

УДК 621.313.333

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОСИГНАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

А. Л. Потапов, Ю. В. Ромашихин, Д. А. Мосюндз

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: ant3872@yandex.ru

Электромагнитные параметры асинхронных двигателей необходимы для определения потерь в стали и меди, перегрузочной способности двигателя, а также расчета и построения рабочих характеристик. Изменение электромагнитных параметров асинхронного двигателя может быть вызвано производственным браком, интенсивной эксплуатацией или проведением ремонтных работ. Таким образом, возникает необходимость точного определения параметров с заданной точностью. Однако не существует универсального метода, подходящего для двигателей различных мощностей, в особенности без отрыва от производства. Одним из современных методов является метод, в основе которого лежит баланс составляющих мгновенной мощности для каждого из элементов Т-образной схемы замещения. В свою очередь, многообразие компонентов мгновенной мощности позволяет составить достаточное количество идентификационных уравнений. Существенным недостатком метода является необходимость использовать дополнительный источник полигармонического напряжения, что влечет за собой увеличение себестоимости комплекса. Таким образом, для решения этой проблемы рассмотрена возможность и показана эффективность использования псевдосигналов тока и напряжения, которые принято называть «псевдополигармоническими». Показаны различные способы формирования псевдосигналов, а также принципы, на основании которых производится построение сигнала. В качестве альтернативного варианта псевдополигармоническим сигналам предложен метод с использованием фиктивного источника питания низкой частоты. Показана эффективность определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя с использованием псевдоисточников для различных частот питающего напряжения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, энергетический метод, фиктивный источник, мгновенная мощность.

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПСЕВДОСИГНАЛІВ НАПРУГИ ТА СТРУМУ

А. Л. Потапов, Ю. В. Ромашихін, Д. А. Мосюндз

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: ant3872@yandex.ru

Електромагнітні параметри асинхронних двигунів необхідні для визначення втрат у сталі та міді, перевантажувальної здатності двигуна, а також розрахунку й побудови робочих характеристик. Зміна електромагнітних параметрів асинхронного двигуна може бути викликана виробничим браком, інтенсивною експлуатацією або проведенням ремонтних робіт. Таким чином, виникає необхідність визначення параметрів із заданою точністю. Однак не існує універсального методу, придатного для двигунів різних потужностей, особливо без відриву від виробництва. Одним із сучасних методів є метод, в основі якого лежить баланс складових миттєвої потужності для кожного з елементів Т-подібної схеми заміщення. У свою чергу, різноманіття компонентів миттєвої потужності дозволяє скласти достатню кількість ідентифікаційних рівнянь. Істотним недоліком методу є необхідність використовувати додаткове джерело полігармонічної напруги, що тягне за собою збільшення собівартості комплексу. Таким чином, для вирішення цієї проблеми розглянуто можливість і показано ефективність використання псевдосигналів струму і напруги, які прийнято називати «псевдополігармонічними». Показано різні способи формування псевдосигналів, а також принципи, на основі яких проводиться побудова сигналу. Як альтернативний варіант псевдополігармонічним сигналам запропоновано метод із використанням фіктивного джерела живлення низької частоти. Показано ефективність визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів із використанням псевдоджерел для різних частот напруги живлення.

Ключові слова: асинхронний двигун, енергетичний метод, фіктивне джерело, миттєва потужність.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Асинхронные двигатели (АД) являются наиболее распространенными электрическими машинами. АД характеризуются надежностью, простотой конструкции, возможностью питания от обычной промышленной сети, меньшими массогабаритными показателями по сравнению с двигателями постоянного тока, легкостью в обслуживании и эксплуатации. Однако в результате интенсивной работы часть двигателей выходит из строя, при этом число поврежденных двигателей может достигать 25 %.

К основным электрическим повреждениям можно отнести следующие: межконтурное замыкание, обрывы в обмотках, пробой изоляции на корпус, старение изоляции и др. Причинами этих неисправностей могут быть: ненормальные условия работы, некачественное питание сети, сложные условия эксплуатации, природные процессы старения и износа, отклонения в технологии обслуживания, нарушение технологии производства (дефекты при изготовлении) и т.д. [1–4]. При этом частота отказов зависит от продолжительности эксплуатации АД.

Большинство АД подвергается ремонту и возвращается на прежние места эксплуатации. Однако процесс ремонта характеризуется вероятностью изменения электромагнитных параметров (ЭМП) АД, которые изначально заявлены производителем. В свою очередь, возникает необходимость производить переналадку оборудования и расчет регуляторов для систем управления. Кроме того, точное знание ЭМП необходимо для расчета пусковых и рабочих характеристик, при определении нагрузочной способности двигателя, потерь в стали и меди [5–9]. Соответственно, возникает необходимость определять ЭМП АД с минимальной погрешностью.

