

УДК 621.313.333

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПСЕВДОИСТОЧНИКОВ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**Д. В. Резник, Ю. В. Ромашихин, Д. И. Родькин**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: dimareznik@yandex.ru

Актуальность идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей обусловлена тем, что с их помощью рассчитывают пусковые и рабочие характеристики, потери в стали и меди, определяется нагрузочная способность электрических машин. Причинами изменения параметров, которые рассчитаны заводом-изготовителем, являются: долговременная эксплуатация, послеремонтная эксплуатация и отклонения при изготовлении асинхронных двигателей. В настоящее время разработано множество методов, посвященных идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей. Однако не существует универсального метода, который бы подходил для идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей различных мощностей и типоразмеров в условиях ремонтных цехов и электроремонтных предприятий. Современные методы идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей могут быть развиты за счет использования источников питания с синусоидальным амплитудно-управляемым напряжением. Поэтому целью работы является вопрос развития метода определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей с использованием составляющих мгновенной мощности при питании от источников синусоидального напряжения. Использование составляющих мгновенной мощности в уравнениях баланса мощностей позволяет разработать энергетический метод, в основе которого используется система идентификационных уравнений для определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей. Особенностью энергетического метода является то, что уравнения баланса составляются отдельно по каждой из анализируемых гармоник мгновенной мощности для каждого из элементов схемы замещения асинхронного двигателя. При этом предложено проводить идентификацию электромагнитных параметров асинхронных двигателей с использованием частот напряжения и тока меньше частоты сетевого напряжения, т.е. в диапазоне частот 0–10 Гц. В работе предложено использовать для питания асинхронного двигателя источник синусоидального напряжения, а необходимый спектр частот получать от так называемого «псевдоисточника». Псевдоисточник представляет собой фиктивный источник, который вводится не физически, а только математически в уравнения баланса мощностей. Введение одного псевдоисточника позволяет получить достаточное количество идентификационных уравнений для определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей по Т-образной схеме замещения. Анализ результатов с использованием энергетического метода показал, что погрешность идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей не превышает 5 %. Таким образом, показана эффективность применения энергетического метода идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей с использованием низкочастотных псевдоисточников.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, низкочастотный псевдоисточник, электромагнитные параметры.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ПСЕВДОДЖЕРЕЛ ПРИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**Д. В. Резнік, Ю. В. Ромашихін, Д. Й. Родькін**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: dimareznik@yandex.ru

Актуальність ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів обумовлена тим, що з їх допомогою розраховують пускові та робочі характеристики, втрати в сталі й міді, визначається навантажувальна здатність електричних машин. Причинами зміни параметрів, що розраховані заводом-виробником, є довготривала експлуатація, післяремонтна експлуатація й відхилення при виготовленні асинхронних двигунів. На даний час розроблено безліч методів, присвячених ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів. Однак не існує універсального методу, який би підходив для ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів різних потужностей і типорозмірів в умовах ремонтних цехів і електроремонтних підприємств. Тому метою роботи є питання розвитку методу визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів із використанням складових миттєвої потужності при живленні від джерела синусоїдної напруги. Використання складових миттєвої потужності в рівняннях балансу потужностей дозволяє розробити енергетичний метод, в основі якого використовується система ідентифікаційних рівнянь для визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів. Особливістю енергетичного методу є те, що рівняння балансу складаються окремо за кожною з аналізованих гармонік миттєвої потужності для кожного елемента схеми заміщення асинхронного двигуна. При цьому запропоновано проводити ідентифікацію електромагнітних параметрів асинхронних двигунів з використанням частот напруги та струму, які менші від частоти напруги, тобто для діапазону частот 0–10 Гц. У роботі запропоновано використовувати для живлення асинхронного двигуна джерело синусоїдної напруги, а необхідний спектр частот отримувати від так званого «псевдоджерела». Псевдоджерело є фіктивним джерелом, що вводиться не фізично, а тільки математично в рівняння балансу потужностей. Уведення одного псевдоджерела дозволяє отримати достатню кількість ідентифікаційних рівнянь для визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів за Т-подібною схемою заміщення. Аналіз результатів з використанням енергетичного методу показав, що похибка ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів не перевищує 5 %. Таким чином, показана ефективність використання енергетичного методу ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів з використанням низькочастотних псевдоджерел.

Ключові слова: асинхронний двигун, низькочастотне псевдоджерело, електромагнітні параметри.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Вопрос знания точной информации о параметрах электрических машин до сих пор остается открытым. Многообразие методов говорит о том, что не существует универсального метода, который бы подходил для идентификации электромагнитных параметров (ЭМП) двигателей различных мощностей и типоразмеров в условиях ремонтных цехов и электроремонтных предприятий [1–7]. Поэтому предлагаемая работа направлена на получение метода идентификации ЭМП электрических машин, в особенности асинхронных двигателей (АД), как самых массовых потребителей электрической энергии.

