к АД в качестве потребителей выступает каждый из элементов схемы замещения (рис. 2), т.е. потребителями являются активные сопротивления и индуктивности соответствующих цепей схемы замещения.

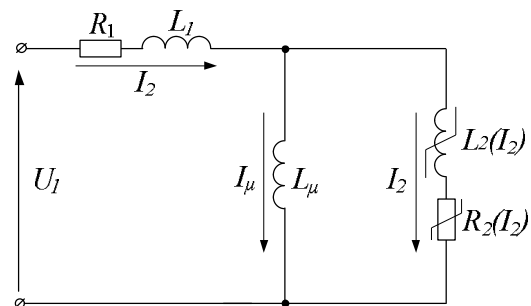


Рисунок 2 – Схема замещения АД для учета эффекта вытеснения тока в роторе

Составляющие мгновенной мощности получают в результате перемножения полигармонических сигналов напряжения и тока [7]. При этом с помощью преобразования Фурье сигналы напряжения и тока можно представить рядами [24]:

$$u(t) = \sum_{n=0}^N U_n \cos(n\Omega t - \psi_n); \quad (4)$$

$$i(t) = \sum_{m=0}^M I_m \cos(m\Omega t - \varphi_m), \quad (5)$$

где m – номер гармоники тока; M – число гармоник тока; Ω – круговая частота сети; φ_m – угол сдвига фаз гармоник тока; n – номер гармоники напряжения; N – число гармоник напряжения; ψ_n – угол сдвига фаз гармоник напряжения.

Преобразование упомянутых сигналов напряжения и тока позволяет представить их в следующем виде:

$$u(t) = \sum_{n=0}^N U_n \cos(\psi_n) \cos(n\Omega t) + \sum_{n=0}^N U_n \sin(\psi_n) \sin(n\Omega t) = \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) + \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t); \quad (6)$$

$$i(t) = \sum_{m=0}^M I_m \cos(\varphi_m) \cos(m\Omega t) + \sum_{m=0}^M I_m \sin(\varphi_m) \sin(m\Omega t) = \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \sum_{m=0}^M I_{mb} \sin(m\Omega t), \quad (7)$$

где I_{ma} , I_{mb} – амплитудные значения косинусных и синусных составляющих тока высших гармоник; U_{na} , U_{nb} – амплитудные значения косинусных и синусных составляющих напряжения высших гармоник.

Тогда уравнения баланса мгновенной мощности, составленные применительно к Т-образной схеме замещения АД, имеют вид [7]:

$$P_u(t) = p_{R_1}(t) + p_{R_2}(t) + p_{L_1}(t) + p_{L_2}(t) + p_{L_\mu}(t), \quad (8)$$

где $p_{R_1}(t)$, $p_{R_2}(t)$, $p_{L_1}(t)$, $p_{L_2}(t)$, $p_{L_\mu}(t)$ – значения мгновенных мощностей линейных элементов схемы замещения, определяемых в соответствии с [7]:

– источника полигармонического напряжения

$$p_u(t) = u(t)i(t);$$

– для активного сопротивления $p_R(t) = i^2(t)R$;

– для индуктивности $p_L(t) = Li(t)di(t)/dt$.

При формировании уравнений баланса мощностей следует выделить составляющие мгновенной мощности на нелинейных элементах схемы замещения, которые учитывают эффект вытеснения тока в роторе.

Мгновенная мощность на нелинейном активном сопротивлении ротора для учета эффекта вытеснения тока определяются в виде

$$p(t) = i_2^2(t)R_2(i_2(t)) = i_2^2(t)(R_{20} + k_r i_2^2(t)), \quad (9)$$

где $i_2(t)$ – ток ротора.

$$i_2(t) = \sum_{m=1}^M (I_{2am} \cos m\Omega t + I_{2bm} \sin m\Omega t), \quad (10)$$

I_{2am} – косинусные составляющие m -ой гармоники тока ротора; I_{2bm} – синусные составляющие m -ой гармоники тока ротора.