Одним из направлений на пути развития методов идентификации ЭМП АД являются методы, позволяющие проводить процедуру определения параметров без вывода двигателя из производства. Это обстоятельство важно ввиду непрерывности технологического процесса. Также не менее важна экономия времени, средств и человеческих ресурсов, которые затрачиваются при проведении процедуры определения ЭМП АД. Для удовлетворения поставленных условий решено использовать метод, получивший название «энергетический», который базируется на основных положениях теории мгновенной мощности [9, 10].

Для реализации энергетического метода АД представляется соответствующей схемой замещения. В этом случае, с учетом закона сохранения энергии, формируется система идентификационных уравнений, составленных для каждого из элементов схемы замещения. Следует отметить, что для реализации энергетического метода необходимо использовать источник полигармонического напряжения. Такой источник представляет собой отдельное устройство в виде дорогостоящих электротехнических изделий – генераторов полигармонического напряжения.

Решение сложившейся проблемы ранее предложено в работах проф. Родькина Д.И., где в качестве источника полигармонического напряжения предложено использовать так называемые «псевдополигармонические» (ПП) сигналы тока и напряжения или сигналы от псевдоисточника (ПИ) [11]. В случае использования ПП сигналов синусоидальный сигнал напряжения и тока математически усекается на определенный угол до периода T' , который отличается от периода сетевого T . Разложив полученные таким образом сигналы в тригонометрические ряды Фурье, можно получить достаточное количество гармоник, необходимых для формирования идентификационных уравнений. При этом математический аппарат, составленный для энергетического метода, остается неизменным.

Псевдоисточник физическим устройством не является, а вводится в математический аппарат, при этом известными параметрами будут его частота и амплитуда, а неизвестными – токи.

Целью работы является обоснование возможности использования энергетического метода для определения электромагнитных параметров асинхрон-

ного двигателя при питании от синусоидального источника напряжения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Как уже отмечалось, одним из современных методов, позволяющих существенно упростить и автоматизировать процесс идентификации ЭМП АД, является энергетический метод, в основе которого лежит использование баланса составляющих мгновенной мощности $p(t)$ на каждом из элементов схемы замещения. АД принято описывать Т-образной схемой замещения (рис. 1), которая достаточно детально описывает физические процессы, протекающие в двигателе. Схема представлена индуктивностью рассеивания статора L_1 и ротора L_2 , индуктивностью контура намагничивания L_μ , сопротивлением статора R_1 , ротора R_2 и контура намагничивания R_μ .

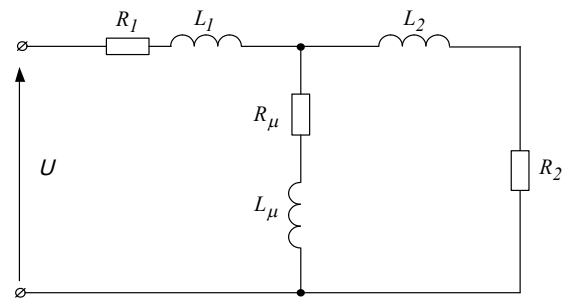


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения АД

Мгновенной мощностью называют физическую величину, определяемую произведением тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ на участке цепи в определенный момент времени: $p(t)=i(t)u(t)$. Стоит отметить, что применение мгновенной мощности обусловлено возможностью формировать идентификационные уравнения для каждой из представленных гармоник [12, 13].

Баланс мощности основан на теореме Телледжена, согласно которой сумма произведений токов и напряжений всех ветвей цепи, удовлетворяющих законам Кирхгофа, равна нулю, т.е. в соответствии с законом сохранения энергии сумма мгновенной мощности для каждого из элементов схемы замещения равна мощности на источнике [10]:

$$P_{ist}(t) = P_{R1}(t) + P_{R'2}(t) + P_{L1}(t) + P_{Lm}(t) + P_{L'2}(t).$$

Таким образом, для Т-образной схемы замещения получаем систему уравнений в виде суммы мгновенных мощностей для источника питания и элементов схемы замещения:

$$\begin{aligned} P_{0u\Sigma} &= P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R'_2}; \\ P_{kau\Sigma} &= P_{kaR_1} + P_{kaR_\mu} + P_{kaR'_2} + \\ &+ P_{kaL_1} + P_{kaL_\mu} + P_{kaL'_2}; \\ P_{kbu\Sigma} &= P_{kbR_1} + P_{kbR_\mu} + P_{kbR'_2} + \\ &+ P_{kbL_1} + P_{kbL_\mu} + P_{kbL'_2}, \end{aligned}$$

где $P_{0u\Sigma}$, P_{0R_1} , P_{0R_μ} , $P_{0R'_2}$ – постоянные составляющие мгновенной мощности, соответственно, источника полигармонического напряжения и активных сопротивлений первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи; $P_{kau\Sigma}$, $P_{kbu\Sigma}$ – косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности источника полигармонического напряжения; P_{kaR} , P_{kbR} , P_{kaL} , P_{kbL} – косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности на активных и индуктивных сопротивлениях первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи.