В качестве основы для формирования математического аппарата предлагается использовать метод мгновенной мощности [8–10]. Мгновенная мощность является физической величиной, которая определяется произведением сигналов напряжения и тока. Авторами [10] отмечалось, что в сигнале мгновенной мощности можно выделить для анализа следующие компоненты: постоянную, косинусные и синусные канонические и неканонические. Такое многообразие компонент мгновенной мощности получается при разложении сигналов в тригонометрический ряд Фурье на периоде повторяемости.

Следует отметить, что использование составляющих мгновенной мощности позволяет формировать уравнения баланса мощностей по каждой из рассматриваемых гармоник. Основой для этого является теорема Телледжена, согласно которой сумма произведений напряжений U_i и токов I_i всех ветвей цепи, удовлетворяющих законам Кирхгофа, равна нулю. Произведение $U_i I_i$ представляет собой мгновенную мощность P_i i -й ветви, поэтому сумма мощностей всех ветвей цепи равняется нулю.

В соответствии с вышеизложенным баланс мощностей применим и для АД, которые получают питание от источников полигармонического напряжения. При этом АД представляется в виде соответствующей схемы замещения. В качестве элементов цепей для рассматриваемого случая можно выделить активные сопротивления и индуктивности принимаемой схемы замещения АД.

Актуальность идентификации параметров АД обусловлена тем, что с их помощью рассчитывают пусковые и рабочие характеристики, потери в стали и меди, определяется нагрузочная способность электрических машин [1, 11]. Причинами изменения параметров, рассчитанных заводом-изготовителем, являются долговременная эксплуатация, послеремонтная эксплуатация и отклонения при изготовлении АД. То есть погрешность определения ЭМП АД приводит к ошибке расчета пусковых, рабочих и механических характеристик АД, их энергетических показателей, определяющих работоспособность двигателя в конкретных условиях технологического процесса.

Следует отметить, что идентификация параметров АД связана с рядом сложностей, которые определяются широким спектром исследований и необходимостью использования большого количества сложно-

го и дорогостоящего оборудования.

Современные методы идентификации параметров АД могут быть развиты за счет использования источника питания с синусоидальным амплитудно-управляемым напряжением, а также за счет уменьшения количества измерений и уменьшения погрешности методов исследований [11, 12]. Это позволит идентифицировать именно параметры АД, отделяя их от параметров, определяемых формой напряжения и системой питания.

Целью данной работы является вопрос развития метода определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей с использованием составляющих мгновенной мощности при питании от источников синусоидального напряжения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Использование составляющих мгновенной мощности в уравнениях баланса мощностей позволяет сформировать систему идентификационных уравнений для определения ЭМП АД. В работах [10–12] этот метод получил название «энергетического». Особенностью энергетического метода является то, что уравнения баланса составляются отдельно по каждой из анализируемых гармоник мгновенной мощности при питании АД от источника полигармонического напряжения. Причем следует отметить, что составляющие мощности определяются для каждого элемента принятой схемой замещения АД. Например, в простейшем случае АД может быть представлен Т-образной схемой замещения, которая состоит из статорной цепи, контура намагничивания и роторной цепи (рис. 1). Применительно к Т-образной схеме замещения в качестве ЭМП выступают индуктивности рассеяния статора L_1 и ротора L'_2 , индуктивность контура намагничивания L_m , сопротивления статора R_1 и ротора R'_2 .

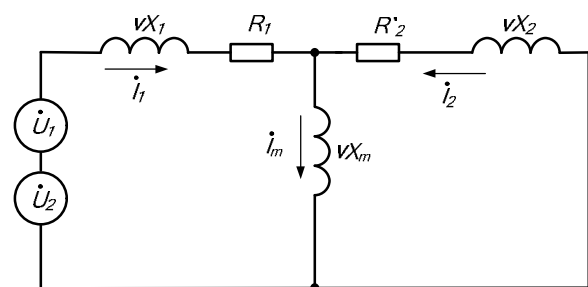


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Как уже отмечалось, уравнения баланса мгновенной мощности одной фазы двигателя составляется в виде равенств составляющих мгновенной мощности источника питания $p_{ist}(t)$ и составляющих мгновенной мощности всех элементов схемы замещения АД [10, 13]:

$$p_{ist}(t) = p_{R1}(t) + p_{R'2}(t) + p_{L1}(t) + p_{Lm}(t) + p_{L'2}(t), \quad (1)$$

где $p_{R1}(t), p_{R'2}(t), p_{L1}(t), p_{Lm}(t), p_{L'2}(t)$ – значения мгновенных мощностей элементов схемы замещения:

