

УДК 621.313.333

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРА СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

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

Активное сопротивление ротора, которое является одним из основных электромагнитных параметров асинхронного двигателя, представляет собой сложную функцию от тока ротора. Изменение активного сопротивления ротора связано с эффектом вытеснения тока. Предложен подход к определению параметров двигателя с учетом эффекта вытеснения тока в роторе в виде зависимости активного сопротивления ротора от тока. Для определения параметров асинхронных двигателей предложено использовать энергетический метод, в соответствии с которым составляется система идентификационных уравнений баланса составляющих мгновенной мощности. Система идентификационных уравнений формируется в соответствии с принятой схемой замещения, в которой учитывается зависимость активного сопротивления ротора от тока ротора. Предложен вариант получения необходимого гармонического состава сигналов напряжения и тока при питании асинхронного двигателя от накопителей энергии. Показано, что предложенный подход позволяет с достаточной точностью идентифицировать электромагнитные параметры асинхронного двигателя с учетом эффекта вытеснения тока в роторе.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, эффект вытеснения тока в роторе, энергетический метод.

ИДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ РОТОРА СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

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

Активний опір ротора, який є одним з основних електромагнітних параметрів асинхронного двигуна, є складною функцією від струму ротора. Зміна активного опору ротора пов'язана з ефектом витиснення струму. Запропоновано підхід до визначення параметрів двигуна з урахуванням ефекту витиснення струму в роторі у вигляді залежності активного опору ротора від струму. Для визначення параметрів асинхронних двигунів запропоновано використовувати енергетичний метод, відповідно до якого складається система ідентифікаційних рівнянь балансу складових миттєвої потужності. Система ідентифікаційних рівнянь формується відповідно до прийнятої схеми заміщення, в якій ураховується залежність активного опору ротора від струму ротора. Запропоновано варіант отримання необхідного гармонічного складу сигналів напруги та струму в разі живлення асинхронного двигуна від накопичувачів енергії. Показано, що запропонований підхід дозволяє з достатньою точністю ідентифікувати електромагнітні параметри асинхронного двигуна з урахуванням ефекту витиснення струму в роторі.

Ключові слова: асинхронний двигун, ефект витиснення струму в роторі, енергетичний метод.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время асинхронные двигатели (АД) широко применяются в различных областях промышленности. По данным статистики, до 70 % всей электрической энергии, преобразуемой в механическую энергию вращательного или поступательного движения, потребляется асинхронным двигателем [1–3]. Широкое применение АД в первую очередь обуславливается простотой в обслуживании, эксплуатации, простотой конструкции, низкой стоимостью, высокой надежностью, способностью автоматически изменять момент вращения в соответствии с изменением момента сопротивления на валу, высоким коэффициентом полезного действия и безопасностью при минимальном обслуживании.

Несмотря на высокие эксплуатационно-технические показатели надежности, вследствие длительной эксплуатации на производстве, работы при несимметрии питающего напряжения, неисправности систем охлаждения, многократных пусков, нарушений правил технической эксплуатации,

АД периодически выходят из строя и подвергаются ремонту [4].

Следует отметить, что после проведения ремонта электромагнитные параметры (ЭМП) АД могут отличаться от первоначальных, которые были установлены заводом-изготовителем. Стандартная послеремонтная диагностика (определение прочности изоляции, состояния подшипников и лобовых частей обмотки) не дает полной информации об изменении ЭМП. Поэтому существует необходимость в создании новых методов испытаний электрических машин, результатами которых будут уточненные электромагнитные параметры АД.

Важно также учитывать тот факт, что в настоящее время на промышленных предприятиях, заводах и фабриках из-за дефицита средств на приобретение нового электрооборудования, в том числе и электродвигателей, возникает необходимость использовать в производстве двигатели, прошедшие ремонтные операции. Таким образом, возникает необходимость определения ЭМП АД, прошедших ремонтные операции.

Целью работы является обоснование возможности проведения идентификации нелинейных параметров схемы замещения асинхронного двигателя с использованием накопителей энергии.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В последние годы определение ЭМП направлено на использование исходной информации о рабочих и переходных процессах, протекающих в условиях питания машины от промышленной электросети [5–10]. Среди известных и наиболее эффективных методов идентификации ЭМП АД являются методы при полигармоническом питании, в основе которых лежит использование математических моделей АД [9–12]. Одним из таких методов является энергетический метод, основанный на использовании уравнений баланса гармонических составляющих мгновенной мощности на источнике питания и элементах схемы замещения.