Уравнения для каждого из элементов схемы замещения [10]:

– для источника полигармонического напряжения:

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

– для активного сопротивления:

$$P_R(t) = e_R(t)i(t) = i^2(t)R;$$

– для индуктивности:

$$p_l(t) = e_l(t)i(t) = L \frac{di(t)}{dt} i(t).$$

Использование мгновенной мощности для формирования идентификационных уравнений позволяет получить для анализа следующие компоненты: косинусные и синусные, канонические и неканонические, а также постоянную составляющую. В свою очередь, это позволяет сформировать достаточное количество уравнений при меньшем количестве гармоник. Наличие такого количества компонент возможно благодаря разложению сигнала в тригонометрические ряды Фурье на периоде разложения [14]. Важно отметить, что наличие появляющейся постоянной составляющей полигармонического сигнала является негативным фактором, т.к. это вносит погрешность в процесс идентификации ЭМП АД.

Как отмечалось, для применения энергетического метода при идентификации ЭМП АД необходим источник полигармонического напряжения. В роли такого источника может выступать тиристорный регулятор напряжения или преобразователь напряжения со сложными законами управления. Источник полигармонического напряжения позволяет получить нужный гармонический состав для формирования идентификационных уравнений. Их количество должно соответствовать количеству неизвестных параметров схемы замещения АД.

Полигармонический источник при использовании энергетического метода представляет собой дополнительное устройство, которое повышает себестоимость и усложняет процесс идентификации ЭМП АД.

Альтернативным решением могут выступать так называемые «псевдоисточники». Подразумевается, что источник не является физическим устройством, а полигармонический сигнал получается математическим путем и внедряется в математический аппарат. Полученный таким образом сигнал принято

называть «псевдополигармоническим» [11, 15]. С учетом этого, питание двигателя можно производить от обычной синусоидальной сети, после чего производится измерение сигналов. При этом важно отметить, что проводить измерение сигналов напряжения и тока необходимо одновременно. В качестве измерительного устройства можно, например, использовать датчики, в основе которых лежит эффект Холла. Полученные аналоговые сигналы тока и напряжения в цифровом виде записываются на компьютер и подвергаются обработке. В работе рассмотрено многообразие методов, с помощью которых формируются ПП сигналы, но в основе всех лежит единый принцип. Сигнал тока и напряжения на периоде T усекается до периода T' , т.е. период псевдополигармонических сигналов должен отличаться от периода сетевого $T \neq T'$.

В качестве обоснования предложенного метода приведем несколько основных свойств рядов Фурье. Если функция $f(x)$ имеет на периоде ограниченную вариацию, то ее ряд сходится в любой внутренней точке интервала и в конечных точках; если, кроме того, $f(x)$ непрерывна во всех точках интервала, то сумма ряда Фурье равна $f(x)$ во всех точках интервала [16]. Это свойство подтверждает, что разложение в ряд Фурье на интервале не отличается по своим физическим свойствам от разложения той же функции на всем периоде.

Еще одним важным свойством является возможность нескольких представлений для одной и той же функции. Имеется в виду, что функцию можно разложить по косинусным, синусным и одновременно косинусным и синусным составляющим. Это свойство существенно отличает ряды Фурье от степенных рядов. В данном случае разложение функции в ряд можно рассматривать как метод продолжения функции (сюда относятся симметрии разного рода). Все они эффективны сами по себе, однако какой из них предпочесть, зависит от конкретной задачи, в которой должно быть указано, является ли функция симметричной либо асимметричной относительно x , четной или нечетной и т.д.

Как уже было отмечено, полученный синусоидальный сигнал с применением одного из способов усекается на определенный период T' (рис. 2).

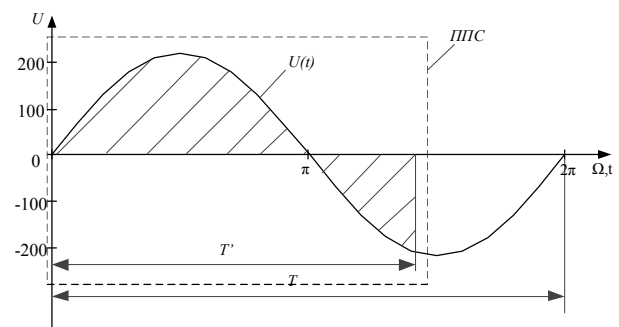


Рисунок 2 – Синусоидальный сигнал по напряжению

На рис. 2 показан синусоїдальний сигнал, наприклад, напруги с періодом T . Іменно заштриховану область на періоді T' і прийнято називати псевдополігармонічним сигналом. С допомогою оконного преобразования Фур'є [14] усечений період сигналу T' розкладається в тригонометричний ряд, т.е., виходячи з вищезазначеного, для розглянутого сигналу можна виконати розкладання по косинусним і синусним складовим на періоді T' :

$$U'_0 = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} u(t) dt;$$

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

$$U'_{nb} = \frac{2}{T'} \int_0^{T'} u(t) \sin(n\Omega' t) dt,$$

де U'_0 – постійна складова напруги для періоду розкладання T' ; U'_{na} , U'_{nb} – косинусні і синусні складові напруги для періоду розкладання T' .