– для источника питания:

$$p_{ist}(t) = u(t)i(t);$$

– для активного сопротивления:

$$p_{Ri}(t) = e_{Ri}(t)i(t) = i^2(t)R_i;$$

– для индуктивности:

$$p_{Li}(t) = e_{Li}(t)i(t) = L_i \frac{di(t)}{dt} i(t).$$

Следует отметить, что при идентификации ЭМП АД с использованием уравнений баланса составляющих мгновенной мощности необходимо наличие полигармонического источника питания, при котором напряжения и токи можно представить в виде ряда Фурье [14]:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N U_n \cos(n\Omega t - j_n); \quad (2)$$

$$i(t) = \sum_{m=1}^M I_m \cos(m\Omega t - j_m),$$

где U_n – амплитудные значения составляющих напряжения высших гармоник; n – номер гармоники напряжения; N – число гармоник напряжения; φ_n – угол сдвига фаз между напряжением и вещественной положительной полуосью; I_m – амплитудные значения составляющих тока высших гармоник; m – номер гармоники тока; M – число гармоник тока; φ_m – угол сдвига фаз между током и напряжением.

Авторы [10] отмечают, что источник полигармонического напряжения должен обеспечивать требуемый гармонический состав напряжения и тока. В работе [11] предложено проводить идентификацию ЭМП АД с использованием частот напряжения и тока меньше частоты сетевого напряжения. Особенностью указанного подхода является питание статорных обмоток АД напряжением в диапазоне 0–10 Гц. При этом можно пренебречь потерями стали ввиду их незначительности, что позволяет увеличить точность определения ЭМП АД [11].

При питании АД низкочастотным напряжением появляются области частот, в которых наблюдается характерное изменение ЭМП. Указанное свойство можно увидеть, определив сопротивления Т-образной схемы замещения:

– полное сопротивление Т-образной схемы замещения:

$$Z_{\Sigma}(v) = Z_1(v) + \frac{Z_2(v)Z_m(v)}{Z_2(v)Z_m(v)} = R_1 + jvX_1 + \frac{j(vR_2^2 X_m + v^3 X_2^2 X_m + v^3 X_2 X_m^2) + v^2 R_2 X_m^2}{R_2^2 + (vX_2 + vX_m)^2}; \quad (3)$$

– эквивалентное активное сопротивление:

$$R_{\Sigma}(v) = R_1 + \frac{v^2 R_2 X_m^2}{R_2^2 + (vX_2 + vX_m)^2}; \quad (4)$$

– эквивалентное индуктивное сопротивление:

$$X_{\Sigma}(v) = vX_1 + \frac{vR_2^2 X_m + v^3 X_2^2 X_m + v^3 X_2 X_m^2}{R_2^2 + (vX_2 + vX_m)^2}. \quad (5)$$

В соответствии с выражениями (3)–(5) приведены зависимости изменения сопротивлений схемы замещения от частоты (рис. 2). Как видно из приведенных зависимостей, наблюдается перегиб, который можно объяснить перераспределением энергии между контурами в области низких частот. При этом точки перегиба в зависимости от мощности и конструктивных особенностей могут смещаться относительно частоты [11].

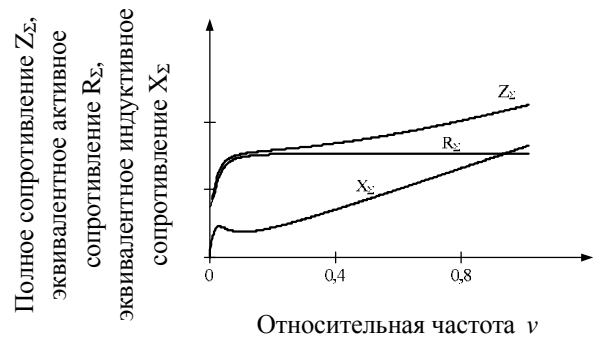


Рисунок 2 – Графики зависимостей от относительной частоты полного, активного и индуктивного сопротивлений Т-образной схемы замещения

Одним из существенных недостатков реализации указанного подхода к идентификации ЭМП АД является необходимость использования источника низкочастотного напряжения. Поэтому в работе [12] предложено использовать для питания АД источник синусоидального напряжения, а необходимый спектр частот получать от так называемого «псевдоисточника». Псевдоисточник представляет собой фиктивный источник, который вводится не физически, а только математически в уравнения баланса мощностей. Причем в псевдоисточнике задаются параметры напряжения и частоты.

При введении в схему псевдоисточников напряжение и ток можно записать в виде:

$$u(t) = u_{\delta}(t) + u_{nci}(t) = U_1 \cos(\Omega t) + \sum_{n=1}^N U_{ni} \cos(\Omega_i t);$$

$$i(t) = i_{\delta}(t) + i_{nci}(t) = I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + \sum_{m=1}^M I_{mai} \cos(\Omega_i t) + \sum_{m=1}^M I_{mbi} \sin(\Omega_i t),$$

где $u_d(t)$ – значение напряжения действительного источника питания; $u_{nci}(t)$ – значение напряжения псевдоисточника; Ω_i – круговая частота i -го псевдоисточника; i – количество псевдоисточников; $\sum_{n=1}^N U_{ni} \cos(\Omega_i t)$ – сумма составляющих напряжения на n -ой гармонике псевдоисточника; $i_d(t)$ – значение тока действительного источника питания; $i_{nci}(t)$ – значение тока псевдоисточника; $\sum_{m=1}^M I_{mai} \cos(\Omega_i t)$ – сумма косинусных составляющих напряжения на m -ой гармонике; $\sum_{m=1}^M I_{mbi} \sin(\Omega_i t)$ – сумма синусных составляющих напряжения на m -ой гармонике.