Математический аппарат энергетического метода позволяет учитывать разного рода физические процессы и явления, которые значительно влияют на ЭМП АД. К таким физическим явлениям относятся потери в стали, нелинейность кривой намагничивания, эффект насыщения стали, поверхностный эффект. Указанные физические процессы можно учесть в виде нелинейностей в математических моделях или схемах замещения АД. Отдельного внимания заслуживают нелинейности, которые связаны с эффектом вытеснения тока в роторе [5, 6], т.к. он приводит к изменению сопротивления ротора при пуске двигателя, что влияет на пусковой момент.

Анализ литературных источников [5, 7] показал, что активное сопротивление ротора имеет нелинейный характер изменения из-за влияния эффекта вытеснения тока. Поэтому коэффициент, учитывающий вытеснение тока k_R , можно найти из выражения зависимости активного роторного сопротивления от сигнала тока ротора, которое возможно получить, выполнив аппроксимацию графика изменения активного сопротивления ротора под влиянием эффекта вытеснения тока (рис. 1), представленного в литературных источниках [5, 7], где ξ – относительная высота проводника.

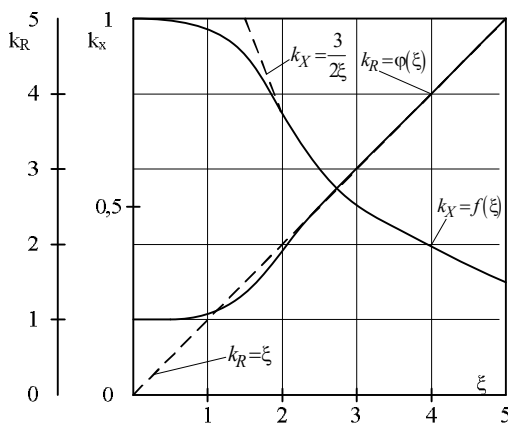


Рисунок 1 – Кривые изменения активного и индуктивного сопротивления ротора

Для выполнения аппроксимации графика изменения активного сопротивления ротора под влиянием эффекта вытеснения тока можно воспользоваться степенным полиномом как одним из простых и универсальных аппроксимационных выражений, которое в общем виде записывается следующим образом:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n,$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_n – коэффициенты полинома.

Исходя из того, что форма кривой графика увеличения активного сопротивления (рис. 1) позволяет получить аппроксимационные выражения только для четных степеней ($y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 \dots + a_{n+2}x^{n+2}$), то для определения зависимости изменения активного сопротивления вследствие влияния эффекта вытеснения тока была проведена аппроксимация при помощи полинома второй ($y = a_0 + a_2x^2$) и четвертой ($y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4$) степеней (рис. 2). Коэффициенты аппроксимации представлены в табл. 1.



Рисунок 2 – Аппроксимация кривой изменения активного сопротивления ротора

Таблица 1 – Коэффициенты аппроксимации кривой изменения активного сопротивления ротора

Полином второй степени	Полином четвертой степени
Коэффициенты аппроксимации для активного сопротивления	
$a_0=1$	$a_0=1$
$a_2=0,16$	$a_2=0,16$
–	$a_4=0,0005$

Согласно результатам аппроксимации, график кривой нелинейного изменения активного сопротивления под влиянием эффекта вытеснения тока, представленный в [5], может быть с достаточной точностью аппроксимирован при помощи квадратичной зависимости нелинейного активного сопротивления от тока ротора [11]:

$$R_2(I_2) = R'_2 + k_R I_2^2,$$

где R'_2 – активное сопротивление ротора без учета эффекта вытеснения тока; k_R – коэффициент, учитывающий вытеснение тока; I_2 – ток ротора.

В случае, когда эффект вытеснения тока в роторе учитывается в виде нелинейности активного сопротивления ротора Т-образной схемы замещения АД (рис. 3), в сигнале тока при питании от синусоидального источника напряжения будут присутствовать гармоники тока, отличающиеся от первой [11]. Появление данных гармоник связано с тем, что в схеме замещения активное сопротивление ротора рассматривается как параметр, обладающий нелинейным характером изменения значения.