Мгновенная мощность на нелинейной индуктивности ротора для учета эффекта вытеснения тока определяются в виде:

$$p_L(t) = L_2(i_2(t))i_2(t)\frac{di_2(t)}{dt} + i_2^2(t)\frac{dL_2(i_2(t))}{dt} = (L_{20} - k_l i_2^2(t))i_2(t)\frac{di_2(t)}{dt} + i_2^2(t)\frac{d(L_{20} - k_l i_2^2(t))}{dt}. \quad (11)$$

Следует отметить, что выражения (9) и (11) содержат составляющие $i_2^2(t)$. Поэтому для упрощения выражений мгновенной мощности на указанных нелинейных элементах определим выражения для составляющих $i_2^2(t)$:

$$i_2^2(t) = \left(I_{2a1} \cos \Omega t + I_{2b1} \sin \Omega t + I_{2a3} \cos 3\Omega t + I_{2b3} \sin 3\Omega t + I_{2a5} \cos 5\Omega t + I_{2b5} \sin 5\Omega t \right)^2 = A_0 + A_2 \cos 2\Omega t + B_2 \sin 2\Omega t + A_4 \cos 4\Omega t + B_4 \sin 4\Omega t + A_6 \cos 6\Omega t + B_6 \sin 6\Omega t + A_8 \cos 8\Omega t + B_8 \sin 8\Omega t + A_{10} \cos 10\Omega t + B_{10} \sin 10\Omega t,$$

где

$$A_0 = \frac{1}{2}(I_{2a1}^2 + I_{2b1}^2 + I_{2a3}^2 + I_{2b3}^2 + I_{2a5}^2 + I_{2b5}^2);$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(I_{2a1}^2 - I_{2b1}^2 + I_{2a1}I_{2a3} + I_{2b1}I_{2b3} + I_{2a1}I_{2a5} + I_{2a3}I_{2a5} + I_{2b1}I_{2b3} + I_{2b3}I_{2b5} + I_{2a3}I_{2a5} + I_{2b3}I_{2b5});$$

$$B_2 = \frac{1}{2}(2I_{2a1}I_{2b1} + I_{2a1}I_{2b3} - I_{2a3}I_{2b1} - I_{2a3}I_{2b1} + I_{2a3}I_{2b5} + I_{2a1}I_{2b3} - I_{2a5}I_{2b3} - I_{2a5}I_{2b3} + I_{2a3}I_{2b5});$$

$$A_4 = \frac{1}{2}(I_{2a1}I_{2a3} + I_{2a1}I_{2a5} - I_{2b1}I_{2b3} + I_{2b1}I_{2b5} + I_{2a1}I_{2a3} - I_{2b1}I_{2b3} + I_{2a1}I_{2a5} + I_{2b1}I_{2b5});$$

$$B_4 = \frac{1}{2}(I_{2a1}I_{2b3} + I_{2a1}I_{2b5} + I_{2a3}I_{2b1} - I_{2a5}I_{2b1} + I_{2a3}I_{2b1} + I_{2a1}I_{2b3} - I_{2a5}I_{2b1} + I_{2a1}I_{2b5});$$

$$A_6 = \frac{1}{2}(I_{2a3}^2 - I_{2b3}^2 + I_{2a1}I_{2a5} - I_{2b1}I_{2b5} + I_{2a1}I_{2a5} - I_{2b1}I_{2b5});$$

$$B_6 = \frac{1}{2}(2I_{2a3}I_{2b3} + I_{2a1}I_{2b5} + I_{2a5}I_{2b1} + I_{2a5}I_{2b1} + I_{2a1}I_{2b5});$$

$$A_8 = \frac{1}{2}(I_{2a3}I_{2a5} - I_{2b3}I_{2b5} + I_{2a3}I_{2a5} - I_{2b3}I_{2b5});$$

$$B_8 = \frac{1}{2}(I_{2a3}I_{2b5} + I_{2a5}I_{2b3} + I_{2a5}I_{2b3} + I_{2a3}I_{2b5});$$

$$A_{10} = \frac{1}{2}(I_{2a5}^2 - I_{2b5}^2);$$

$$B_{10} = \frac{1}{2}(2I_{2a5}I_{2b5}).$$

С учетом приведения подобных указанные составляющие в общем виде:

$$A_0 = \frac{1}{2} \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M \left(I_{2am_1}^2 - I_{2bm_1}^2 + 2I_{2am_1}I_{2bm_2} \right)_{m_1=m_2}, \quad (12)$$