Количество псевдоисточников зависит от количества неизвестных параметров схемы замещения. Применительно к Т-образной схеме замещения неизвестными параметрами являются ЭМП схемы и гармоники токов в цепи ротора и контуре намагничивания.

Введение одного дополнительного псевдоисточника позволяет составить десять идентификационных уравнений баланса составляющих мгновенной мощности.

Таблица 1 – Частоты мгновенной мощности при использовании псевдоисточника

Номер гармоники мощности	Составляющая мощности	Частоты напряжения и тока, формирующие гармоники мощности
0	–	$\Omega_1 - \Omega_1$
0	–	$\Omega_k - \Omega_k$
2	косинусная	$\Omega_1 + \Omega_1$
2	синусная	$\Omega_1 + \Omega_1$
$k-1$	косинусная	$\Omega_k - \Omega_1$
$k-1$	синусная	$\Omega_k - \Omega_1$
$1+k$	косинусная	$\Omega_1 + \Omega_k$
$1+k$	синусная	$\Omega_1 + \Omega_k$
$2k$	косинусная	$\Omega_k + \Omega_k$
$2k$	синусная	$\Omega_k + \Omega_k$

В табл. 1 принято, что Ω_1 соответствует частоте напряжения и тока действительного источника, Ω_k – частоте псевдоисточника; $k = \frac{\Omega_k}{\Omega_1}$ – номер гармоники.

С учетом использования псевдоисточника можно получить составляющие мгновенной мощности на источнике питания, на активном сопротивлении и индуктивности.

Суммарная мгновенная мощность на двух источниках (действительном и псевдоисточнике):

$$\begin{aligned}
 p_{ist}(t) &= u(t)i(t) = \\
 &= \left(\begin{aligned} &U_{1a1} \cos(\Omega_1 t) + U_{1b1} \sin(\Omega_1 t) + \\ &+ U_{1a2} \cos(\Omega_2 t) + U_{1b2} \sin(\Omega_2 t) \end{aligned} \right) \times \\
 &\times \left(\begin{aligned} &I_{1a1} \cos(\Omega_1 t) + I_{1b1} \sin(\Omega_1 t) + \\ &+ I_{1a2} \cos(\Omega_2 t) + I_{1b2} \sin(\Omega_2 t) \end{aligned} \right) = \\
 &= \frac{1}{2} \left(\begin{aligned} &(U_{1b1} I_{1b2} + U_{1a1} I_{1a2} + \\ &+ U_{1b2} I_{1b1} + U_{1a2} I_{1a1}) \cos((k-1)\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1a1} I_{1a2} + U_{1a2} I_{1a1} - \\ &- U_{1b2} I_{1b1} - U_{1b1} I_{1b2}) \cos((k+1)\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1a2} I_{1a2} - U_{1b2} I_{1b2}) \cos(2k\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1a1} I_{1a1} - U_{1b1} I_{1b1}) \cos(2\Omega_1 t) + \\ &+ U_{1a2} I_{1a2} + U_{1b2} I_{1b2} + U_{1b1} I_{1b1} + U_{1a1} I_{1a1} \end{aligned} \right) + \\
 &+ \frac{1}{2} \left(\begin{aligned} &(U_{1b2} I_{1a1} + U_{1a1} I_{1b2} - \\ &- U_{1a2} I_{1b1} - U_{1b1} I_{1a2}) \sin((k-1)\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1a2} I_{1b1} + U_{1a1} I_{1b2} + \\ &+ U_{1b2} I_{1a1} + U_{1b1} I_{1a2}) \sin((1+k)\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1b2} I_{1a2} + U_{1a2} I_{1b2}) \sin(2k\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1b1} I_{1a1} + U_{1a1} I_{1b1}) \sin(2\Omega_1 t) \end{aligned} \right).
 \end{aligned}$$

