

УДК 621.313.333

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПСЕВДОПОЛИГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ РАЗНОЙ ФОРМЫ**Ю. В. Ромашихин**

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

В настоящее время наблюдается высокий процент выхода из строя асинхронных двигателей как самого массового вида электрических машин. Это обусловлено недостатками эксплуатации, низким качеством ремонта, естественными процессами старения, нарушениями технологии производства, в связи с чем существенное внимание уделяется вопросам определения электромагнитных параметров, которые могут меняться при долголетней эксплуатации или проведении ремонтных операций. Анализ существующих методов определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей позволил выявить их основные недостатки и обосновать возможность использования составляющих мгновенной мощности в задачах идентификации. Для упрощения процедуры определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей предложено использовать так называемые «псевдополигармонические» сигналы, которые можно получить из синусоидальных путем их преобразования. Поэтому целью работы является вопрос развития метода определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей с использованием составляющих мгновенной мощности при питании от источников синусоидального напряжения. Для идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей используется энергетический метод, который основывается на уравнениях баланса составляющих мгновенной мощности. Получение необходимого гармонического состава обеспечивается ограничением периода разложения измеренных синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданный угол. Анализ результатов с использованием указанного подхода показывает, что погрешность идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей не превышает 15 %. Это связано с тем, что ограничение периода разложения сигналов напряжения и тока приводит к нарушению равенства в уравнениях баланса составляющих мгновенной мощности на источнике питания и на элементах схемы замещения. Поэтому для устранения этой погрешности предложено ограничивать период не сигналов напряжения и тока, а сигналов мгновенной мощности на источнике и на элементах схемы замещения. При этом погрешность идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей не превышает 5 %. Таким образом, показана эффективность использования энергетического метода идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей с использованием псевдополигармонических сигналов различной формы.

Ключевые слова: мгновенная мощность, электромагнитные параметры.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПСЕВДОПОЛІГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ РІЗНОЇ ФОРМИ**Ю. В. Ромашихін**

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

На сьогоднішні спостерігається високий відсоток виходу з ладу асинхронних двигунів як найбільш масового виду електричних машин. Це обумовлено недоліками експлуатації, низькою якістю ремонту, природними процесами старіння, порушеннями технології виробництва, у зв'язку з чим значна увага приділяється питанням визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів, які можуть змінюватися при довготривалій експлуатації або проведенні ремонтних операцій. Аналіз існуючих методів визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів дозволив виявити їх основні недоліки та обґрунтувати можливість використання складових миттєвої потужності в задачах ідентифікації. Для спрощення процедури визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів запропоновано використовувати так звані «псевдополігармонічні» сигнали, які можна отримати із синусоїдних шляхом їх перетворення. Тому метою роботи є питання розвитку методу визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів із використанням складових миттєвої потужності при живленні від джерел синусоїдної напруги. Для ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів використовується енергетичний метод, який базується на рівняннях балансу складових миттєвої потужності. Отримання необхідного гармонічного складу забезпечується обмеженням періоду розкладу вимірних синусоїдних сигналів напруги та струму на заданий кут. Аналіз результатів із використанням зазначеного підходу показує, що похибка ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів не перевищує 15 %. Це пов'язано з тим, що обмеження періодів сигналів напруги та струму призводить до порушення рівності в рівняннях балансу складових миттєвої потужності на джерелі живлення й на елементах схеми заміщення. Тому для усунення цієї похибки запропоновано обмежувати період розкладу не сигналів напруги й струму, а сигналів миттєвої потужності на джерелі й на елементах схеми заміщення. При цьому похибка ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів не перевищує 5 %. Таким чином, показано ефективність використання енергетичного методу ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів із використанням псевдополігармонічних сигналів різної форми.

Ключові слова: миттєва потужність, електромагнітні параметри.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время асинхронные двигатели (АД) как самые дешевые и надежные являются наиболее массовой продукцией электромашиностроения. Их доля в общей номенклатуре электродвигателей составляет порядка 90 %, по мощности – 60 % [1, 2]. В Украине, по состоянию на 1990 г., выпускалось ежегодно свыше 10 млн. короткозамкнутых АД серии 4А, на долю которых приходилось до 50 % потребляемой в стране электроэнергии [3].

Широкая распространенность АД предопределена их относительной простотой, достаточно высокой надежностью, а также высоким коэффициентом полезного действия и удовлетворительными конструктивными и эксплуатационными характеристиками.

Однако в зависимости от различных факторов достаточно высокие показатели надежности АД для номинальных условий эксплуатации не совпадают с реальными. Это приводит к выбору двигателей завышенной мощности, увеличению материальных затрат на их ремонт и обслуживание.

Анализ данных по предприятиям Украины показал, что среднегодовой выход асинхронных двигателей в ремонт в различных отраслях промышленности составляет около 20–30 %, а в некоторых отраслях может достигать 50–60 % [4]. Причинами отказов АД являются недостатки эксплуатации, низкое качество ремонта, естественные процессы старения, нарушения технологии производства. Анализ данных показал, что основная доля отказов приходится на повреждение обмоток.

В настоящее время существенное внимание уделяется вопросам определения электромагнитных параметров (ЭМП) АД, оцениванию их рабочих характеристик в случаях, когда происходит изменение ЭМП по разным причинам.

Электромагнитные параметры АД изменяются при [1, 5–7]:

- долговременной эксплуатации, особенно в тех случаях, когда АД работают в тяжелых условиях;
- проведении ремонтных операций;
- отклонениях в изготовлении АД.

Необходимость определения ЭМП обусловлена тем, что значения ЭМП используются для расчета пусковых токов и моментов двигателей, потерь в стали и меди, настройке систем управления электроприводов. Параметры АД необходимы при определении нагрузочной способности двигателя в конкретных условиях технологического процесса.

Анализ существующих методов определения ЭМП АД показал, что большинство из них являются нетехнологичными и не удовлетворяют требованиям как испытательного процесса, так и практических задач современного электропривода [7–10]. Кроме того, известные методы определения ЭМП требуют частичной или полной разборки двигателя, установки дополнительного оборудования на элементы АД, имеют низкую точность или низкий уровень автоматизации. Почти все методы позволяют определять только часть ЭМП АД.

Наиболее эффективными являются методы, в основе которых лежит использование математических

моделей. Использование составляющих мгновенной мощности для задач определения ЭМП АД позволяет улучшить точность их оценивания по сравнению с известными методами [6, 11].