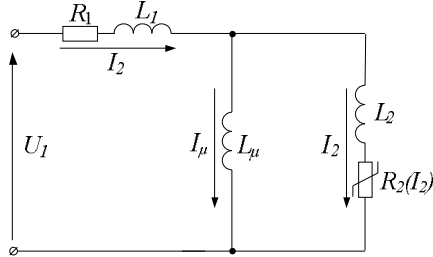


Рисунок 3 – Т-образная схема замещения АД с нелинейным активным сопротивлением ротора

В связи с тем, что эффект вытеснения тока проявляется в пусковом режиме работы двигателя, то для того, чтобы адекватно провести идентификацию ЭМП АД с учетом вытеснения тока в роторе при помощи энергетического метода, энергетическое воздействие на двигатель должно соответствовать режиму пуска АД. Это подразумевает, что значение тока тестового сигнала, подаваемого на статор АД, должно быть эквивалентно значению пускового тока электрической машины.

Существует несколько способов подключения АД таким образом, чтобы энергетическое воздей-

ствие на него соответствовало пусковому режиму работы.

Первым из таких способов обеспечения необходимого уровня тока является подключение двигателя к источнику питания с номинальным напряжением. Но в связи с тем, что идентификация ЭМП АД проводится для пускового режима работы, а, следовательно, ротор является заторможенным, то данный способ имеет существенный недостаток – это повышение температуры двигателя, т.е. происходит перегрев обмоток ротора и повреждение изоляции с последующим выходом АД из строя из-за межвитковых замыканий, а также замыканий обмоток на корпус двигателя.

Вторым способом обеспечения необходимого уровня тока является использование в качестве источника питания АД накопителей энергии:

- конденсаторных накопителей;
- электромашинных накопителей.

Используя первый или же второй тип накопителей, можно получить переходные процессы в виде затухающих сигналов тока и напряжения. Но в первом случае в качестве источника питания используется конденсаторная батарея, а в другом может использоваться двигатель постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением (НВ).

С целью проведения анализа зависимости активного сопротивления ротора от роторного тока, на основе представленной выше схемы замещения (рис. 3), в программном продукте Matlab была создана модель одной фазы АД при питании от конденсатора [12], схема подключения питания которой представлена на рис. 4.

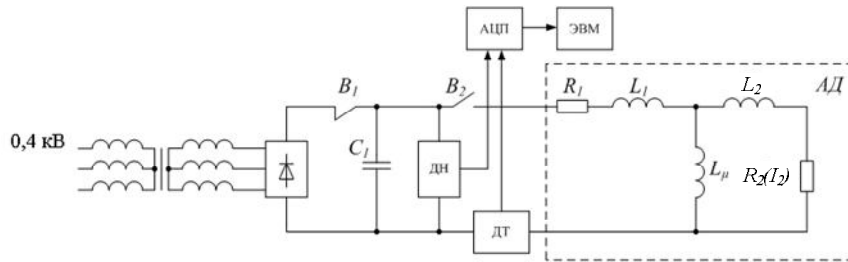


Рисунок 4 – Схема питания АД

Определение ЭМП с использованием указанной схемы проведем с помощью математического моделирования для АД серии АОЛ2-31-4, параметры которого следующие: $P_n = 2,2$ кВт; $I_n = 4,9$ А; $n_n = 1430$ об/мин; $R_1 = 2,5$ Ом; $R_2 = 1,8$ Ом; $X_1 = 2,5$ Ом; $X_2 = 2,85$ Ом; $X_\mu = 115$ Ом. В модели для рассматриваемого АД принято, что коэффициент $k_R = 1,8 \cdot 10^{-3}$, т.к. данное значение обеспечивает уровень тока в цепи статора, соответствующий току статора при пуске двигателя с питанием от источника переменного напряжения при нормальных условиях эксплуатации.

Особенностью работы схемы является использование конденсатора в момент отключения от внеш-

него источника питания. Использование конденсатора в качестве источника питания дает возможность получить затухающие сигналы тока и напряжения, необходимые для идентификации изменяющегося активного сопротивления ротора от начала пуска двигателя до полного затухания токов статора и ротора.

В схеме для измерения мгновенных значений напряжения и тока используется измерительный модуль, который содержит блок датчиков напряжения и тока, аналого-цифровой преобразователь и ЭВМ.