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

$$I'_0 = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} i(t) dt;$$

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

$$I'_{mb} = \frac{2}{T'} \int_0^{T'} i(t) \sin(m\Omega' t) dt,$$

де I'_0 – постійна складова току для періоду розкладання T' ; I'_{ma} , I'_{mb} – косинусні і синусні складові току для періоду розкладання T' .

Після розкладання отримуємо постійну, косинусну і синусну складові. В свою чергу, це дозволяє отримати необхідне число гармонік для формування ідентифікаційних рівнянь.

Усечення періоду сигналу умовно можна розділити [15] на усечення зліва (рис. 3), справа (рис. 4), симетрично справа і зліва (рис. 5), а також несиметрично справа і зліва (рис. 6). Припускається, що усечення сигналу току проводиться відносно сигналу напруги, т.е. сигнал току усекається на тому ж періоді, що і напруга. Відповідно, т.к. ток і напруга зсунуті між собою на певний кут φ , то і форми сигналу току і напруги будуть різними. Це стосується і симетричного методу формування ПП сигналів [14].

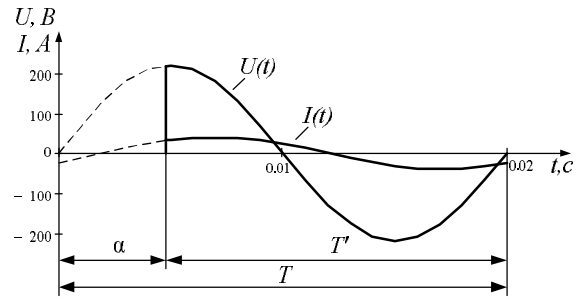


Рисунок 3 – Псевдополігармонічні сигнали при усеченні зліва

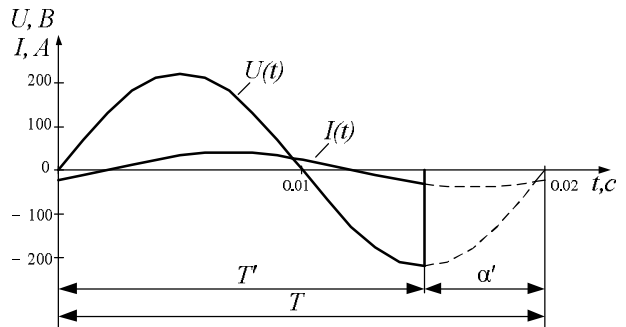


Рисунок 4 – Псевдополігармонічні сигнали при усеченні справа

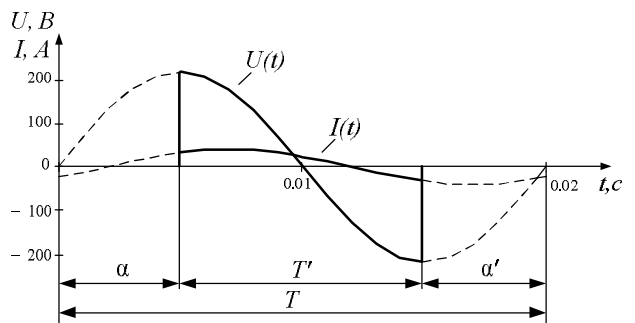


Рисунок 5 – Псевдополігармонічні сигнали при усеченні симетрично справа і зліва $\alpha = \alpha'$

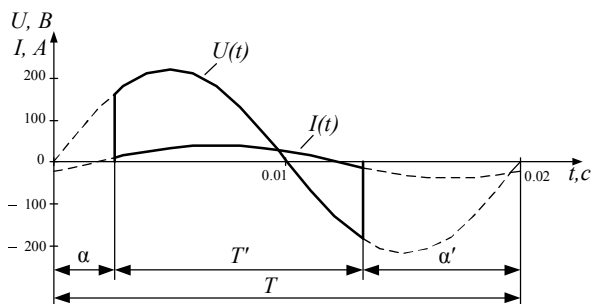


Рисунок 6 – Псевдополігармонічні сигнали при усеченні несиметрично справа і зліва $\alpha \neq \alpha'$

В случае симметричного усечения (рис. 5) период сигнала уменьшается с обеих сторон (при этом необходимым условием является то, что угол α должен быть равен α'). Для несимметричного усечения периода сигнала (рис. 6) условия противоположны, т.е. $\alpha \neq \alpha'$.