Анализ методов идентификации ЭМП АД [1, 6, 7, 11, 12] показал, что для их реализации необходимо наличие испытательного оборудования, которое может значительно увеличить стоимость диагностического оборудования. Испытательное оборудование должно обеспечить требуемый сигнал напряжения на зажимах статора или необходимый режим работы. Так, например, для энергетического метода [11] является обязательным использование источника полигармонического напряжения для формирования необходимого гармонического состава напряжения и тока, а значит, и мгновенной мощности. В качестве источников полигармонического напряжения для АД могут выступать преобразователи частоты или тиристорные регуляторы напряжения.

В работах [13, 14] предложено выполнять процедуру идентификации ЭМП АД без использования специальных преобразовательных устройств, т.е. с помощью так называемых псевдополигармонических сигналов напряжения и тока.

Целью 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. Энергетический метод позволяет идентифицировать ЭМП АД при питании от источника полигармонического напряжения, который необходим для получения гармонического состава напряжения, тока и мгновенной мощности.

Идентификационные уравнения формируются на основании баланса составляющих мгновенной мощности источника полигармонического напряжения и на элементах схемы замещения (СЗ) АД [11, 13–15].

Однако, как было отмечено выше, в последнее время появилась возможность проводить процедуру идентификации ЭМП АД при питании от источника синусоидального напряжения, что позволит существенно снизить стоимостные показатели диагностического оборудования.

При питании от синусоидального источника напряжение и ток фазы статора АД можно представить в виде:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cos(\Omega t); \\ i(t) &= I_m \cos(\Omega t - \varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_m, I_m – амплитудные значения напряжения и тока; Ω – частота сетевого напряжения; φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

С учетом преобразований, выражение для тока статора (1) примет вид:

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \cos(\varphi) \cos(\Omega t) + \\ &+ I_m \sin(\varphi) \sin(\Omega t) = \\ &= I_{ma} \cos(\Omega t) + I_{mb} \sin(\Omega t), \end{aligned} \quad (2)$$

где I_{ma} – косинусная составляющая тока статора;
 I_{mb} – синусная составляющая тока статора.

В качестве метода для определения ЭМП АД может использоваться энергетический метод, в основе которого лежит использование уравнений баланса составляющих мгновенной мощности [11, 15].

Базовым уравнением баланса является равенство мгновенной мощности источника питания $p_{ist}(t)$ и сумм мгновенных мощностей потребителей, входящих в систему [11]:

$$p_{ist}(t) = \sum_{i=1}^H p_i(t), \quad (3)$$

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

Баланс мощности вытекает как следствие из теоремы Телледжена: сумма произведений напряжений $u_i(t)$ и токов $i_i(t)$ всех ветвей цепи, удовлетворяющих законам Кирхгофа, равна нулю [15]. Произведение $u_i(t)i_i(t)$ представляет собой мгновенную мощность $p_i(t)$ i -й ветви, поэтому сумма мощностей всех ветвей цепи равняется нулю.

Применительно к АД в качестве потребителей выступают элементы схемы замещения [1, 5, 8, 10, 11]. Для Т-образной схемы замещения – это индуктивности рассеяния статора L_1 и ротора L_2' , индуктивность контура намагничивания L_μ , сопротивления статора R_1 и ротора R_2' (рис. 1).

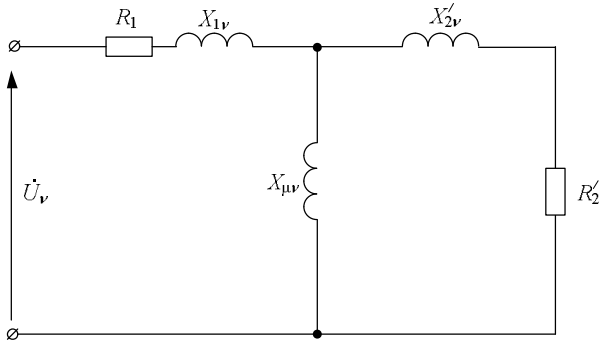


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения АД

Уравнение 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 [11, 13]:

$$p_{ist}(t) = p_{R1}(t) + p_{R2}(t) + p_{L1}(t) + p_{L\mu}(t) + p_{L2}(t), \quad (4)$$

где $p_{R1}(t)$, $p_{R2}(t)$, $p_{L1}(t)$, $p_{L\mu}(t)$, $p_{L2}(t)$ – 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 [11]:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N U_n \cos(n\Omega t - \varphi_n); \quad (5)$$

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

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.

С учетом математических преобразований, выражение (6) можно представить в виде:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N (U_{na} \cos(n\Omega t) + U_{nb} \sin(n\Omega t)); \quad (6)$$

$$i(t) = \sum_{m=1}^M (I_{ma} \cos(m\Omega t) + I_{mb} \sin(m\Omega t)),$$

где $U_{na} = U_n \cos \varphi_n$, $U_{nb} = U_n \sin \varphi_n$ – косинусные и синусные составляющие напряжения на n -ой гармонике; $I_{ma} = I_m \cos \varphi_m$, $I_{mb} = I_m \sin \varphi_m$ – косинусные и синусные составляющие тока на m -ой гармонике.

Зависимость для мгновенной мощности, с учетом выражений (6), приобретает вид [7, 11, 13]:

$$p(t) = u(t)i(t) =$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{ma} + U_{nb} I_{mb}) \cos((m-n)\Omega t) +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{ma} - U_{nb} I_{mb}) \cos((m+n)\Omega t) +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma}) \sin((m-n)\Omega t) +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{mb} - U_{nb} I_{ma}) \sin((m+n)\Omega t).$$

Таким образом, мгновенная мощность состоит из двух групп составляющих. Первая группа образуется в результате умножения одночастотных компонент напряжения и тока, т.е. при $m = n$. При этом частоты гармоник мгновенной мощности равны $k_c = m - n = 0$ и $k_c = m + n = 2m$. Нулевая частота $k = 0$ соответствует постоянному значению мощности.

Вторая группа составляющих мгновенной мощности образуется в результате умножения разночастотных компонент напряжения и тока ($m \neq n$). Частоты гармоник мгновенной мощности при этом равны $k_s = m \pm n \neq 0$.