Мгновенная мощность на активном сопротивлении:

$$\begin{aligned}
 p_R(t) &= \frac{1}{2} R \left(\begin{aligned} &2(I_{1b1} I_{1b2} + I_{1a1} I_{1a2}) \cos((k-1)\Omega_1 t) + \\ &+ 2(I_{1a1} I_{1a2} - I_{1b1} I_{1b2}) \cos((k+1)\Omega_1 t) + \\ &+ (I_{1a2}^2 - I_{1b2}^2) \cos(2k\Omega_1 t) + (I_{1a1}^2 - I_{1b1}^2) \cos(2\Omega_1 t) + \\ &+ I_{1a2}^2 + I_{1a1}^2 + I_{1b2}^2 + I_{1b1}^2 + \\ &+ 2(I_{1a1} I_{1b2} - I_{1b1} I_{1a2}) \sin((k-1)\Omega_1 t) + \\ &+ 2(I_{1a1} I_{1b2} + I_{1b1} I_{1a2}) \sin((k+1)\Omega_1 t) + \\ &+ 2I_{1a2} I_{1b2} \sin(2k\Omega_1 t) + 2I_{1a1} I_{1b1} \sin(2\Omega_1 t) \end{aligned} \right).
 \end{aligned}$$

Мгновенная мощность на индуктивности:

$$\begin{aligned}
 p_L(t) &= -\frac{1}{2} L \Omega_1 \left(\begin{aligned} &-(I_{1a1} I_{1b2} - I_{1b1} I_{1a2}) \times \\ &\times (k-1) \cos((k-1)\Omega_1 t) - \\ &- (I_{1a1} I_{1b2} + I_{1b1} I_{1a2}) (k+1) \cos((k+1)\Omega_1 t) + \\ &+ (I_{1a1} I_{1a2} + I_{1b1} I_{1b2}) (k-1) \sin((k-1)\Omega_1 t) + \\ &+ (I_{1a1} I_{1a2} - I_{1b1} I_{1b2}) (k+1) \sin((k+1)\Omega_1 t) + \\ &+ (I_{1a2}^2 - I_{1b2}^2) k \sin(2k\Omega_1 t) - 2I_{1a2} I_{1b2} k \cos(2k\Omega t) + \\ &+ (I_{1a1}^2 - I_{1b1}^2) \sin(2\Omega_1 t) - 2I_{1a1} I_{1b1} \cos(2\Omega_1 t) \end{aligned} \right).
 \end{aligned}$$