Стоит отметить, что получение ПП сигналов путем усечения (рис. 3, 4) является относительно простым, однако погрешность может достигать около 20 % в зависимости от выбранного способа и периода усечения сигналов [14]. Это обусловлено появлением постоянной составляющей P_0 , которая отсутствует в исходном синусоидальном сигнале.

Для минимизации погрешности, которая вносится постоянной составляющей, рассмотрен симметричный метод [17]. При этом в соответствии с законами осевой симметрии происходит формирование ППС. Исходя из этого, можно получить или сдвиг, или поворот полученного сигнала. Можно получить четыре способа создания ППС, которые описаны ниже. Однозначно для получения симметричных псевдосигналов необходимо выполнить следующие действия:

- измерить синусоидальные сигналы напряжения и тока на периоде повторяемости;
- выполнить усечение полученных сигналов на любом промежутке;
- осуществить симметрию сигналов относительно поперечной или продольной осей.

На рис. 7–10 показаны различные виды псевдополигармонических сигналов напряжения и тока, которые получены следующим образом:

- сигналы напряжения и тока рассматриваются на периоде повторяемости, причем на первом и втором полупериоде указанные сигналы имеют одинаковую форму (рис. 7);
- на первом полупериоде рассматриваются исходные сигналы, а на втором – полученные путем симметрии относительно поперечной оси (рис. 8);
- на первом полупериоде рассматриваются исходные сигналы, а на втором – полученные путем симметрии относительно поперечной и продольной осей (рис. 9);
- на первом полупериоде рассматриваются исходные сигналы, а на втором – полученные путем симметрии относительно продольной оси (рис. 10).

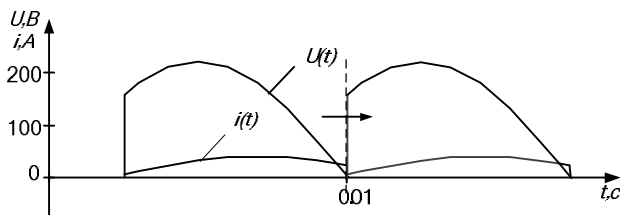


Рисунок 7 – ПП сигналы напряжения и тока при сдвиге сигналов вправо

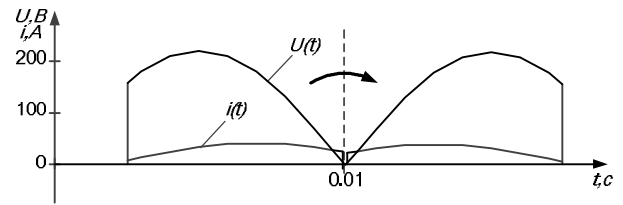


Рисунок 8 – ПП сигналы напряжения и тока при симметрии относительно поперечной оси

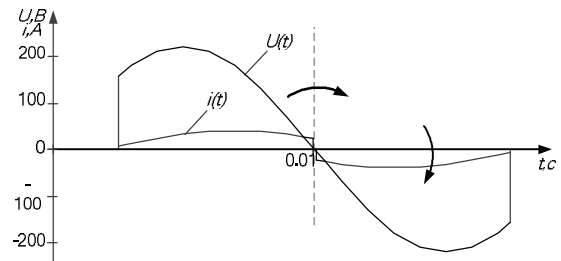


Рисунок 9 – ПП сигналы напряжения и тока при симметрии относительно поперечной и продольной осей

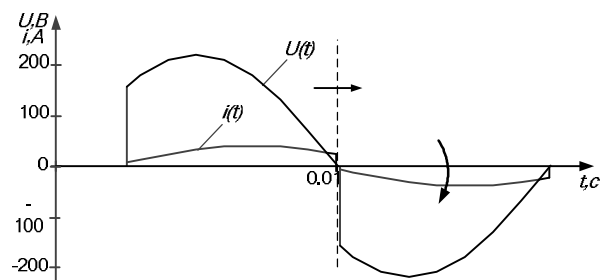


Рисунок 10 – ПП сигналы напряжения и тока при симметрии относительно продольной оси

Анализ полученных зависимостей показал, что существенным недостатком получения ПП сигналов (рис. 8, 9) является появление постоянной составляющей в сигналах напряжения и тока, которая отсутствует в исходных анализируемых сигналах. Поэтому целесообразно использовать сигналы, полученные путем симметрии относительно продольной и поперечной осей (рис. 9, 10). Это позволяет компенсировать постоянную составляющую в сигналах напряжения и тока. В результате этого достигается более высокая точность идентификации ЭМП АД [15, 17].

Оценка эффективности использования псевдополигармонических сигналов выполнена для АД серии 4АП100L4У3, паспортные данные которого представлены в табл. 1. Результаты идентификации ЭМП АД с применением рассмотренных методов занесены в табл. 2.