$$A_m = \frac{1}{2} \left(\sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M 2I_{2am_1}I_{2am_2} - \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M 2I_{2bm_1}I_{2bm_2} + \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M 2I_{2bm_1}I_{2bm_2} + \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M (I_{2am_1}^2 - I_{2bm_1}^2) \right) \cos m\Omega t;$$

$$B_m = \frac{1}{2} \left(\sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M 2I_{2am_1} I_{2bm_2} + \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M 2I_{2bm_1} I_{2am_2} - \sum_{\substack{m_1 < m_2 \\ m=m_2 \pm m_1}} 2I_{2am_1} I_{2bm_2} - \sum_{\substack{m_1 < m_2 \\ m=m_2 - m_1}} 2I_{2bm_1} I_{2am_2} \right) \sin m\Omega t,$$

где $m = m_1 + m_2$; $m = m_2 - m_1$; $m_1 < m_2$.

Составляющие мгновенной мощности на нелинейном активном сопротивлении ротора для учета эффекта вытеснения тока определяются в виде:

$$P_{0R2} = A_0(R_{20} + k_r A_0) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \left(k_r A_m^2 + k_r B_m^2 \right); \quad (13)$$

$$P_{kaR2} = \frac{1}{2} k_r \left(\sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=n \pm m \\ m < n}}^N 2A_m A_n - \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=n+m \\ m < n}}^N 2B_m B_n + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=n-m \\ m < n}}^N 2B_m B_n + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=m-n \\ m < n}}^N (A_m^2 - B_m^2) \right) \cos k\Omega t;$$

$$P_{kbR2} = \frac{1}{2} k_r \left(\sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=n \pm m \\ m < n}}^N 2A_m B_n + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n \\ m < n}}^N 2B_m A_n - \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=n-m \\ m < n}}^N 2B_m A_n + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=m-n \\ m < n}}^N A_m B_m \right) \sin k\Omega t,$$

где $k = m + n$; $k = n - m$; $m < n$.

Составляющие мгновенной мощности на нелинейной индуктивности ротора для учета эффекта вытеснения тока определяются в виде:

$$P_{0L2} = L_{20} A_0; \quad (14)$$

$$P_{kaL2} = L_{20} A_m + k_r \Omega \left(-k A_0 B_n + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n| \\ n > m}}^N \left(-\frac{k}{2} A_m B_n + \frac{k}{2} A_m B_n - \frac{k}{2} A_m B_n - k A_m B_n \right) \right);$$

$$P_{kbL2} = L_{20} B_n + k_r \Omega \left(-k A_0 A_m + \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m \pm n| \\ k=|m-n|}}^N \left(\frac{k}{2} A_m A_n + \frac{k}{2} B_m B_n - \frac{k}{2} B_m B_n - \frac{k}{2} (A_m^2 - B_n^2) \right) \right).$$

Частоты гармоник мгновенной мощности (k) формируются в результате перемножения гармоник напряжения (n) и тока (m) [7]. Частоты гармоник мгновенной мощности определяются: $k = m \pm n$. Например, вторая гармоника мгновенной мощности ($k = 2$) при наличии в сигналах напряжения и тока гармоник с номерами $m = n = 1, 3, 5$ формируется суммой или разностью рассматриваемых гармоник,

$$\begin{aligned} \text{т.е.} \quad k = m + n = 1 + 1 = 2; \quad k = m - n = 3 - 1 = 2; \\ k = m - n = 5 - 3 = 2. \end{aligned}$$

Особенность выбора гармоник напряжения и тока и формирования составляющих гармоник мгновенной мощности на элементах схемы замещения АД детально изложены в [7].