С учетом полученных выше выражений составим уравнения для идентификации ЭМП АД с использованием энергетического метода:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2}(U_{1b1}I_{1b2} + U_{1a1}I_{1a2} + U_{1b2}I_{1b1} + U_{1a2}I_{1a1}) = \\
 & = R_1(I_{1b1}I_{1b2} + I_{1a1}I_{1a2}) + R_2(I_{2b1}I_{2b2} + I_{2a1}I_{2a2}) + \\
 & \quad + \frac{1}{2}L_1\Omega_1(I_{1a1}I_{1b2} - I_{1b1}I_{1a2}) + \\
 & \quad + \frac{1}{2}L_2\Omega_1(I_{2a1}I_{2b2} - I_{2b1}I_{2a2}) + \\
 & \quad + \frac{1}{2}L_m\Omega_1(I_{ma1}I_{mb2} - I_{mb1}I_{ma2}); \\
 & \frac{1}{2}(U_{1a1}I_{1a2} + U_{1a2}I_{1a1} - U_{1b2}I_{1b1} - U_{1b1}I_{1b2}) = \\
 & = R_1(I_{1a1}I_{1a2} - I_{1b1}I_{1b2}) + R_2(I_{2a1}I_{2a2} - I_{2b1}I_{2b2}) + \\
 & \quad + \frac{1}{2}L_1\Omega_1(I_{1a1}I_{1b2} + I_{1b1}I_{1a2}) + \\
 & \quad + \frac{1}{2}L_2\Omega_1(I_{2a1}I_{2b2} + I_{2b1}I_{2a2}) + \\
 & \quad + \frac{1}{2}L_m\Omega_1(I_{ma1}I_{mb2} + I_{mb1}I_{ma2}); \\
 & \frac{1}{2}(U_{1a2}I_{1a2} - U_{ab2}I_{1b2}) = \frac{1}{2}R_1(I_{1a2}^2 - I_{1b2}^2) + \\
 & \quad + \frac{1}{2}R_2(I_{2a2}^2 - I_{2b2}^2) + L_1\Omega_1I_{1a2}I_{1b2}k + \\
 & \quad + L_2\Omega_1I_{2a2}I_{2b2}k + L_m\Omega_1I_{ma2}I_{mb2}k; \\
 & \frac{1}{2}(U_{1a1}I_{1a1} - U_{1b1}I_{1b1}) = \frac{1}{2}R_1(I_{1a1}^2 - I_{1b1}^2) + \\
 & \quad + \frac{1}{2}R_2(I_{2a1}^2 - I_{2b1}^2) + L_1\Omega_1I_{1a1}I_{1b1} + \\
 & \quad + L_2\Omega_1I_{2a1}I_{2b1} + L_m\Omega_1I_{ma1}I_{mb1}; \\
 & (U_{1b1}I_{1b1} + U_{1a1}I_{1a1}) = R_1(I_{1a1}^2 + I_{1b1}^2) + R_2(I_{2a1}^2 + I_{2b1}^2); \\
 & (U_{1a2}I_{1a2} + U_{1b2}I_{1b2}) = R_1(I_{1a2}^2 + I_{1b2}^2) + R_2(I_{2a2}^2 + I_{2b2}^2); \\
 & \frac{1}{2}(U_{1b2}I_{1a1} + U_{1a1}I_{1b2} - U_{1a2}I_{1b1} - U_{1b1}I_{1a2}) = \\
 & = R_1(I_{1a1}I_{1b2} - I_{1b1}I_{1a2}) + R_2(I_{2a1}I_{2b2} - I_{2b1}I_{2a2}) - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_1\Omega_1(I_{1a1}I_{1a2} + I_{1b1}I_{1b2})(k-1) - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_2\Omega_1(I_{2a1}I_{2a2} + I_{2b1}I_{2b2})(k-1) - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_m\Omega_1(I_{ma1}I_{ma2} + I_{mb1}I_{mb2})(k-1); \\
 & \frac{1}{2}(U_{1a2}I_{1b1} + U_{1a1}I_{1b2} + U_{1b2}I_{1a1} + U_{1b1}I_{1a2}) = \\
 & = R_1(I_{1a1}I_{1b2} + I_{1b1}I_{1a2}) + R_2(I_{2a1}I_{2b2} + I_{2b1}I_{2a2}) - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_1\Omega_1(I_{1a1}I_{1a2} - I_{1b1}I_{1b2})(k+1) - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_2\Omega_1(I_{2a1}I_{2a2} - I_{2b1}I_{2b2})(k+1) - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_m\Omega_1(I_{ma1}I_{ma2} - I_{mb1}I_{mb2})(k+1);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2}(U_{1b2}I_{1a2} + U_{1a2}I_{1b2}) = R_1I_{1a2}I_{1b2} + R_2I_{2a2}I_{2b2} - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_1\Omega_1(I_{1a2}^2 - I_{1b2}^2)k - \frac{1}{2}L_2\Omega_1(I_{2a2}^2 - I_{2b2}^2)k - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_m\Omega_1(I_{ma2}^2 - I_{mb2}^2)k; \\
 & \frac{1}{2}(U_{1b1}I_{1a1} + U_{1a1}I_{1b1}) = R_1I_{1a1}I_{1b1} + R_2I_{2a1}I_{2b1} - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_1\Omega_1(I_{1a1}^2 - I_{1b1}^2) - \frac{1}{2}L_2\Omega_1(I_{2a1}^2 - I_{2b1}^2) - \\
 & \quad - \frac{1}{2}L_m\Omega_1(I_{ma1}^2 - I_{mb1}^2);
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} I_{ma1} + I_{2a1} = I_{1a1}; \\ I_{mb1} + I_{2b1} = I_{1b1}; \\ I_{ma2} + I_{2a2} = I_{1a2}; \\ I_{mb2} + I_{2b2} = I_{1b2}. \end{cases}$$

Применительно к Т-образной схеме замещения необходимо вводить один дополнительный псевдоисточник (табл. 2).

Для оценки эффективности предложенного подхода выполним идентификацию ЭМП АД, параметры которых сведены в табл. 3. В табл. 4 сведены результаты идентификации ЭМП АД. В табл. 4 приведены погрешности определения ЭМП АД относительно каталожных данных.

Анализ результатов, сведенных в табл. 4, показал, что погрешность идентификации ЭМП АД с помощью энергетического метода не превышает 5 % при использовании низкочастотных псевдоисточников.

ВЫВОДЫ. Обоснована возможность использования уравнений баланса составляющих мгновенной мощности для определения ЭМП АД при питании от источника синусоидального напряжения.

Использование составляющих гармоник мгновенной мощности в уравнениях баланса позволяет при небольшом количестве гармоник входных сигналов тока и напряжения получить достаточное количество идентификационных уравнений для определения ЭМП АД.

Повышение эффективности использования энергетического метода при определении ЭМП АД достигается за счет введения дополнительного псевдоисточника синусоидального напряжения с фиксированной амплитудой и частотой, формирования и решения системы уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности, при этом ошибка идентификации ЭМП значительно снижается по сравнению с применением традиционных методов и не превышает 5 %.