Как известно, мгновенная мощность кроме постоянной компоненты включает в себя косинусные и синусные составляющие. Частоты гармоник мгновенной мощности (k) формируются в результате умножения всех компонент гармоник напряжения (n) и тока (m) и определяются как $k = m \pm n$. Так, например, 4-я гармоника мгновенной мощности ($k = 4$) при наличии в сигналах напряжения и тока гармоник с номерами $m = n = 1, 3, 5, 7$ формируется всеми рассматриваемыми гармониками, т.е. $k = m + n = 1 + 3 = 4$; $k = m - n = 5 - 1 = 4$; $k = m - n = 7 - 3 = 4$.

В соответствии с выражением (4), система уравнений баланса мощностей формируется для каждой из гармоник в виде равенства составляющих мгновенной мощности источника полигармонического напряжения сумме составляющих мгновенной мощности на активных и индуктивных сопротивлениях Т-образной схемы замещения:

$$\begin{cases} P_{0\ ist} = P_{0R1} + P_{0R\mu} + P_{0R2}; \\ P_{ka\ ist} = P_{kaR1} + P_{kaR2} + P_{kaL1} + P_{kaL\mu} + P_{kaL2}; \\ P_{kb\ ist} = P_{kbR1} + P_{kbR2} + P_{kbL1} + P_{kbL\mu} + P_{kbL2}, \end{cases} \quad (7)$$

где P_{0i} – постоянная составляющая мгновенной мощности на i -ом элементе; $P_{ka i}$, $P_{kb i}$ – соответственно, косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности на i -ом элементе.

Следует отметить, что при использовании Т-образной СЗ неизвестными ЭМП являются сопротивления и индуктивности цепей схемы, а также составляющие токов (косинусные и синусные) роторной цепи и контура намагничивания. При этом, по закону Кирхгофа, ток статорной цепи равен сумме токов контура намагничивания и роторной цепи на соответствующей гармонике:

$$I_{1av} = I_{\mu av} + I'_{2av}, \quad I_{1bv} = I_{\mu bv} + I'_{2bv}.$$

При использовании G гармоник напряжения и тока можно получить $4G - 1$ уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности, т.е. при N неизвестных ЭМП СЗ и $2G$ неизвестных составляющих гармоник токов $G \geq (N - 1) / 2$. Таким образом, для Т-образной СЗ при $N = 6$ необходимо использовать три гармоники напряжения и тока $G = 3$.

Уравнения баланса мощностей при использовании трех гармоник напряжения и тока ($m = n = 1, 3, 5$) примут вид [11, 13]:

$$\begin{aligned} P_{0\ ist\Sigma} &= P_{0R1} + P_{0R2}; \\ P_{2a\ ist\Sigma} &= P_{2aR1} + P_{2aR2} + P_{2aL1} + P_{2aL\mu} + P_{2aL2}; \end{aligned}$$

$$P_{2b\ ist\Sigma} = P_{2bR1} + P_{2bR2} + P_{2bL1} + P_{2bL\mu} + P_{2bL2};$$

$$P_{4a\ ist\Sigma} = P_{4aR1} + P_{4aR'2} + P_{4aL1} + P_{4aL\mu} + P_{4aL'2};$$

$$P_{4b\ ist\Sigma} = P_{4bR1} + P_{4bR2} + P_{4bL1} + P_{4bL\mu} + P_{4bL2};$$

$$P_{6a\ ist\Sigma} = P_{6aR1} + P_{6aR2} + P_{6aL1} + P_{6aL\mu} + P_{6aL2};$$

$$P_{6b\ ist\Sigma} = P_{6bR1} + P_{6bR2} + P_{6bL1} + P_{6bL\mu} + P_{6bL2};$$

$$P_{8a\ ist\Sigma} = P_{8aR1} + P_{8aR2} + P_{8aL1} + P_{8aL\mu} + P_{8aL2};$$

$$P_{8b\ ist\Sigma} = P_{8bR1} + P_{8bR2} + P_{8bL1} + P_{8bL\mu} + P_{8bL2};$$

$$P_{10a\ ist\Sigma} = P_{10aR1} + P_{10aR2} + P_{10aL1} + P_{10aL\mu} + P_{10aL2};$$

$$P_{10b\ ist\Sigma} = P_{10bR1} + P_{10bR2} + P_{10bL1} + P_{10bL\mu} + P_{10bL2}.$$

Анализ приведенных уравнений баланса гармоник мгновенной мощности показывает, что для определения ЭМП АД с помощью Т-образной схемы замещения достаточно использовать три гармоники напряжения и тока, т.к. при этом получается 11 составляющих мгновенной мощности при 11 неизвестных схемы замещения (сопротивление статора R_1 определяется заранее).

Однако при идентификации ЭМП АД с помощью энергетического метода необходимо обеспечить требуемый гармонический состав сигналов напряжения и тока. Для этого, как уже отмечалось, могут использоваться преобразователи частоты или тиристорные регуляторы напряжения. Но их использование вызывает увеличение стоимостных и массогабаритных показателей при создании систем для идентификации ЭМП АД. Поэтому для решения этой проблемы предложено использовать псевдополигармонические сигналы напряжения и тока при синусоидальном питании АД (рис. 2). Для этого измеренные синусоидальные сигналы напряжения и тока статора АД раскладывают в ряд Фурье на интервале T' , который отличается от периода сетевого напряжения, т.е. от $T = 0,02$ с. Это позволяет получить требуемый гармонический состав сигналов напряжения и тока при формировании идентификационных уравнений баланса мощностей.

Применительно к выражению (2) можно брать не период повторяемости, а любой промежуток и считать, что функция за границами этого промежутка повторяется. То есть если функции $u(t)$ и $i(t)$ рассматриваются на одном заданном участке, то для того, чтобы разложить их в ряд Фурье, необходимо представить, что время T' является периодом повторяемости функции. Так, на следующих участках функции будут иметь такой же вид, как и на рассматриваемом участке. Тогда к такой функции применим Фурье-анализ и могут быть получены коэффициенты разложения в тригонометрический ряд. То есть благодаря свойствам рядов Фурье возможно выполнить разложение в тригонометрический ряд произвольной функции на произвольно заданном промежутке во всей области определения функции.