В соответствии с вышеизложенным, при использовании трех гармоник напряжения и тока (например, $m = n = 1, 3, 5$) уравнения баланса составляющих гармоник мгновенной мощности примут вид:

$$\begin{aligned} P_{0u\Sigma} &= P_{0R_1} + P_{0R_2}; \\ P_{2au\Sigma} &= P_{2aR_1} + P_{2aR_2} + P_{2aL_1} + P_{2aL_\mu} + P_{2aL_2}; \\ P_{2bu\Sigma} &= P_{2bR_1} + P_{2bR_2} + P_{2bL_1} + P_{2bL_\mu} + P_{2bL_2}; \\ P_{4au\Sigma} &= P_{4aR_1} + P_{4aR_2} + P_{4aL_1} + P_{4aL_\mu} + P_{4aL_2}; \\ P_{4bu\Sigma} &= P_{4bR_1} + P_{4bR_2} + P_{4bL_1} + P_{4bL_\mu} + P_{4bL_2}; \\ P_{6au\Sigma} &= P_{6aR_1} + P_{6aR_2} + P_{6aL_1} + P_{6aL_\mu} + P_{6aL_2}; \\ P_{6bu\Sigma} &= P_{6bR_1} + P_{6bR_2} + P_{6bL_1} + P_{6bL_\mu} + P_{6bL_2}; \\ P_{8au\Sigma} &= P_{8aR_1} + P_{8aR_2} + P_{8aL_1} + P_{8aL_\mu} + P_{8aL_2}; \\ P_{8bu\Sigma} &= P_{8bR_1} + P_{8bR_2} + P_{8bL_1} + P_{8bL_\mu} + P_{8bL_2}; \\ P_{10au\Sigma} &= P_{10aR_1} + P_{10aR_2} + P_{10aL_1} + P_{10aL_\mu} + P_{10aL_2}; \\ P_{10bu\Sigma} &= P_{10bR_1} + P_{10bR_2} + P_{10bL_1} + P_{10bL_\mu} + P_{10bL_2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для исследования использовалась математическая модель, которая содержала источник синусоидального напряжения для задания необходимого уровня напряжения на двигателе, Т-образную схему замещения исследуемого АД, датчики для измерения сигналов напряжения и тока статора.

Измерялись значения напряжения и тока статора для различных уровней напряжения (220, 180, 120, 40 В). Наличие гармоник в сигнале тока при питании от источника синусоидального напряжения объясняется учетом эффекта вытеснения тока в роторе в виде нелинейности активного или индуктивного сопротивления ротора Т-образной схемы замещения АД. С использованием рассмотренного математического аппарата определялись значения составляющих гармоник мгновенной мощности на элементах схемы замещения (рис. 2). Составлялась система идентификационных уравнений для рассчитанных составляющих гармоник мгновенной мощности. Решение системы идентификационных уравнений находилось с использованием численного квази-ньютоновского метода.

В соответствии с вышеизложенным, с помощью математической модели рассчитывались электромагнитные параметры асинхронного двигателя со следующими номинальными параметрами: номинальная мощность 4 кВт; номинальное напряжение 220 В; номинальный ток 8,7 А; $R_1=1,35$ Ом; $L_1=0,00676$ Гн; $L_\mu=0,246$ Гн; $R_{20}=1,38$ Ом; $L_{20}=0,00678$ Гн. Значения коэффициентов $k_R=0,00138$ Ом/А², $k_L=1 \cdot 10^{-6}$ Гн/А². Результаты идентификации приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 – Расчетные значения токов асинхронного двигателя