В момент, когда необходимо провести идентификацию параметров АД, конденсатор отключается от внешнего источника питания путем размыкания

ключа B_1 и замыкания ключа B_2 . Причем величина емкости подбирается такой, чтобы обеспечить ток в схеме на уровне пускового тока статора АД. Применительно к рассматриваемому АД емкость использовалась для трех случаев: 0,15, 0,25 и 0,5 Ф с напряжением в 220 В для обеспечения необходимого уровня пускового тока статора, а также для исследования поведения активного сопротивления ротора при разной скорости затухания статорного и роторного токов.

Сигналы напряжения и тока рассматриваются на интервалах времени длительностью в 0,01 с каждый. При этом интервал от 0 до 0,01 с соответствует первому участку, от 0,01 до 0,02 с – второму и т.д.

Ниже представлены графики сигналов тока и напряжения в цепи статора, а также тока в цепи намагничивания и ротора, полученные из указанной выше модели АД при емкости конденсатора 0,15, 0,25 и 0,5 Ф.

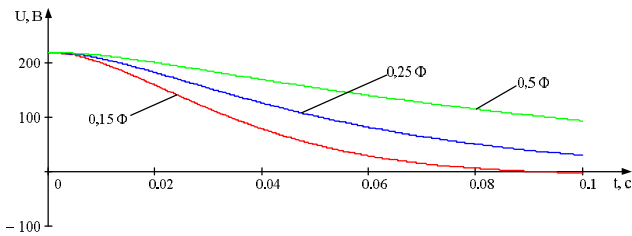


Рисунок 5 – Напряжение статора при пуске от конденсатора с напряжением 220 В

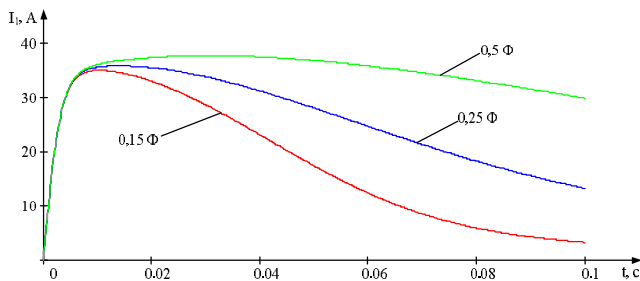


Рисунок 6 – Ток статора модели АД

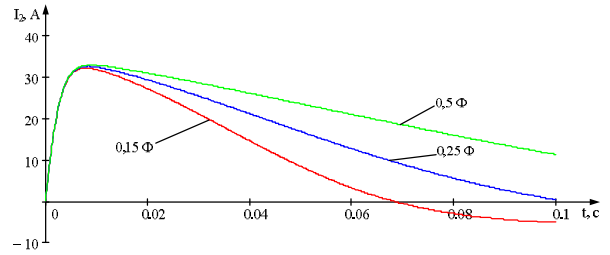


Рисунок 7 – Ток ротора модели АД

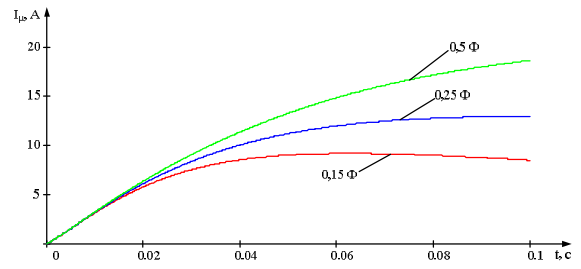


Рисунок 8 – Ток цепи намагничивания модели АД

Следует отметить, что использование в качестве накопителя энергии конденсаторной батареи связано с определенными трудностями. Это объясняется тем, что используемая батарея должна соответствовать уровню номинального напряжения АД, а в случае исследования двигателей высокой мощности стоимость подходящих батарей и их габаритные размеры будут весьма велики. Поэтому была разработана математическая модель комплекса для определения ЭМП АД с использованием в качестве накопителя энергии ДПТ НВ, которая представлена на рис. 9.

В качестве ДПТ НВ был выбран двигатель типа 4ПНМ132 М04, каталожные данные которого соответствуют следующим: $P_n = 2,5$ кВт; $U_n = 220$ В; $I_n = 14,3$ А; $R_r = 1,58$ Ом; $L_r = 0,01$ Гн.