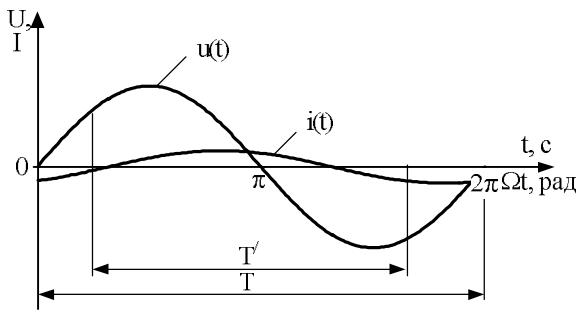


Рисунок 2 – Синусоидальні сигнали напруги і струму

В такому випадку при синусоїдальному живленні можна виконати розкладання в ряд Фур'є на частині періода мережевої напруги і отримати тригонометричну залежність вказаного сигналу на заданому інтервалі. Цей прийом усуває перешкоди, пов'язані з неможливістю якісної ідентифікації при відсутності суттєвих рівнів гармонік струму і напруги. Однак слід зауважити, що при використанні енергетичного методу необхідно враховувати зміну індуктивних опорів при зміні періоду повторення розглянутих сигналів у вигляді $X_i' = \Omega' L_i$, де Ω' – кутова частота, що відповідає періоду розкладання T' .

Виходячи з вищевикладеного, для розглянутих періодичних сигналів застосуємо перетворення Фур'є, відповідно до якого для будь-якого періодичного сигналу можна виконати розкладання по косинусним і синусним складовим при періоді повторюваності T' :

$$U_0' = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} u(t) dt;$$

$$U_{na}' = \frac{2}{T'} \int_0^{T'} u(t) \cos(n\Omega' t) dt;$$

$$U_{nb}' = \frac{2}{T'} \int_0^{T'} u(t) \sin(n\Omega' t) dt;$$
(8)

де U_0' – постійна складова напруги для періоду розкладання T' ; U_{na}' , U_{nb}' – косинусна і синусна складові напруги для періоду розкладання T' .

Аналогічні коефіцієнти розкладання в ряд Фур'є можна отримати і для струму:

$$I_0' = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} i(t) dt;$$

$$I_{ma}' = \frac{2}{T'} \int_0^{T'} i(t) \cos(m\Omega' t) dt;$$

$$I_{mb}' = \frac{2}{T'} \int_0^{T'} i(t) \sin(m\Omega' t) dt;$$
(9)

де I_0' – постійна складова струму для періоду розкладання T' ; I_{ma}' , I_{mb}' – косинусна і синусна складові струму для періоду розкладання T' .

На основі вищевикладеного, можна розглянути наступні види псевдополігармонічних сигналів, представлених на рис. 3. Слід зауважити, що всі псевдополігармонічні сигнали отримуються при різних способах обмеження періоду сигналів. При цьому ще може виконуватися симетрія отриманих сигналів.

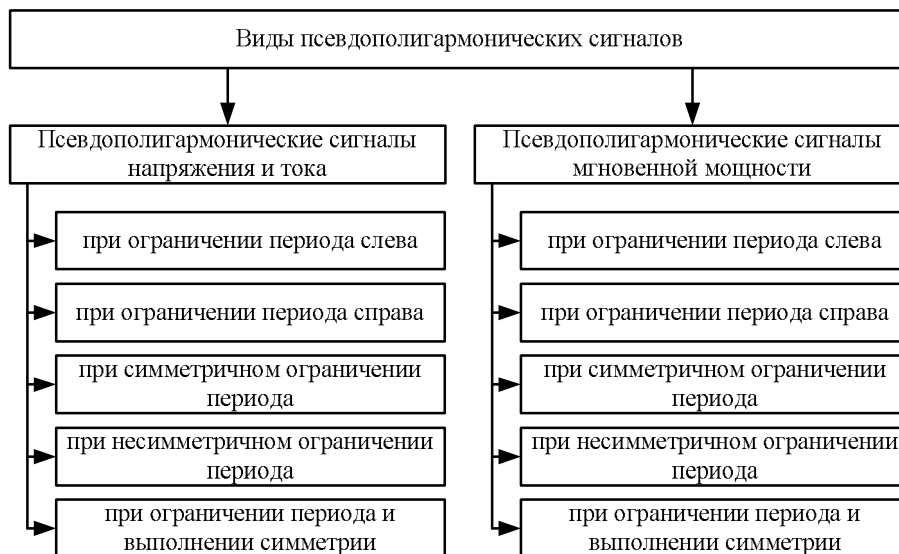


Рисунок 3 – Класифікація псевдополігармонічних сигналів

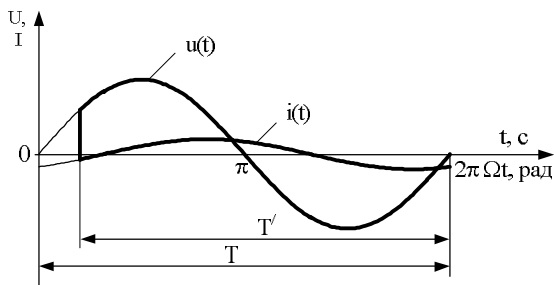
Таким образом, использование свойств рядов Фурье позволяет получить следующие виды псевдополигармонических сигналов напряжения и тока:

– ограничение интервала разложения синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданный угол слева (рис. 4,а) или справа (рис. 4,б) от границ периода;

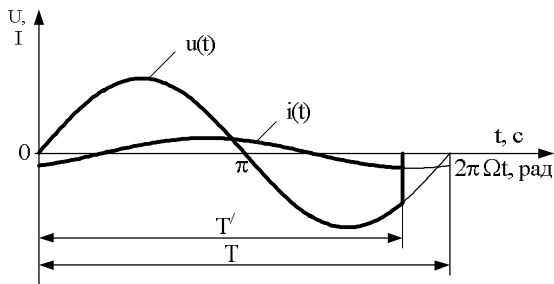
– ограничение интервала разложения синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданные симметричные углы слева и справа от границ периода (рис. 4,в, $\varphi_1 = \varphi_2$);

– ограничение интервала разложения синусоидальных сигналов напряжения и тока на заданные несимметричные углы слева и справа от границ периода (рис. 4,в, $\varphi_1 \neq \varphi_2$).

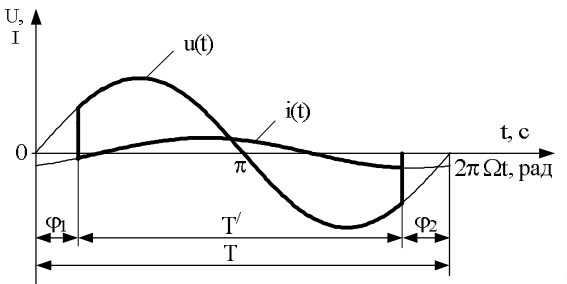
В соответствии с вышеизложенным, можно выделить частный случай, когда интервалы, на которых заданы сигналы напряжения и тока, различны (рис. 5). Так, например, сигнал напряжения может быть задан на периоде T' , а сигнал тока – на периоде T'' . Тогда в качестве общего периода разложения необходимо выбирать больший период, т.е. T'' , и дополнять второй сигнал нулевой составляющей на интервале $(T'' - T')$.