Измеренные значения токов (А)						
Параметр	Номер гармоники					
	косинусных составляющих			синусных составляющих		
	1	3	5	1	3	5
Гармоники тока статора I_1 при напряжении статора 220 В	27 514	-0,687	0,052	25,958	-1,11	0,072
Гармоники тока статора I_1 при напряжении статора 180 В	24,483	-0,569	0,034	21,133	-0,603	0,021
Гармоники тока статора I_1 при напряжении статора 120 В	18,281	-0,259	$7,011 \cdot 10^{-3}$	13,695	-0,146	$-1,983 \cdot 10^{-3}$
Гармоники тока статора I_1 при напряжении статора 40 В	6,696	-0,013	$-2,293 \cdot 10^{-4}$	4,329	$-4,2 \cdot 10^{-3}$	$-9,137 \cdot 10^{-4}$
Расчетные значения токов асинхронного двигателя (А)						
Гармоники тока намагничивания I_μ при напряжении статора 220 В	1,807	-0,312	0,014	1,24	0,029	-0,01
Гармоники тока намагничивания I_μ при напряжении статора 180 В	0,994	-0,179	$-2,231 \cdot 10^{-3}$	0,107	-0,162	$-3,083 \cdot 10^{-3}$
Гармоники тока намагничивания I_μ при напряжении статора 120 В	-0,597	0,083	$7,753 \cdot 10^{-4}$	3,359	-0,057	$8,71 \cdot 10^{-4}$
Гармоники тока намагничивания I_μ при напряжении статора 40 В	-0,284	$-4,0 \cdot 10^{-3}$	$-4,25 \cdot 10^{-4}$	0,551	$-1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,646 \cdot 10^{-4}$
Гармоники тока ротора I_2 при напряжении статора 220 В	25,707	-0,375	0,038	24,718	-1,139	0,082
Гармоники тока ротора I_2 при напряжении статора 180 В	23,489	-0,39	0,036	21,026	-0,441	0,024
Гармоники тока ротора I_2 при напряжении статора 120 В	18,878	-0,342	$6,236 \cdot 10^{-3}$	10,336	-0,089	$-2,854 \cdot 10^{-3}$
Гармоники тока ротора I_2 при напряжении статора 40 В	6,98	$-8,9 \cdot 10^{-3}$	$-1,868 \cdot 10^{-4}$	3,778	$-4,1 \cdot 10^{-3}$	$-1,078 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2 – Идентифицируемые значения параметров схемы замещения двигателя

Параметр	Идентифицируемые параметры			
	220	180	120	40
Величина напряжения статора, В	220	180	120	40
Индуктивность контура намагничивания L_μ , Гн	0,248	0,248	0,248	0,246
Индуктивность статора L_1 , Гн	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$6,75 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность ротора L_2 , Гн	$5,435 \cdot 10^{-3}$	$5,795 \cdot 10^{-3}$	$6,286 \cdot 10^{-3}$	$6,707 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление ротора R_2 , Ом	3,235	2,74	2,06	1,463
Коэффициент k_R , Ом/А ²	$1,359 \cdot 10^{-3}$	$1,315 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$1,314 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент k_L , Гн/А ²	$0,9853 \cdot 10^{-6}$	$0,9525 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$1,162 \cdot 10^{-6}$

Адекватность полученных результатов определялась по результатам сравнения данных моделирования и расчетных кривых тока статора. Максимальная погрешность определения параметров для рассматриваемого двигателя составляет 3,76 %. Степень совпадения оценивалась по коэффициенту детерминации R^2 , который равен 0,998.

Для практических целей удобно пользоваться зависимостями активного сопротивления и индуктивности от напряжения питания для уточнения пусковых и энергетических характеристик, построения моделей и т.д. Зависимость активного сопротивления ротора, индуктивности ротора и эффективного значения первой гармоники тока ротора от напряжения питания представлены на рис. 3–5. Из анализа указанных зависимостей видно, что в зависимо-

сти от тока ротора (рис. 5) меняются значения активного сопротивления (рис. 3) и индуктивности (рис. 4) ротора.

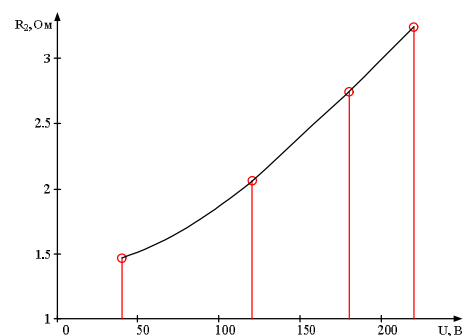


Рисунок 3 – Зависимость активного сопротивления ротора от напряжения питания

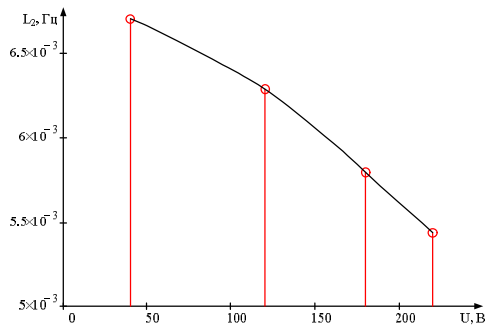


Рисунок 4 – Зависимость индуктивности ротора от напряжения питания

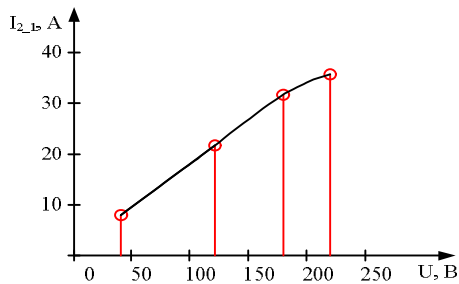


Рисунок 5 – Зависимость эффективного значения первой гармоники тока ротора от напряжения питания