Моделирование выполнялось при различных значениях электродвижущей силы (ЭДС) ДПТ НВ: 220, 180, 120 и 40 В. Получение требуемых значений ЭДС происходило посредством регулирования магнитного потока ДПТ НВ путем подключения в обмотку возбуждения соответствующего шунтирующего сопротивления.

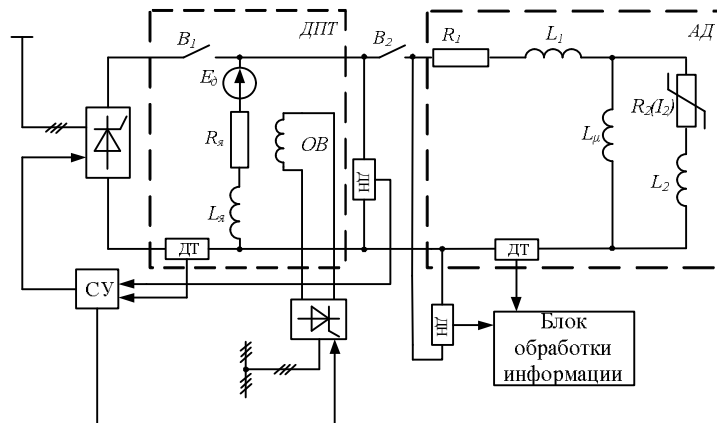


Рисунок 9 – Схема комплекса для определения ЭМП АД

Приведенная на рис. 9 схема работает следующим образом: сначала запускается ДПТ НВ при питании от внешнего источника питания. В момент, когда скорость ДПТ НВ достигла номинальной, размыкается выключатель В1 и замыкается выключатель В2, тем самым соединяя якорь ДПТ с фазой статора АД. Таким образом, на статор АД подается напряжение в виде затухающей экспоненты, являющейся электродвижущей силой, которая была накоплена ДПТ НВ.

Результаты моделирования по сигналам напряжения и тока статора, согласно схеме на рис. 9, приведены ниже.

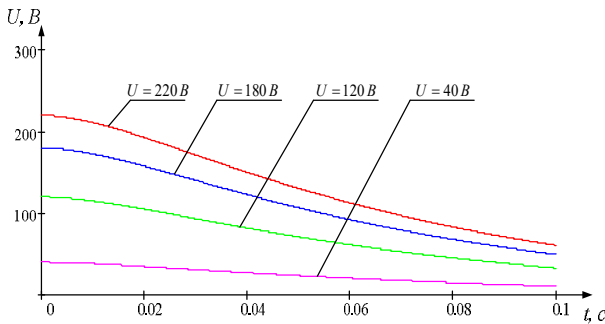


Рисунок 10 – Переходный процесс по напряжению при различных значениях ЭДС ДПТ НВ

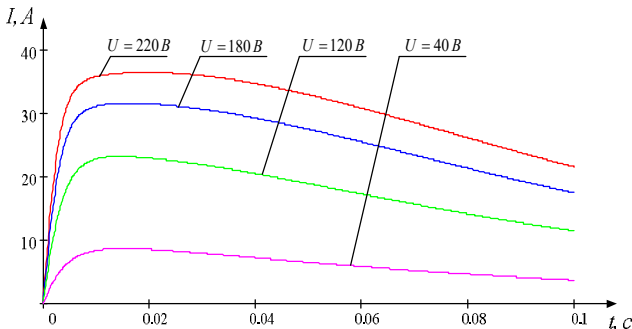


Рисунок 11 – Переходный процесс по току при различных значениях ЭДС ДПТ НВ

Для подтверждения положения о зависимости активного сопротивления от тока ротора была выполнена идентификация параметров двигателя с использованием участков сигналов тока и напряжения статора при выполнении симметрии второго рода для трех случаев питания от конденсатора (при 0,15, 0,25, 0,5 Ф). В качестве метода идентификации использовался энергетический метод при рассмотрении первой, третьей и пятой гармоники напряжения и тока статора. Особенность выбора гармоник напряжения и тока и формирования составляющих гармоник мгновенной мощности на элементах схемы замещения АД детально изложены в [1, 8]. К идентифицируемым ЭМП АД помимо активных сопротивлений и индуктивностей схемы замещения относятся также составляющие гармоник тока ротора: $I_{2a1}, I_{2a3}, I_{2a5}$ – косинусные составляющие