Таблиця 1 – Параметри асинхронного двигателя серии 4АП100Л4У3

Параметр	Значение
P_n , кВт	4
U_n , В	380
n_n , об/мин	1420
$\cos\varphi$	0,84
η	0,84
R_1 , Ом	1,35
R'_2 , Ом	1,38
X'_1 , Ом	2,123
X'_2 , Ом	2,129
X'_μ , Ом	77,24

Таблиця 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

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. Как уже отмечалось, 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 %.

Следует выделить способ формирования псевдополигармоник сигналов тока и напряжения путем введения дополнительного фиктивного источника питания или псевдоисточника (ПИ) [18]. Характерным отличием от рассмотренных выше методов является отсутствие необходимости преобразовывать исходные синусоидальные сигналы. Псевдоисточник вводится не физически, а математически с заданной частотой и амплитудой. Условно для Т-образной схемы замещения (рис. 11) фиктивный источник \dot{U}'_2 включается последовательно к основному \dot{U}'_1 .

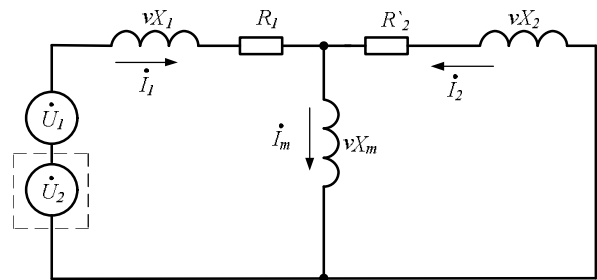


Рисунок 11 – Т-образная схема замещения АД с фиктивным источником питания

В соответствии с вышеизложенным, при введении псевдоисточника в схему замещения напряжение и ток можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= u_d(t) + \sum_{n=1}^N u_{nci}(t) = \\
 &= U_1 \cos(\Omega t) + \sum_{n=1}^N U_{ni} \cos(\Omega_i t); \\
 i(t) &= i_d(t) + \sum_{m=1}^M i_{mci}(t) = I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + \\
 &\quad + \sum_{m=1}^M I_{mai} \cos(\Omega_i t) + \sum_{m=1}^M I_{mbi} \sin(\Omega_i t),
 \end{aligned}$$

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;

$\sum_{n=1}^N U_{ni} \cos(\Omega_i t)$ – сума составляющих напряжения на n-ой гармонике псевдоисточника; $i_d(t)$ – значение тока действительного источника питания; $i_{nci}(t)$ – значение тока псевдоисточника; $\sum_{m=1}^M I_{mai} \cos(\Omega_i t)$ – сума косинусных составляющих напряжения на m-ой гармонике; $\sum_{m=1}^M I_{mbi} \sin(\Omega_i t)$ – сума синусных составляющих напряжения на m-ой гармонике.

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

$$\begin{aligned}
 p_{ist}(t) &= u(t)i(t) = \\
 &= \left(\begin{aligned} &U_{1a1} \cos(\Omega_1 t) + U_{1b1} \sin(\Omega_1 t) + \\ &+ U_{1a2} \cos(\Omega_2 t) + U_{1b2} \sin(\Omega_2 t) \end{aligned} \right) \times \\
 &\times \left(\begin{aligned} &I_{1a1} \cos(\Omega_1 t) + I_{1b1} \sin(\Omega_1 t) + \\ &+ I_{1a2} \cos(\Omega_2 t) + I_{1b2} \sin(\Omega_2 t) \end{aligned} \right) = \\
 &= \frac{1}{2} \left(\begin{aligned} &(U_{1b1} I_{1b2} + U_{1a1} I_{1a2} + \\ &+ U_{1b2} I_{1b1} + U_{1a2} I_{1a1}) \cos((k-1)\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1a1} I_{1a2} + U_{1a2} I_{1a1} - \\ &- U_{1b2} I_{1b1} - U_{1b1} I_{1b2}) \cos((k+1)\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1a2} I_{1a2} - U_{ab2} I_{1b2}) \cos(2k\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1a1} I_{1a1} - U_{1b1} I_{1b1}) \cos(2\Omega_1 t) + \\ &+ U_{1a2} I_{1a2} + U_{1b2} I_{1b2} + U_{1b1} I_{1b1} + U_{1a1} I_{1a1} \end{aligned} \right) + \\
 &+ \frac{1}{2} \left(\begin{aligned} &(U_{1b2} I_{1a1} + U_{1a1} I_{1b2} - \\ &- U_{1a2} I_{1b1} - U_{1b1} I_{1a2}) \sin((k-1)\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1a2} I_{1b1} + U_{1a1} I_{1b2} + \\ &+ U_{1b2} I_{1a1} + U_{1b1} I_{1a2}) \sin((1+k)\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1b2} I_{1a2} + U_{1a2} I_{1b2}) \sin(2k\Omega_1 t) + \\ &+ (U_{1b1} I_{1a1} + U_{1a1} I_{1b1}) \sin(2\Omega_1 t) \end{aligned} \right).
 \end{aligned}$$