Таким образом, анализ полученных результатов показал, что энергетический метод позволяет определять параметры АД с учетом эффекта вытеснения тока в роторе и подтверждает предположение о возможности учета эффекта вытеснения в активном сопротивлении и индуктивности ротора.

ВЫВОДЫ. Явление насыщения стали, вытеснения тока из проводников ротора, действие вихревых токов – это результат энергетического воздействия на электротехнические материалы в процессе преобразования энергии. Оценка влияния упомянутых явлений возможна при качественном и полном учете особенностей процессов преобразования энергии. Упомянутые явления непосредственно относятся к проявлению нелинейных свойств в характеристиках АД.

Так как нелинейности проявляются только при определенных условиях энергетического воздействия, то математическая интерпретация энергопроцессов является естественной базой для создания методов идентификации параметров АД, в частности, – энергетического метода.

На современном этапе совершенствования математического описания асинхронных машин как аппарата с нелинейными свойствами и характеристиками возрастает значимость приемлемого, точного описания нелинейных характеристик по результатам математической обработки экспериментальных данных, которые могут быть получены с использованием создаваемых для этих целей методов и технических средств их реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogozin G.G. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока: новые экспериментальные методы. – К.: Издательство «Техника», 1992. – 168 с.
2. Сабинин Ю.А., Грузов В.Л. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
3. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
4. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода: учеб. пособие. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
5. Родькин Д.И. Актуальные вопросы теории и практики энергоресурсосберегающих электромеханических систем // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 3 (50), част. 1. – С. 8–17.
6. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть вторая. Машины переменного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
7. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Ромашин Ю.В., Черный А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей: монография. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2013. – 164 с.
8. Livadaru L., Simion A., Munteanu A. et al. Dual Cage High Power Induction Motor with Direct Start-up. Design and FEM Analysis // Advances in Electrical and Computer Engineering. – Iss. 5/2013 (31). – PP. 55–58.
9. Park J., Kim B., Yang J. et al. Evaluation of the detectability of broken rotor bars for double squirrel cage rotor induction motors // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Iss. 10/2010. – PP. 2493–2500.
10. Popenda A. Model-simulation investigations of induction motor with the consideration of skin effect in rotor bars // Przegląd elektrotechniczny. – R. 88 NR 12b/2012. – PP. 29–31. – ISSN 0033-2097.
11. Benecke M., Doebbelin R., Griepentrog G., Lindemann A. Skin effect in squirrel cage rotor bars and its consideration in simulation of non-steady-state operation of induction machines. Piers online. – Iss. 7/2011 (5). – PP. 421–425.
12. Шестат Б., Хелдун А. Минимизация потерь энергии в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором при векторном управлении // Электричество, 2004. – Вып. 12. – С. 31–37.
13. Виноградов А.Б. Моделирование динамических процессов частотно-управляемого асинхронного двигателя с учетом потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта // Изв. Вузов. Электромеханика. – 2005. – Вып. 3. – С. 38–43.
14. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашин Ю.В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электроприводы переменного тока: труды международной 14 НТК. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2007. – С. 273–278.

15. Steinmetz C. On the law of hysteresis // *Proceedings of the IEEE*. – 1984. – Iss. 72 (2). – PP. 197–221.

16. Reinert J., Brockmeyer A., Doncker R.D. Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – Iss. 37/2001 (4). – PP. 1055–1061.

17. Hilzinger R., Rodewald W. *Magnetic materials fundamentals, products, properties, applications*. – Erlangen: Publicis, 2013. – ISBN: 9783895783524.