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Псевдополигармонические сигналы напряжения и тока

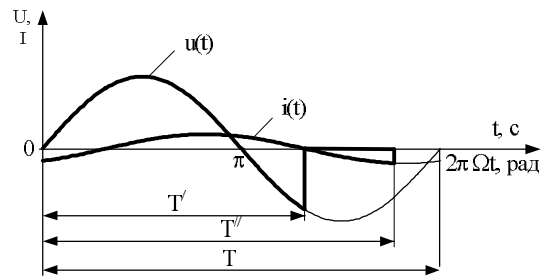


Рисунок 5 – Сигналы напряжения и тока

Разложение указанных сигналов напряжения и тока в ряд Фурье позволяет получить необходимый гармонический состав для формирования идентификационных уравнений балансов мощностей. Уровень гармоник зависит от выбранного периода разложения. Однако недостатком приведенного способа получения псевдополигармонических сигналов напряжения и тока является наличие постоянной составляющей.

Для описания симметрии необходимо ввести два понятия:

- «сдвиг» – смещение искомого сигнала вправо (или влево) на полпериода;
- «поворот» – симметричное отображение искомого сигнала относительно продольной или поперечной осей.

В соответствии с введенными понятиями, можно выполнять сдвиг или поворот искомого сигнала, а также можно одновременно совмещать сдвиг и поворот. На рис. 6 приведены условные обозначения действий при преобразовании искомого сигнала.

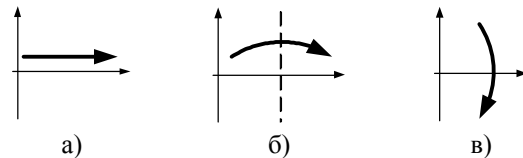


Рисунок 6 – Способы получения псевдополигармонических сигналов при сдвиге сигнала (а), повороте сигнала относительно поперечной (б) или продольной (в) осей

Таким образом, следует выделить возможные варианты получения псевдополигармонических сигналов. Для этого рассмотрим все возможные случаи их получения с учетом введенных понятий. При этом получается два вида псевдополигармонических сигналов.

Для первого случая искомым сигналом вначале сдвигают вправо, а затем симметрично отражают относительно продольной оси (или вначале симметрично отражают относительно продольной оси, а затем сдвигают вправо). Вид рассмотренного сигнала представлен в табл. 1.

Аналогично можно получить второй случай, для которого искомым сигналом вначале симметрично отражают относительно продольной оси, а затем относительно поперечной оси (или вначале симметрично отражают относительно поперечной оси, а затем относительно продольной оси). Вид рассмотренного сигнала представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Способы получения псевдополигармонических сигналов

Условное обозначение действий при преобразовании искомого сигнала	Вид получаемого псевдополигармонического сигнала
<p>или</p>	
<p>или</p>	

В соответствии с вышеизложенным, анализируемый сигнал будет состоять из двух частей: первая часть – искомый сигнал, заданный на первом полупериоде; вторая часть – сигнал, полученный путем сдвига или поворота искомого сигнала и представленный на втором полупериоде.

Рассмотрим эффективность использования энергетического метода при идентификации ЭМП АД с использованием псевдополигармонических сигналов различной конфигурации. Для исследования выбран АД номинальной мощностью $P_n = 4$ кВт ($R_1 = 1,35$ Ом; $R_2' = 1,39$ Ом; $L_1 = 0,00676$ Гн; $L_2' = 0,00673$ Гн; $L_\mu = 0,246$ Гн). Питание АД осуществляется от источника синусоидального напряжения. Сигналы напряжения и тока статора показаны на рис. 7.

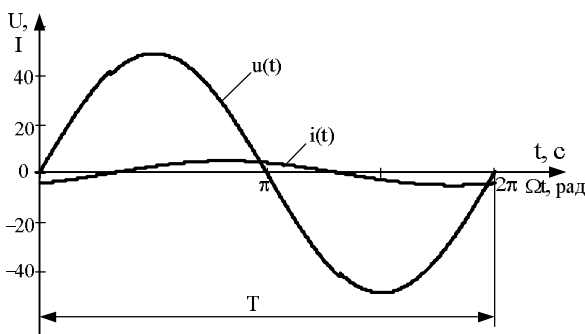


Рисунок 7 – Сигналы напряжения и тока статора исследуемого АД

Таким образом, для синусоидальных сигналов напряжения и тока (рис. 7) получим рассмотренные выше псевдополигармонические сигналы. Ограничение интервала разложения выберем равным $\pi/2$. При ограничении интервала разложения синусоидальных сигналов напряжения и тока на несимметричные углы слева и справа от границ периода примем $\varphi_1 = \pi/2$, $\varphi_2 = \pi/4$.

Идентификацию ЭМП АД выполним для полученных разложений с использованием энергетического метода с учетом первых трех гармоник псевдополигармонических сигналов напряжения и тока. Неизвестными параметрами при идентификации выступают ЭМП схемы замещения АД (активные сопротивления и индуктивности статора, ротора и контура намагничивания) и составляющие гармоник токов ротора и контура намагничивания. Таким образом, при использовании трех гармоник напряжения и тока можно получить десять идентификационных уравнений при десяти неизвестных параметрах схемы замещения АД.

Результаты идентификации ЭМП АД сведены в табл. 2. В табл. 2 погрешность идентификации ЭМП АД рассчитывалась в виде:

$$\Delta R_2 = \frac{R_2' - R_{2r}}{R_2'} 100 \% ; \quad \Delta L_1 = \frac{L_1 - L_{1r}}{L_1} 100 \% ;$$

$$\Delta L_\mu = \frac{L_\mu - L_{\mu r}}{L_\mu} 100 \% ; \quad \Delta L_2 = \frac{L_2' - L_{2r}}{L_2'} 100 \% ,$$

где R_{2r} , L_{1r} , $L_{\mu r}$, L_{2r} – значения расчетных ЭМП СЗ с использованием энергетического метода.