Таблица 2 – Количество уравнений при идентификации ЭМП АД

№	Количество источников	Количество известных параметров	Количество неизвестных параметров	Количество получаемых уравнений
1	Один (реальных – 1, псевдоисточников – 0)	5	8	6
		$\begin{pmatrix} U_{1a1}, U_{1b1}, I_{1a1}, \\ I_{1b1}, R_1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} I_{2a1}, I_{2b1}, I_{ma1}, I_{mb1}, \\ L_1, L_2, L_m, R_2 \end{pmatrix}$	
2	Два (реальных – 1, псевдоисточников – 1)	7	14	14
		$\begin{pmatrix} U_{1a1}, U_{1b1}, I_{1a1}, \\ I_{1b1}, R_1, U_{1a2}, U_{1b2} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} I_{2a1}, I_{2b1}, I_{ma1}, I_{mb1}, \\ L_1, L_2, L_m, R_2, I_{2a2}, \\ I_{2b2}, I_{ma2}, I_{mb2}, I_{1a2}, I_{1b2} \end{pmatrix}$	

Таблица 3 – Каталогные данные исследуемых асинхронных двигателей

Параметр	Тип двигателя		
	4AA50B2	4A160S2	4F250S2
Паспортные данные			
Мощность двигателя, P_H , кВт	0,12	15	75
Номинальное напряжение, U_H , В	380	380	380
Номинальный ток, I_H , А	0,41	28,5	140
Активное сопротивление статора, R_1 , Ом	59	0,4	0,033
Активное сопротивление ротора, R_2 , Ом	64,4	0,17	0,024
Индуктивное сопротивление статора, X_1 , Ом	40,8	0,7	0,13
Индуктивное сопротивление ротора, X_2 , Ом	75,1	0,93	0,21
Расчетные данные			
Индуктивное сопротивление контура намагничивания, X_m , Ом	930,72	34,26	5,8
Экспериментальные данные АД			
Частота напряжения реального источника, f_1 , Гц	50	50	50
Частота напряжения псевдоисточника, f_2 , Гц	5	5	5
Косинусная составляющая напряжения статора реального источника, U_{1a1} , В	2,06	2,06	2,06
Синусная составляющая напряжения статора реального источника, U_{1b1} , В	-109,95	-109,95	109,95
Косинусная составляющая тока статора реального источника, I_{1a1} , А	-0,47	-60,62	-320,54
Синусная составляющая тока статора реального источника, I_{1b1} , А	-0,49	-22,44	-59,46
Косинусная составляющая напряжения статора псевдоисточника, U_{1a2} , В	0,09	0,09	0,09
Синусная составляющая напряжения статора псевдоисточника, U_{1b2} , В	109,98	109,98	109,98

Таблица 4 – Результаты определения ЭМП АД

Тип двигателя	Данные АД	R_1 , Ом	R_2 , Ом	X_1 , Ом	X_2 , Ом	X_m , Ом
4AA50B2	паспортные	59	64,4	40,8	75,1	930,72
	расчетные	59	67,62	39	72,21	906,06
	отклонение, %	–	5	4,4	3,8	2,7
4A160S2	паспортные	0,4	0,17	0,7	0,93	34,26
	расчетные	0,4	0,175	0,67	0,89	32,84
	отклонение, %	–	2,9	4,3	4,3	4,1
4F250S2	паспортные	0,033	0,024	0,13	0,21	5,8
	расчетные	0,033	0,025	0,125	0,20	5,5
	отклонение, %	–	4,2	3,8	4,8	5

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Машины переменного тока. – М.–Л.: ГЭИ, 1958. – 651 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
3. Кучерук В.Ю. Элементи теорії побудови систем технічного діагностування електромоторів: монографія. – Вінниця: Універсум–Вінниця, 2003. – 195 с.
4. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2000. – 255 с.
5. Hasegawa M., Ogawa D. and Matsui K. Parameter Identification Scheme for Induction Motors Using Output Inter-Sampling Approach // Asian Power Electronics Journal, Apr. 2008, Vol. 2, no. 1, pp. 15–22.
6. Holtz J., Thimm T. Identification of the Machine Parameters in a Vector-Controlled Induction Motor Drive // IEEE Transactions on industry applications. – 1991. – Iss. 27. – № 6. – PP. 1111–1118.
7. Steven R. Shaw. Numerical methods for identification motor parameters // Massachusetts institute of technology. – 1997. – № 2. – 223 p.
8. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007. – 379 p.
9. Крогерис А.Ф., Рашевиц К.К., Трейманис Э.П., Шинка Я.К. Мощность переменного тока. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.
10. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Исследование области решений энергетического метода идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДПУ, 2010. – Вип. 4/2013 (12). – С. 36–52.
11. Резник Д.В., Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Особенности определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей при использовании низкочастотного испытательного напряжения // Электроприводы переменного тока: Труды Международной четырнадцатой научно-технической конференции, 13–16 марта 2007, Екатеринбург. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2007. – С. 279–283.
12. Родькин Д.И. Решение одного класса некорректных электротехнических задач энергетическим методом // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 1/2013 (21). – С. 69–80.
13. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. и др. Баланс энергий в силовых цепях. – Киев: Наукова думка, 1992. – 312 с.
14. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. – М.: Наука, 1968. – 440 с.