18. Кандаурова Г.С., Пашко А.Г., Осадченко В.Х. Влияние параметров гармонического магнитного поля на динамические петли гистерезиса и доменную структуру пленки феррита-граната // *Физика твердого тела*. – 2009. – Т. 51. – Вып. 5. – С. 911–915.

19. Родькин Д.И., Огарь В.А., Ченчевой В.В. Природа аномального роста потерь в электротехнической стали в режиме глубокого насыщения // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*. – Кременчук: Кременчуцький національний універ-

ситет імені Михайла Остроградського, 2014. – Вып. 1 (25). – С. 76–93.

20. Ромашихин Ю.В. Классификация и эффективность методов определения электромагнитных параметров машин переменного тока // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КДУ, 2008. – Вып. 4/2008 (4). – С. 26–30.

21. Копылов И.П. *Справочник по электрическим машинам*. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

22. Shimonі K. *Theoretical electrical engineering*. – Moscow: Ripol Klassik, 2013. – 778 p.

23. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле*. – М.: Высшая школа, 1986. – 263 с.

24. Фихтенгольц Г.М. *Курс дифференциального и интегрального исчисления*. – М.: Наука, 1969. – 656 с.

25. Копылов И.П., Мамедов Ф.А., Беспалов В.Я. *Математическое моделирование асинхронных машин*. – М.: Энергия, 1969. – 96 с.

THE EFFECT OF CURRENT DISPLACEMENT IN CONDUCTORS WITH CAGE ROTOR ENGINE MOTORS

D. Rodkin, Iu. Romashykhin, N. Rudenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: Romashykhin.iurii@gmail.com

Purpose. Justification for the possibility of taking into account the current displacement effect in the determination of electromagnetic parameters of induction motors. The paper proposes an approach to determining the motor parameters, taking into account the effect of the current displacement in the rotor depending on the current. **Methodology.** To determine the parameters of induction motors is proposed to use the energy method, according to which the identification system consists of instantaneous power balance equations. Identification system of equations is formed in accordance with the equivalent circuit that accounts for the dependence of the current in the rotor resistance function. **Results.** It is shown that the proposed approach makes it possible to determine the electromagnetic parameters of induction motors based on the effect of current displacement in the rotor with the required accuracy. Thus, the analysis of the results showed that the energy method allows to determine the parameters of induction motors based on the effect of current displacement in the rotor and confirms the assumption of the possibility of taking into account the displacement effect by the resistance and inductance of the rotor as a function of current. **Originality.** In the formation of the power balance equations should be allocated to the components of the instantaneous power of non-linear elements of the equivalent circuit, which take into account the effect of current displacement in the rotor via the dependence on the current. The presence of harmonics in the signal of current when powered from the source of sinusoidal voltage is explained by taking into account effect of current displacement in the rotor in the form of non-linearity active or inductive reactance of the rotor of T-equivalent circuit of induction motor, which allows to apply the energy method of identification of electromagnetic parameters. **Practical value.** Increase time between failures of repaired engines and improve their energy characteristics when operating in accordance with new passport data and permissible load values. References 25, figures 5, tables 2.

Key words: induction motor, non-linear parameters, the current displacement effect.

REFERENCES

1. Rogozin, G.G. (1992), *Opredeleniye elektromagnitnykh parametrov mashin peremennogo toka. Novyye eksperimentalnyye metody*, [Determination of electromagnetic parameters of AC machines. New experimental techniques], Tekhnika, Kiev. (in Russian)

2. Sabinin, Y.A. and Gruzov, V.L. (1985), *Chastotno-reguliruyemye asinkhronnyye elektroprivody*, [Frequency-controlled induction motors], Energoatomizdat, Leningrad. (in Russian)

3. Sandler, A.S. and Sarbatov, R.S. (1974). *Avtomaticheskoye chastotnoye upravleniye asinkhronnyimi*

dvigatelyami, [Automatic frequency control of induction motors], Energiya, Moscow. (in Russian)

4. Firago, B.I. and Pavlyachik, L.B. (2007), *Teoriya elektroprivoda*, [Theory of electric motors], Tekhnoperspektiva, Minsk. (in Russian)

5. Rodkin, D.I. (2008), “Current problems of theory and practice of Energy Saving electromechanical systems”, *Journal KSPU*, Vol. 3, no. 50, part 1, pp. 8–17. (in Russian)