Таким образом, анализ результатов, сведенных в табл. 2, показывает, что наибольшая погрешность наблюдается при идентификации ЭМП АД с использованием псевдополигармонических сигналов напряжения и тока, полученных при ограничении периода разложения синусоидальных сигналов на заданный угол. Погрешность связана с тем, что в рассматриваемых сигналах появляется постоянная составляющая, которая отсутствует в исходном сигнале переменного тока. Гораздо лучшие результаты наблюдаются для симметрично отображенных сигналов, при использовании которых погрешность идентификации ЭМП АД не превышает 6% (табл. 2).

Анализ результатов использования псевдополигармонических сигналов напряжения и тока показал, что при этом возникают погрешности идентификации ЭМП АД. Это связано с тем, что ограничение периода разложения сигналов напряжения и тока приводит к ошибкам вычисления индуктивностей цепей за счет изменения частоты при ограничении периода разложения сигналов. Поэтому для устранения этой погрешности предложено ограничивать не сигналы напряжения и тока, а сигналы мгновенной мощности на источнике и на элементах схемы замещения.

Таблица 2 – Результаты идентификации ЭМП АД с использованием псевдополигармонических сигналов напряжения и тока

Способ получения псевдополигармонических сигналов напряжения и тока	Ошибки идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя, %			
	ΔR_2	ΔL_1	ΔL_μ	ΔL_2
Ограничение интервала разложения сигналов слева на угол $\varphi_1 = \pi / 2$	0,91	8,51	15,64	8,97
Ограничение интервала разложения сигналов справа на угол $\varphi_1 = \pi / 2$	0,93	8,76	15,65	8,84
Ограничение интервала разложения сигналов на симметричные углы $\varphi_1 = \varphi_2 = \pi / 2$	0,77	7,38	14,40	7,11
Ограничение интервала разложения сигналов на несимметричные углы $\varphi_1 = \pi / 2, \varphi_2 = \pi / 4$	0,78	7,97	14,61	7,78
Ограничение интервала разложения сигнала напряжения на угол $\varphi_1 = \pi / 2$, а тока – на $\varphi_2 = \pi / 4$	2,71	12,4	17,84	11,3
Ограничение интервала разложения сигналов слева на угол $\varphi_1 = \pi / 2$ и сдвиг вправо, а затем симметричное отражение относительно продольной оси	0,52	4,21	5,12	4,02
Ограничение интервала разложения сигналов слева на угол $\varphi_1 = \pi / 2$ и симметричное отражение относительно поперечной оси, а затем симметричное отражение относительно продольной оси	0,52	4,35	5,87	4,24

Для оценки эффективности предложенного подхода покажем, что закон сохранения энергии выполняется при разложении сигналов мощности на любом участке. Рассмотрим, как выполняется баланс составляющих мгновенной мощности при рассмотрении сигналов на периоде, меньшем периода сетевого напряжения. Для этого в простейшем случае можно рассмотреть Т-образную схему замещения, которая состоит из статорной цепи, цепи намагничивания и роторной цепи (рис. 1).

Составляющие мгновенной мощности на источнике P_{ist} и активных сопротивлениях и индуктивностях P_{sz} , полученные при номинальном напряжении питания АД, сведены в табл. 3, где $P_{sz} = P_{R1} + P_{L1} + P_{L\mu} + P_{R2} + P_{L2}$.

Таблица 3 – Составляющие мгновенной мощности источника синусоидального напряжения и элементов схемы замещения

№ гармоники	P_{ist} , ВА	P_{sz} , ВА	Δ , %
0	0,03	0,03	0,043
1	0,028	0,028	0,062
2	$5,934 \cdot 10^{-3}$	$5,937 \cdot 10^{-3}$	0,051
3	$3,575 \cdot 10^{-3}$	$3,576 \cdot 10^{-3}$	0,027
4	$2,594 \cdot 10^{-3}$	$2,594 \cdot 10^{-3}$	0,007
5	$2,044 \cdot 10^{-3}$	$2,043 \cdot 10^{-3}$	0,053
6	$1,69 \cdot 10^{-3}$	$1,688 \cdot 10^{-3}$	0,109
7	$1,442 \cdot 10^{-3}$	$1,439 \cdot 10^{-3}$	0,178
8	$1,258 \cdot 10^{-3}$	$1,254 \cdot 10^{-3}$	0,261
9	$1,116 \cdot 10^{-3}$	$1,112 \cdot 10^{-3}$	0,359
10	$1,003 \cdot 10^{-3}$	$9,978 \cdot 10^{-4}$	0,473
11	$9,105 \cdot 10^{-4}$	$9,05 \cdot 10^{-4}$	0,606
12	$8,34 \cdot 10^{-4}$	$8,276 \cdot 10^{-4}$	0,761
13	$7,694 \cdot 10^{-4}$	$7,622 \cdot 10^{-4}$	0,941
14	$7,142 \cdot 10^{-4}$	$7,06 \cdot 10^{-4}$	1,150

Однако следует отметить, что в приведенных результатах есть один недостаток: необходимость определения составляющих мгновенной мощности в цепях схемы замещения. Эта операция в большинстве случаев затруднительна, т.к. токи намагничивания и токи ротора являются неизвестными и требуют определения с использованием разработанного математического аппарата уравнений баланса мощностей. Поэтому для идентификации ЭМП с использованием псевдополигармонических сигналов предложен другой подход. В соответствии с этим подходом необходимо измерять только напряжение и ток статора и на основании этих измерений определять сигнал мощности источника синусоидального напряжения. На рис. 8 приведены кривые мощности источника синусоидального напряжения, на основании которых будут строиться идентификационные уравнения для исследуемого АД.

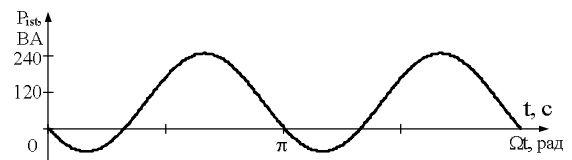


Рисунок 8 – Сигнал мгновенной мощности источника синусоидального напряжения

Для получения псевдополигармонических сигналов, как уже отмечалось, необходимо рассматривать сигнал на периоде, отличном от сетевого. Поэтому будем анализировать полученные зависимости

(рис. 7, 8) на періоді $T' = 3\pi/2$ с. Розкладження ука-
заних залежностей в ряд Фур'є дозволяє полу-
чить коефіцієнти тригонометричного ряду:

$$i_1(t) = I_0 + \sum_{m=1}^K I_{ma} \cos(m\Omega't) - \sum_{m=1}^K I_{mb} \sin(m\Omega't);$$

$$P_{ist}(t) = P_{0\ ist} + \sum_{k=1}^K P_{ka\ ist} \cos(k\Omega't) - \sum_{k=1}^K P_{kb\ ist} \sin(k\Omega't),$$

где $\Omega' = \frac{2\pi}{T'}$ – угловая частота псевдополигармони-
ческих сигналов; $P_{0\ ist}$ – постоянная составляющая
мгновенной мощности источника синусоидального
напряжения; $P_{ka\ ist}$, $P_{kb\ ist}$ – косинусные и синусные
составляющие мгновенной мощности источника
синусоидального напряжения; k – номер гармоники
мгновенной мощности источника синусоидального
напряжения.