Непосредственно для Т-образной схемы замещения достаточно одного фиктивного источника питания. Количество вводимых фиктивных источников зависит от выбранной схемы замещения АД. Применительно к Т-образной схеме замещения (рис. 11) количество неизвестных параметров составляет 10. При введении одного псевдоисточника суммарное количество идентификационных уравнений достигает 10 [18]. Частота и значение напряжения задаются изначально, но при этом токи от фиктивного источника остаются неизвестными. Принято, что частота псевдоисточника должна быть в пределах от 0 до 10 Гц [18]. Обуславливается это пренебрежением потерь в стали двигателя при питании от источника с низкой частотой. В [18] показана возможность идентификации ЭМП АД с учетом использования фиктивных источников. Анализ результатов исследования энергетического метода с введением фиктивного

низкочастотного источника питания показал, что погрешность не превышает 5%.

В зоне низких частот появляются области, в которых наблюдается характерное изменение ЭМП. Эта закономерность определяется при анализе сопротивлений Т-образной схемы замещения:

– эквивалентное активное сопротивление:

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

– эквивалентное индуктивное сопротивление:

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

Увеличение точности определения ЭМП АД при питании его от источника низкочастотного напряжения может быть достигнуто путем вычисления частот, в которых сопротивления двигателя имеют экстремум. Как указано в [18], эти точки наблюдаются при частотах, которые не превышают 15 Гц, поэтому для повышения точности необходимо проводить вычисление ЭМП АД для указанных точек. Таким образом, выполним определение ЭМП АД с введением одного фиктивного источника с амплитудой 220 В. Частота фиктивного источника будет меняться от одного до 15 Гц.

Эффективность энергетического метода с применением псевдоисточника продемонстрируем на примере АД типа 4А225М2У3. Параметры двигателя представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Параметры асинхронного двигателя серии 4А225М2У3

Параметр	Значение
P_n , кВт	55
U_n , В	380
n_n , об/мин	2946
$\cos\phi$	0,92
η	0,91
R_1 , Ом	0,044
R'_2 , Ом	0,041
X'_1 , Ом	0,224
X'_2 , Ом	0,231
X'_μ , Ом	12,873

Результаты идентификации ЭМП АД при использовании уравнений баланса составляющих мгновенной мощности с учетом фиктивного источника приведены в табл. 4. Результаты, сведенные в табл. 4, показали, что при изменении частоты фиктивного источника изменяется погрешность определения ЭМП АД. Наибольшая точность наблюдается

в точках екстремума функции сопротивлений от частоты.

Таблица 4 – Результаты идентификации ЭМП АД

№ п/п	Частота фиктивного источника, Гц	Ошибки идентификации ЭМП АД, %			
		ΔR_2	ΔX_1	ΔX_μ	ΔX_2
1	1	0,48	2,24	3,51	2,11
2	3	0,51	2,26	3,51	2,10
3	5	0,53	2,24	3,54	2,11
4	7	0,53	2,34	3,60	2,27
5	9	0,53	2,36	3,64	2,28
6	11	0,56	2,74	3,67	2,66
7	13	0,56	2,94	3,76	2,91
8	15	0,6	2,99	4,00	2,98

ВЫВОДЫ. В работе показана возможность и эффективность использования энергетического метода для идентификации ЭМП АД при питании от синусоидального источника напряжения.

Обосновано, что использование ПП сигналов позволяет повысить точность идентификации ЭМП АД, уменьшает время, затраченное на процесс определения параметров, снижает себестоимость и т.д.

Использование псевдоисточников позволяет получить необходимый гармонический состав для формирования идентификационных уравнений. Анализ показал, что при использовании псевдоисточников с заданной низкой частотой увеличивается точность идентификации ЭМП АД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – М.–Л.: Энергия, 1964. – 544 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1985. – 840 с.
3. Ванев Б.Н. Надежность асинхронных электродвигателей. – Киев: Техніка, 1983. – 143 с.
4. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.
5. Брюханов Г.А., Князев С.А. Метод и устройство для диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1986. – № 2. – С. 44–45.
6. Hasegawa M., Ogawa D., Matsui K. Parameter Identification Scheme for Induction Motors Using Output Inter-Sampling Approach // Asian Power Electronics Journal. – Apr. 2008. – Iss. 2. – № 1. – PP. 15–22.
7. 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.

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

9. 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.

10. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И., Калинов А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44). – С. 130–136.

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

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

13. 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.

14. Толстов Г.П. Ряды Фурье. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 392 с.

15. Ромашихин Ю.В. Оценка эффективности идентификации параметров асинхронных двигателей при использовании псевдополигармонических сигналов разной формы // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 1/2013 (21). – С. 58–68.