6. Kostenko, M.P. and Piotrovskiy, L.M. (1978), *Elektricheskoye mashiny. Mashiny peremennogo toka*.

[Electric cars. AC machines], Energiya, Leningrad. (in Russian)

7. Zagirnyak, M.V., Rodkin, D.I., Romashykhin, Yu.V. and Chornyi, O.P. (2013), *Energeticheskii metod identifikatsii parametrov asinkhronnykh dvigateley* [Energy method identification of induction motors], ChP Shcherbatykh A.V., Kremenchug. (in Russian)

8. Livadaru, L., Simion, A., Munteanu, A. et al. (2013), "Dual Cage High Power Induction Motor with Direct Start-up. Design and FEM Analysis", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, pp. 55–58.

9. Park, J., Kim, B., Yang, J. et al. (2010), "Evaluation of the detectability of broken rotor bars for double squirrel cage rotor induction motors.", *In proceeding of: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 2493–2500.

10. Popena, A. (2012), "Model-simulation investigations of induction motor with the consideration of skin effect in rotor bars", *Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 12b/2012*, pp. 29–31.

11. Benecke, M., Doebbelin, R., Griepentrog, G. and Lindemann, A. (2011), "Skin effect in squirrel cage rotor bars and its consideration in simulation of non-steady-state operation of induction machines", *Piers online*, Vol. 7, no. 5, pp. 421–425.

12. Shestat, B. and Kheldun, A. (2004), "Minimising energy losses in asynchronous motor with squirrel-cage rotor with vector control", *Elektrichestvo*, Vol. 12, pp. 31–37. (in Russian)

13. Vinogradov, A.B. (2005), "Simulation of dynamic processes of frequency-controlled induction motor considering the iron loss, saturation and skin effect", *Elektromekhanika*, Vol. 3, pp. 38–43. (in Russian)

14. Rodkin, D.I., Kalinov, A.P. and Romashykhin, Yu.V. (2007), "Efficiency of the method for energy diagnostics of AC motors parameters", *Elektroprivody peremennogo toka: Trudy mezhdunarodnoy 14 NTK*, pp. 273–278. (in Russian)

15. Steinmetz, C. (1984), "On the law of hysteresis" *Proceedings of the IEEE*, Vol. 72, no. 2, pp. 197–221.

16. Reinert, J., Brockmeyer, A. and Doncker, R.D. (2001), "Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, no. 4, pp. 1055–1061.

17. Hilzinger, R. and Rodewald, W. (2013), *Magnetic materials fundamentals, products, properties, applications*, Erlangen, Publicis, ISBN: 9783895783524.

18. Kandaurova, G.S., Pashko, A.G. and Osadchenko, V.X. (2009), "Influence of parameters of harmonic magnetic field on the dynamic hysteresis loops and domain structure of iron-garnet membranes", *Fizika tverdogo tela*, Vol. 51, no. 5, pp. 911–915. (in Russian)

19. Chencheyov, V.V., Rodkin, D.I. and Ogar, V.V. (2014), "Nature of abnormal growth of losses in the electrical steel in deep saturation mode", *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy: shchokvartalnyi naukovo-vyrobnychi zhurnal*, Vol. 1, no. 25, pp. 76–93. (in Russian)

20. Romashykhin, Yu.V. (2008), "Classification and effectiveness of methods for determining electromagnetic parameters of AC machines", *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, Vol. 3, no. 4, pp. 26–30. (in Russian)

21. Kopylov, I.P. (1988), *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Handbook of electric motors], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)

22. Shimoni, K. (2013), *Teoreticheskaya elektrotekhnika* [Theoretical electrical engineering], Ripol Klassik, Moscow. (in Russian)

23. Bessonov, L.A. (1986), *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field], Vysshaya shkola, Moscow. (in Russian)

24. Fikhtengolts, G.M. (1969), *Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya* [Course of differential and integral calculus], Nauka, Moscow. (in Russian)

25. Kopylov, I.P. (1969), *Matematicheskoe modelirovanie asinhronnykh mashin* [Mathematical modeling of induction motors], Energiya, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 11.12.2016.