первой, третьей и пятой гармоник тока контура ротора; $I_{2b1}, I_{2b3}, I_{2b5}$ – синусные составляющие первой, третьей и пятой гармоник тока контура ротора. Ток в контуре намагничивания можно выразить как разницу токов статора и ротора, таким образом, ток контура намагничивания не следует относить к неизвестным параметрам. Используя первую, третью и пятую гармоники сигналов тока и напряжения статора, можно получить одиннадцать уравнений баланса мгновенных мощностей, что является достаточным количеством для решения полученной системы уравнений при десяти неизвестных ЭМП АД. Система идентификационных уравнений энергетического метода для Т-образной схемы замещения (рис. 2) в общем виде имеет следующую форму записи [1]:

$$\begin{aligned}
 P_{0au} &= P_{0aR_1} + P_{0aR_2}; \\
 P_{2au} &= P_{2aR_1} + P_{2aR_2} + P_{2aL_1} + P_{2aL_2} + P_{2aL_\mu}; \\
 P_{2bu} &= P_{2bR_1} + P_{2bR_2} + P_{2bL_1} + P_{2bL_2} + P_{2bL_\mu}; \\
 P_{4au} &= P_{4aR_1} + P_{4aR_2} + P_{4aL_1} + P_{4aL_2} + P_{4aL_\mu}; \\
 P_{4bu} &= P_{4bR_1} + P_{4bR_2} + P_{4bL_1} + P_{4bL_2} + P_{4bL_\mu}; \\
 P_{6au} &= P_{6aR_1} + P_{6aR_2} + P_{6aL_1} + P_{6aL_2} + P_{6aL_\mu}; \\
 P_{6bu} &= P_{6bR_1} + P_{6bR_2} + P_{6bL_1} + P_{6bL_2} + P_{6bL_\mu}; \\
 P_{8au} &= P_{8aR_1} + P_{8aR_2} + P_{8aL_1} + P_{8aL_2} + P_{8aL_\mu}; \\
 P_{8bu} &= P_{8bR_1} + P_{8bR_2} + P_{8bL_1} + P_{8bL_2} + P_{8bL_\mu}; \\
 P_{10au} &= P_{10aR_1} + P_{10aR_2} + P_{10aL_1} + P_{10aL_2} + P_{10aL_\mu}; \\
 P_{10bu} &= P_{10bR_1} + P_{10bR_2} + P_{10bL_1} + P_{10bL_2} + P_{10bL_\mu},
 \end{aligned}$$

где $P_{0au}, P_{kau}, P_{kbu}$ – постоянная, косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности источника питания на k -ой гармонике соответственно; $P_{0R_1}, P_{kaR_1}, P_{kbR_1}, P_{0R_2}, P_{kaR_2}, P_{kbR_2}$ – постоянная, косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности на активных сопротивлениях статора и ротора на k -ой гармонике соответственно; $P_{kaL_1}, P_{kbL_1}, P_{kaL_\mu}, P_{kbL_\mu}, P_{kaL_2}, P_{kbL_2}$ – косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности на индуктивностях статора, цепи намагничивания и ротора на k -ой гармонике соответственно.

Также была проведена идентификация ЭМП предложенной схемы (рис. 7) с использованием участков сигналов тока и напряжения статора при выполнении симметрии второго рода.

Результаты идентификации ЭМП АД типа АОЛ2-31-4, а также эффективные значения первых гармоник напряжения и тока представлены в табл. 2, 3. Согласно результатам, представленным в этих таблицах, при уменьшении тока статора, а, соответственно, и ротора уменьшается также активное сопротивление ротора, а коэффициент вытеснения тока остается на одном уровне.