Анализ восстановленных сигналов (рис. 9, сиг-
нал $p_{ist}(t)$) показывает, что в месте ограничения
периода разложения возникают колебания, которые
искажают гармонический состав всего восстано-
вленного сигнала, что необходимо будет учесть в
дальнейших исследованиях.

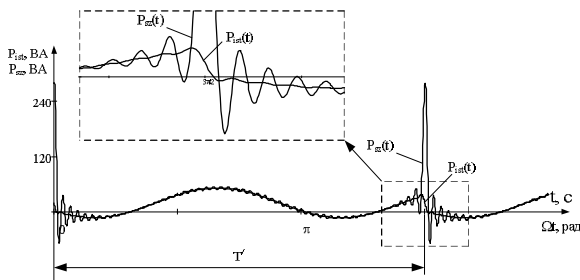


Рисунок 9 – Сигналы мгновенной мощности источника синусоидального напряжения и элементов схемы замещения

Также следует отметить, что при восстановлении
сигналов немаловажную роль играет количество
гармоник ряда Фур'є. Их количество необходимо
для того, чтобы адекватно восстановить сигнал в
месте ограничения периода разложения, т.е. в нача-
ле и в конце периода псевдополигармонических
сигналов.

На рис. 9 приведены сигналы мгновенной мощ-
ности источника синусоидального напряжения и
мгновенной мощности элементов схемы замещения.
Последняя составляющая определена в соответст-
вии с выражением:

$$P_{sz}(t) = P_{R1}(t) + P_{L1}(t) + P_{L\mu}(t) + P_{R2}(t) + P_{L2}(t),$$

где

$$P_{R1}(t) = i_1'(t)R_1; \quad P_{L1}(t) = L_1 \frac{di_1'(t)}{dt} i_1'(t);$$

$$P_{L\mu}(t) = L_\mu \frac{di_\mu'(t)}{dt} i_\mu'(t); \quad P_{R2}(t) = i_2'(t)R_2';$$

$$P_{L2}(t) = L_2' \frac{di_2'(t)}{dt} i_2'(t).$$

Причем токи в составляющих мгновенной мощ-
ности могут быть найдены при идентификации
ЭМП АД с использованием энергетического метода
уравнений баланса мощностей.

Для того, чтобы избежать погрешности в урав-
нениях баланса мощностей, связанной с возникно-
вением колебаний в начале и в конце периода, пред-
ложено полученные псевдополигармонические сиг-
налы рассматривать не на периоде T' , а на периоде
 T'' (рис. 10). Это позволит исключить из уравнений
гармоники мощности, вызванные колебаниями в
начале и в конце периода псевдополигармонических
сигналов.

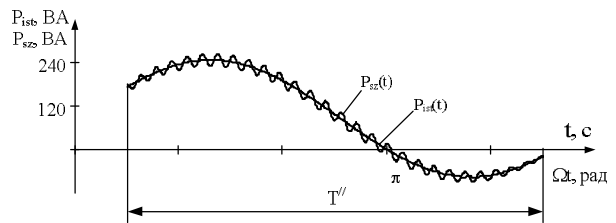


Рисунок 10 – Сравнение сигналов мгновенной мощности источника синусоидального напряжения и элементов схемы замещения

Результаты сравнения составляющих мгновен-
ной мощности источника синусоидального напря-
жения и элементов схемы замещения приведены в
табл. 3.

Таким образом, при идентификации ЭМП АД с
использованием псевдополигармонических сиг-
налов напряжения и тока необходимо выполнять
двойное ограничение периода разложения синусои-
дальных сигналов тока статора и мгновенной мощ-
ности источника синусоидального напряжения.

Эффективность идентификации ЭМП АД с ис-
пользованием энергетического метода приведена в
табл. 4.

Таблица 4 – Результаты идентификации ЭМП АД с использованием псевдополигармонических сигналов мгновенной мощности

Погрешность идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя, %			
ΔR_2	ΔL_1	ΔL_μ	ΔL_2
0,34	2,43	4,31	2,64

Таким образом, анализ результатов, сведенных в
табл. 4, показал, что наиболее целесообразно ис-
пользовать псевдополигармонические сигналы
мгновенной мощности. При этом погрешность
идентификации ЭМП АД не превышает 5 %.

ВЫВОДЫ. Анализ существующих методов идентификации ЭМП АД показал, что большинство из них имеют ряд недостатков. Поэтому для идентификации ЭМП АД необходимо использовать энергетический метод, в основе которого лежит использование уравнений баланса составляющих мгновенной мощности на источнике питания и элементах схемы замещения.

Необходимый гармонический состав для формирования идентификационных уравнений получается путем использования псевдополигармонических сигналов напряжения и тока.

Доказано, что использование псевдополигармонических сигналов напряжения и тока в уравнениях баланса мощностей позволяет идентифицировать ЭМП АД с погрешностью, которая не превышает 15 %.

Увеличение точности идентификации ЭМП АД с помощью энергетического метода достигается путем использования псевдополигармонических сигналов мгновенной мощности. При этом погрешность идентификации ЭМП АД не превышает 5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alonge F., D'Ippolito F., Ferrante G., Raimondi F.M. Parameter identification of induction motor model using genetic algorithms // IEEE, Dept. of Power Eng. – 2002. – Iss. 2. – PP. 1199–1203.
2. Hasegawa M., Ogawa D., Matsui K. Parameter Identification Scheme for Induction Motors Using Output Inter-Sampling Approach // Asian Power Electronics Journal. – 2008. – Iss. 2, № 1. – PP. 15–22.
3. Полковниченко Д.В. Совершенствование диагностирования обмоток короткозамкнутых асинхронных электродвигателей на основе контроля параметров рабочего режима: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.01 «Електричні машини і апарати». – Донецьк, 2003. – 20 с.
4. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
5. Holtz J., Thimm T. Identification of the Machine Parameters in a Vector-Controlled Induction Motor Drive // IEEE Transactions on industry applications.