ESTIMATION OF APPLICATION EFFICIENCY OF LOW-FREQUENCY VIRTUAL SOURCES FOR ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF INDUCTION MOTORS IDENTIFICATION

D. Reznik, Yu. Romashykhin, D. Rodkin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: dimareznik@yandex.ru

The relevance of electromagnetic parameters identification of induction motors is due to the fact that they are counting starting performance, losses in steel and copper, determining the load capacity of electric machines. The reasons to change the parameters from designed by the manufacturer are: long-term operation, operation after repair and deviations in the manufacture of induction motors. Currently there are many methods, devoted to the identification of electromagnetic parameters identification of induction motors. However, there is no one single method that would be perfect for the identification of electromagnetic parameters identification of induction motors with different capacities and sizes terms in repair shops and electric repair enterprises. Modern methods of identification of electromagnetic parameters identification of induction motors can be developed through the use of power sources with the sine wave of amplitude-controlled voltage. Therefore, the purpose of the work is the development of method for electromagnetic parameters determination of induction motors using components of instantaneous power powered from sine wave sources. The use of components of instantaneous power in power balance equations allows us to develop the energy method, which is based on identification system of equations for electromagnetic parameters identification of induction motors. Feature of the energy method is that the balance equation are developing separately for each harmonics of instantaneous power for each element in the equivalent circuit of induction motors. Identification the electromagnetic parameters identification of induction motors has been invited to perform with the use of voltage and current frequency which is less than the frequency of the mains voltage, i.e. in the frequency range from 0 to 10 Hz. Have been to power of identification of induction motors suggested to use sinusoidal voltage source, and the desired frequency spectrum receive from the so-called «pseudo source». Pseudo source is a dummy source that is not physically, but only mathematically in the balance equation of power. Introduction of one pseudo source allows us to get a sufficient number of identification equations for determination of electromagnetic parameters identification of induction motors on a T-shaped equivalent circuit. Analysis of the results of using the energy method showed that the electromagnetic parameters identification error less than 5 %. Thus, the efficiency of using the energy method for electromagnetic parameters identification of induction motors identification using low pseudo sources has been shown.

Key words: induction motor, low-frequency virtual source, electromagnetic parameters.

REFERENCES

1. Kostenko, M.P. and Piotrovskiy, L.M. (1958), *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electrical Machines. Alternating current machines], Gosenergoizdat, Moscow–Leningrad, Russia. (in Russian)
2. Voldek, A.I. (1974), *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines], Energiya, Leningrad, Russia. (in Russian)
3. Kucheruk, V.Y. (2003), *Elementy teorii pobudovy sistem technichnogo diagnostuvannya elektromotoriv. Monografia* [Elements of the theory of building systems technical diagnostics of electric motor]: Monograph, Universum–Vinnitsa, Vinnitsa, Ukraine (in Ukrainian)
4. Goldberg, O.D. (2000), *Ispitaniya elektricheskikh mashin* [Test the electric machines], Vushaya shkola, Moscow, Russia. (in Russian)
5. 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. 15–22
6. Holtz, J. and Thimm, T. (1991), “Identification of the Machine Parameters in a Vector-Controlled Induction Motor Drive”, *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 27, no. 6, pp. 1111–1118.
7. Steven, R. Shaw. (1997), “Numerical methods for identification motor parameters”, *Massachusetts institute of technology, USA*, no. 2.
8. Akagi, H., Watanabe, E.H. and Aredes, M. (2007), Instantaneous power theory and applications to power conditioning, *Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA*.
9. Krogeris, A., Rashevic, K., Treymanis, E. and Shinka, Ya. (1993), *Moschnost peremennogo toka* [The Power variable current], Fiz.-energ. in-t Latv. AN, Riga, Latvia. (in Russian)
10. Rodkin, D.I. and Romashykhin, Yu.V. (2010), “Examination of the solutions of the energy method for identification of electromagnetic parameters of asynchronous motors”, *Electromekhanichni i enrgozberigayuchi sistemy*, Vol. 4, no. 12, pp. 36–52. (in Russian)
11. Reznik, D.V., Rodkin, D.I. and Romashykhin, Yu.V. (2007), “Features of the definition of electromagnetic parameters of induction motors using low-frequency test voltage” *Elektroprivody peremennogo toka: Trudy Mezhdunarodnoy chetyrnadsatoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Alternating Current Electrical Drives: Proceeding of the Fourteenth International Scientific-Technical Conference], Ekaterinburg, UGTU, March 13–16, 2007, pp. 279–283. (in Russian)
12. Rodkin, D.I. (2013), “Solution of one class of incorrect electrical tasks energy method”, *Electromekhanichni i enrgozberigayuchi sistemy*, Vol. 1, no. 21, pp. 69–80. (in Russian)
13. Tonkal, V.E., Novoselcev, A.V. and Denisyuk, S.P. (1992), *Balans energiy v silovuh cepyah* [Energie balance in power circuit], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine. (in Russian)
14. Fihntengolc, G. *Osnovy matematicheskogo analiza* [Course differential and integral ischisleniya], Nauka, Moscow, Russia. (in Russian)

Стаття надійшла 11.09.2013.