Таблиця 2 – Результати ідентифікації ЕМП АД при ємкості 0,25 Ф і напрузі 220 В

Параметри	Аналізуваний період часу		
	t, с	0–0,01	0,01–0,02
Вимірювані параметри			
U_{11} , В	136,23	123,507	88,208
U_{13} , В	44,993	41,017	29,435
U_{15} , В	26,945	24,576	17,644
I_{11} , А	18,827	22,545	20,519
I_{13} , А	4,21	7,471	6,822
I_{15} , А	2,332	4,474	4,088
Визначаються параметри			
I_{21} , А	17,829	19,554	14,663
I_{23} , А	3,869	6,487	4,882
I_{25} , А	2,128	3,885	2,926
$I_{\mu 1}$, А	0,998	2,991	5,856
$I_{\mu 3}$, А	0,341	0,984	3,896
$I_{\mu 5}$, А	0,204	0,589	1,162
$R_2(I_2)$, Ом	2,9	3,6	2,8
k , Ом/А ²	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
R_2 , Ом	1,8	1,8	1,8
L_1 , Гн	$7,57 \cdot 10^{-3}$	$7,96 \cdot 10^{-3}$	$7,96 \cdot 10^{-3}$
L_{μ} , Гн	0,366	0,366	0,366
L_2 , Гн	$8,66 \cdot 10^{-3}$	$9,07 \cdot 10^{-3}$	$9,07 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 3 – Результати ідентифікації ЕМП АД при живленні від ДПТ з напругою 220 В

Параметри	Аналізуваний період часу		
	t, с	0–0,01	0,01–0,02
Вимірювані параметри			
U_{11} , В	136,952	127,827	101,49
U_{13} , В	45,34	42,468	33,805
U_{15} , В	27,159	25,446	20,26
I_{11} , А	19,777	22,94	22,345
I_{13} , А	4,548	7,611	7,432
I_{15} , А	2,454	4,559	4,454
Визначаються параметри			
I_{21} , А	18,625	19,91	16,149
I_{23} , А	4,198	6,609	5,374
I_{25} , А	2,245	3,959	3,22
$I_{\mu 1}$, А	1,152	3,03	6,196
$I_{\mu 3}$, А	0,35	1,002	2,058
$I_{\mu 5}$, А	0,209	0,6	1,234
$R_2(I_2)$, Ом	2,95	3,7	3
k , Ом/А ²	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
R_2 , Ом	1,8	1,8	1,8
L_1 , Гн	$7,562 \cdot 10^{-3}$	$7,96 \cdot 10^{-3}$	$7,96 \cdot 10^{-3}$
L_{μ} , Гн	0,366	0,366	0,366
L_2 , Гн	$8,616 \cdot 10^{-3}$	$9,07 \cdot 10^{-3}$	$9,07 \cdot 10^{-3}$

Аналіз результатів, наведених в табл. 2, 3, показав, що використання енергетичного методу дозволяє визначати ЕМП АД при живленні як від конденсатора, так і від ДПТ з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі. Отримані ЕМП в обох випадках порівнянимо, але слід врахувати той факт, що використання ДПТ як джерела згаслого напруги є більш вигідним

порівняно з конденсаторною батареєю з меншими габаритами та вартістю.

Дані, представлені в табл. 2, 3, свідчать про те, що в разі, коли активний опір ротора виражається через залежність від струму ротора, відбувається його збільшення в період пуску двигуна та зменшення з розгоном АД. Це відповідає ефекту витіснення струму в роторі, при цьому збільшення активного опору ротора впливає на гармонічний склад статорного струму, в порівнянні з випадком незмінного активного опору ротора.

ВИСНОВКИ. Проведені авторами дослідження ефективності енергетичного методу при ідентифікації ЕМП АД показали, що з його допомогою можливо визначити активний опір ротора при кутовій швидкості, рівній нулю. Збільшення струму статора в цих умовах призводить до зростання струму ротора, а відповідно, і активного опору.

В ході досліджень була встановлена цільовість ідентифікації ЕМП АД з урахуванням ефекту витіснення струму шляхом подачі згаслого сигналу постійної напруги на обмотку статора з наступним гармонічним аналізом струму та напруги та визначенням фактичного значення активного опору ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Энергетический метод идентификации электромеханических устройств и систем // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – Минск, 2011. – Вып. 3. – С. 10–20.
2. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
3. Ромашихина Ж.І., Калінов А.П., Луценко І.А. Декомпозиція сигналу електрорушійної сили обмотки статора для діагностики пошкоджень стрижнів ротора асинхронного двигуна // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 4/2013 (22). – С. 27–36.
4. Ванев Б.Н. Надежность асинхронных электродвигателей. – К.: Техніка, 1983. – 143 с.
5. Шимони К. Теоретическая электротехника. – Рипол Классик, 2013. – 778 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.
7. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Машины переменного тока. – М. – Л.: ГЭИ, 1958. – 651 с.
8. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В., Черный А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2013. – 164 с.
9. Hasegawa M., Ogawa D., Matsui K. Parameter identification scheme for induction motors using output

inter-sampling approach // *Asian Power Electronics Journal*. – Iss. 2/2008 (1). – PP. 15–23.