– November/December 1991. – Iss. 27, № 6. – PP. 1111–1118.

6. Калінов А.П. Визначення параметрів двигунів змінного струму при полігармонійному живленні обмоток статора: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.01 «Електричні машини і апарати». – Кременчук, 2005. – 20 с.

7. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И. Методы определения параметров машин переменного тока // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ. – 2010. – Вип. 4 (63), част. 3. – С. 140–143.

8. Steven R. Shaw. Numerical methods for identification motor parameters. – Massachusetts institute of technology, February 1997. – 223 p.

9. Gastli A. Identification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test // IEEE Transactions on Energy Conv. – March 1999. – Iss. 14, № 1. – PP. 51–56.

10. Yu-Seok Jeong, Jun-Young Lee. Parameter Identification of an Induction Motor Drive with Magnetic Saturation for Electric Vehicle // Journal of Power Electronics. – July 2011. – Iss. 11, № 4. – PP. 418–423.

11. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И., Калинов А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей // Вісник КДПУ. – Кременчук, 2007. – Вип. 3 (44). – С. 130–136.

12. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2000. – 255 с.

13. Родькин Д.И. Особенности применения энергетического метода идентификации двигателей переменного тока при псевдополигармонических сигналах // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 1 (5). – С. 7–20.

14. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Идентификация параметров асинхронных двигателей с псевдополигармоническим воздействием // Электроприводы переменного тока: Труды международной пятнадцатой НТК. – Екатеринбург, 2012. – С. 67–72.

15. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. и др. Баланс энергий в силовых цепях. – Киев: Наукова думка, 1992. – 312 с.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS AT THE IDENTIFICATION THE PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS MOTORS OF THE USE OF DIFFERENT FORMS OF POLYHARMONIC SIGNALS

Yu. Romashykhin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: romashihin_yuriy@mail.ru

Nowadays, there is a high percentage of the malfunction of induction motors (IM) as it is the most massive type of electrical machines. This happens due to some disadvantages of the exploitation, low quality repair, the natural aging process, violations of the manufacturing technology. Currently, considerable attention is paid to the determination of the electromagnetic parameters (EMP) IM. These parameters may be changed under the long-term usage or carrying out repairing. The analysis of the existing methods for the determination of EMP IM revealed their main disadvantages and justified the use of the components of the instantaneous power within the identification problems. To simplify the procedure of determination EMP of IM it is offered to apply so-called "pseudopolyharmonic" signals which are formed from the sinusoidal by means of the converting. Therefore, the aim of the work deals with the method of determining EMP IM using the components of instantaneous power throughout a sinusoidal voltage source. To identify the EMP of IM it is applied the energy method based on the equations of balance of the instantaneous power. Obtaining the necessary harmonic content it is provided by the decomposition of the measured decrease in the period of sinusoidal voltage

and current signals at a given angle. The analysis of the results using this approach provided the evidence that the error identification of EMP IM did not exceed 15 %. This is due to the fact that the reduction at the expansion of voltage and current signals leads to a violation of equality in the balance equations, constitute the instantaneous power at the power source and the elements of the equivalent circuit. Consequently, to eliminate this error it is not necessary to truncate the proposed voltage and current signals, but it is essential to truncate the signals of the instantaneous power at the source and the elements of the equivalent circuit. As a result, the error identification EMI BP did not exceed 5 %. Thus, the effectiveness of the use of the energy method of identification by means of EMI BP pseudopolyharmonic signals of different configurations.

Key words: instantaneous power, the electromagnetic parameters.

REFERENCES

1. Alonge, F., D'Ippolito, F., Ferrante, G. and Raimondi, F.M. (2002), "Parameter identification of induction motor model using genetic algorithms", *IEEE, Dept. of Power Eng.*, vol. 2, pp. 1199–1203.
2. 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.
3. Polkovnichenko, D.V. (2003), "Improvement of the winding diagnostic engine motors on base of the operating parameter checking duty", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 05.09.01, Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine. (in Russian)
4. Jerve, G.K. (1984), *Promyshlenye ispytaniya electricheskih mashin* [Industrial tests of electrical machines], Energoatomizdat, Leningrad, Russia. (in Russian)
5. 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.
6. Kalinov, A.P. (2005), "The determination of parameters of engines of an alternating current at use of polyharmonic feed of windings of stator", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 05.09.01, Kremenchuk State Polytechnical University, Kremenchuk, Ukraine. (in Ukrainian)
7. Romashykhin, Yu.V. and Rodkin, D.I. (2010), "Determination parameters methods of the alternating current machines", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsi KDPU*, vol. 4, no. 63, pp. 140–143. (in Russian)
8. Shaw, Steven R. (1997), *Numerical methods for identification motor parameters*, Massachusetts institute of technology, 223 p.
9. Gastli, A. (1999), "Identification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test", *IEEE Transactions on Energy Conv.*, vol. 14, no. 1, pp. 51–56.
10. Jeong, Yu-Seok and Lee, Jun-Young (2011), "Parameter Identification of an Induction Motor Drive with Magnetic Saturation for Electric Vehicle", *Journal of Power Electronics*, vol. 11, no. 4, pp. 418–423.
11. Romashykhin, Yu.V., Rodkin, D.I. and Kalinov, A.P. (2007), "Energy method of identification induction motors parameters", *Visnyk KDPU*, vol. 3, no. 44, pp. 130–136. (in Russian)
12. Goldberg, O.D. (2000), *Ispytaniya electricheskih mashin* [Test the electric machines], Vushaya shkola, Moscow, Russia. (in Russian)
13. Rodkin, D.I. (2009), "Particularities of the energy method using for the identification of the engine motors with pseudopoligarmonical signals", *Electromechanichni i energozberigayuchi systemy*, vol. 1, no. 5, pp. 7–20. (in Russian)
14. Rodkin, D.I. and Romashykhin, Yu.V. (2012), "Identification engine motors parameters with pseudopoligarmonical signals", *Electroprivody peremennogo toka*, Ekaterinburg, Russia, pp. 67–72. (in Russian)
15. Tonkal, V.E., Novoselcev, A.V., Denisyuk, S.P. (1992), *Balans energiy v silovyh tsepyah* [Energie balance in power circuit], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine. (in Russian)

Стаття надійшла 1.03.2013