16. Джеффрис Г., Свирлс Б. Методы математической физики. Вып. 2. – М.: Мир, 1970. – 352 с.

17. Руденко Н.А., Ромашихин Ю.В. К определению псевдополигармонических сигналов в задачах гармонического анализа // Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 1/2013 (1). – С. 34–50.

18. Резник Д.В., Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И. Оценка эффективности применения низкочастотных псевдоисточников при идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 3/2013 (23). – С. 18–25.

DEFINITION PARAMETERS OF INDUCTION MOTORS WITH USING PCEUDOSIGNALS VOLTAGE AND CURRENT

A. Potapov, Yu. Romashykhin, D. Mosyundz

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: ant3872@yandex.ru

Electromagnetic induction motor parameters needed to determine the losses in the steel and copper, the overload capacity of the engine, as well as calculating and performance. Change the electromagnetic parameters induction motors

may be caused by manufacturing defects, intensive exploitation or renovations. Thus, there is a need for an accurate determination of the parameters with predetermined accuracy. However, there is no universal method suitable for different motor capacities, especially on the job. One of the modern methods is that, based on the balance of instantaneous power components for each of the T-shaped equivalent circuit. In turn, a variety of components of instantaneous power allows to make a sufficient number of identification equations. A significant drawback of this method is the need to use an additional source of polyharmonic voltage that causes an increase in the cost of the complex. Thus, to solve this problem, in the article the possibility and efficiency pseudosignals shows current and voltage, which are called "pseudopolyharmonic". Shown various ways of forming pseudosignals and principles on which construction the signal. Alternatively pseudopolyharmonic signals proposed method using the dummy low-frequency power source. The efficiency of determining blood pressure using EMF pseudosources for different frequencies of the supply voltage.

Key words: induction motor, the energy method, fictitious source, the instantaneous power.

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. Vaneyev, B. (1983), *Nadezhnost asinkhronnykh elektrodvigateley* [Reliability of induction motors]. Tehnika, Kiyv, Ukraine. (in Russian)
4. Gemke, R. (1989), *Neispravnosti elektricheskikh mashin* [Malfunction of electrical machines], Energoatomizdat, Leningrad, Russia. (in Russian)
5. Bruchanov, G. and Knyazev, S. (1986), "Method and apparatus for diagnosing the state of rotor windings of induction motors", *Elektricheskoye stantsii*, no 2, pp. 44–45. (in Russian)
6. 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.
7. 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.
8. Shaw, Steven R. (1997), "Numerical methods for identification motor parameters", Massachusetts institute of technology, Massachusetts, USA.
9. 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.
10. Romashykhin, Yu., Rodkin D. and Kalinov A. (2007), "Energy method for parameter identification of induction motors", *VIsnik Kremenchutskogo derzhavnogo polltehnichnogo unIversitetu im. M. Ostrogradskogo*, Vol. 3, no. 5, pp. 130–136. (in Russian)
11. Rodkin, D. (2009), "Features of application the energy method of identification AC motors with pseudopoliharmonic Signals", *Elektromehanichni i energozberigayuchi systemy*, Vol. 1, no. 5, pp. 7–20. (in Russian)
12. Tonkal, V.E., Novoselcev, A.V. and Denisyuk, S.P. (1992), *Balans energiy v silovyh tsepyah* [Energy balance in power circuit], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine. (in Russian)
13. Krogeris, A., Rashevic, K., Treymanis, E. and Shinka, Ya. (1993), *Moshchnost peremennogo toka* [The Power variable current], Fiz.-energ. In-t Latv. AN, Riga, Latvia. (in Russian)
14. Tolstov, G. (1961), *Ryady Furye* [Fourier series], State Publishing House of Physical-Mathematical Literature Moscow, Russia. (in Russian)
15. Romashykhin, Yu. (2013), "Evaluating the effectiveness of parameter identification of induction motors using pseudopoliharmonic signals of different shapes", *Elektromehanichni i energozberigayuchi Systemy*, Vol. 1, no. 21, pp. 58–68. (in Russian)
16. Jeffreys, H. and Swirles, B. (1970), *Metody matematicheskoy fiziky* [Methods of mathematical physics], Myr, Moscow, Russia. (in Russian)
17. Rudenko, N. and Romashykhin, Yu. (2013), "By definition pseudopoliharmonic signals in harmonic analysis", *Inzhenerni ta osvItni tekhnologii v elektrotekhnichnikh i kompyuternikh sistemakh*, Vol. 1, no. 1, pp. 34–50. (in Russian)
18. Reznick, D., Romashykhin, Yu. and Rodkin, D. (2013), "Evaluating the effectiveness of low-frequency electromagnetic pseudosources in identifying parameters of asynchronous motors", *Elektromehanichni i energozberigayuchi systemy*, Vol. 3, no. 23, pp. 18–25. (in Russian)

Стаття надійшла 28.11.2013.