10. Akagi H., Watanabe M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. – New York: Wiley, 2007. – 379 p.

11. Zagirnyak M., Rodkin D., Romashykhin Iu. et al. *Identification of nonlinearities of induction motor*

equivalent circuits with the use of the instantaneous power method // *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. – 2016. – PP. 1–4.

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

IDENTIFICATION OF NONLINEAR PARAMETERS OF ROTOR'S IN THE EQUIVALENT CIRCUIT OF INDUCTION MOTOR WITH USE OF ENERGY STORAGEES

D. Rodkin, Iu. Romashykhin, N. Rudenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

Purpose. Substantiation of the possibility of identification of nonlinear parameters of the equivalent circuit of induction motor using energy storage devices. **Methodology.** The article proposes an approach to determining motor's parameters taking into account the effect of current displacement in the rotor in the form of the dependence of the rotor's resistance on the current. To determine the parameters of induction motors, it is proposed to use the energy method, in accordance with which a system of identification equations of the balance of instantaneous power components is compiled. The system of identification equations is formed in accordance with the adopted equivalent circuit, which takes into account the dependence of the rotor's resistance on the rotor's current. **Results.** It is shown that the proposed approach allows identifying electromagnetic parameters of induction motor with sufficient accuracy, taking into account the effect of current displacement in the rotor. The researches carried out by the authors of the efficiency of the energy method in the identification of EMP of IM showed that with the help of this method it is possible to determine resistance of the rotor at an angular velocity equal to zero. An increase in the stator current under these conditions leads to an increase in the rotor current, and, accordingly, to increase in the rotor's resistance. Studies installed expediency identification of EMP of IM with taking into account effect of current displacement when supplying by decaying signal of DC voltage on the stator winding and followed harmonic analysis of the current and voltage, determining an actual value of the rotor's resistance. **Originality.** The article suggests a variant of obtaining the necessary harmonic composition of the voltage and current signals when the induction motor is powered by energy storage devices. **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.

Key words: induction motor, current displacement effect in the rotor, energy method.

REFERENCES

1. Rodkin, D.Y. and Romashihin, Yu.V. (2011), "Energy method for the electromechanical devices and systems identification", *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy i energeticheskikh obyedineniy SNG, Energetika*, Vol. 3, pp. 10–20. (in Russian)

2. Zherve, G.K. (1984), *Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electrical machines], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)

3. Romashykhina, Zh.I., Kalinov, A.P. and Lutsenko, I.A. (2013), "A decoupling of of electromotive force signal of stator bars for rotor bars damages diagnostics of engine motors", *Elektromehanichni i energosberegauchi sistemy, Kremenchuk*, Vol. 4, no. 22, pp. 27–36. (in Ukrainian)

4. Vaneyev, B.N. (1983), *Nadezhnost asinkhronnykh elektrodvigateley* [Reliability of induction motors], Tehnika, Kiev. (in Russian)

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

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

7. Kostenko, M.P. and Piotrovskiy, L.M. (1958), *Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka*. [Electric cars. AC machines], GEI, Moscow. (in Russian)

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

9. Hasegawa, M., Ogawa, D. and Matsui, K. (2008), "Parameter identification scheme for induction motors using output inter-sampling approach", *Asian Power Electronics Journal*, Vol. 2, no. 1, pp. 15–23.

10. Akagi, H. and Watanabe, M. (2007), *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley, New York.

11. Zagirnyak, M., Rodkin, D., Romashykhin, Iu. et al. (2016), "Identification of nonlinearities of induction motor equivalent circuits with the use of the instantaneous power method", *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, pp. 1–4.

12. Kopylov, I.P. (1969), *Matematicheskoe modelirovanie asinkhronnykh mashyn* [Mathematical modeling of induction motors], Energiya, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 12.03.2017.