

Д. И. РОДЬКИН, Т. В. КОРЕНЬКОВА, В. Г. КОВАЛЬЧУК

К ТЕОРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Обоснована возможность использования энергетического метода для идентификации параметров электромеханических систем. Показано, что уравнения энергетического баланса мгновенной мощности между источником питания и элементами схемы замещения справедливы для систем любой физической природы, где произведение исходных величин даёт мощность. В основе системы идентификационных уравнений лежат уравнения энергобаланса для отдельных компонент мгновенной мощности между источником и элементами электромеханической системы. Показана возможность применения энергетического метода идентификации параметров в электрогидравлических системах.

Ключевые слова: идентификация, электромагнитные параметры, электромеханическая система, мгновенная мощность, уравнения энергобаланса

Д. Й. РОДЬКІН, Т. В. КОРЕНЬКОВА, В. Г. КОВАЛЬЧУК

ДО ТЕОРІЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНИМ МЕТОДОМ

Обґрунтовано можливість використання енергетичного методу для ідентифікації параметрів електромеханічних систем. Показано, що рівняння енергетичного балансу миттєвої потужності між джерелом живлення та елементами схеми заміщення справедливі для систем будь-якої фізичної природи, де добуток вихідних величин дає потужність. В основі системи ідентифікаційних рівнянь лежать рівняння енергобалансу для окремих компонент миттєвої потужності між джерелом і елементами електромеханічної системи. Показана можливість застосування енергетичного методу ідентифікації параметрів в електрогидравлічних системах.

Ключові слова: ідентифікація, електромагнітні параметри, електромеханічна система, миттєва потужність, рівняння енергобалансу

D. RODKIN, T. KORENKOVA, V. KOVALCHUK

TO THE THEORY OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS IDENTIFICATION BY THE ENERGY METHOD

The possibility of using the energy method to identification of the electromechanical systems parameters, where the basic theoretical base is the Tellegen theorem, is justified. It is shown that the energy balance equations of instantaneous power between the power source and elements of the equivalent circuit are valid for systems of any physical nature, where the product of the initial quantities gives power. It is established that the harmonic composition of the power carries certain informational signs characterizing the processes of energy conversion on the electromechanical systems elements. The identification equations system is based on the energy balance equations for the individual components of the instantaneous power between the source and the electromechanical system elements. Possible options for the formation of input influence in identification systems are given, with which it is possible to obtain significant voltage and current harmonics. The efficiency of the use of the energy method is proved in comparison with the methods based on equivalent resistances of the equivalent circuit and the balance equations of active and reactive power. The possibility of using the energy method of identifying parameters in electrohydraulic systems is shown, where harmonic analysis of a hydraulic power signal that changes over time allows one to obtain the necessary energy balance equations.

Keywords: identification, electromagnetic parameters, electromechanical system, instantaneous power, energy balance equations

Введение. Идентификация параметров электрических машин (ЭМ) по-прежнему находится в центре внимания учёных и специалистов в виду того, что с возросшими возможностями технических средств измерения и управления электромеханическими системами (ЭМС), востребованными оказываются данные об особенностях преобразования энергии параметрах нелинейностей электромеханических преобразователей, и др. Более глубокое изучение процессов преобразования энергии в ЭМС позволяет создать системы электропривода (ЭП) с максимально возможными динамическими и энергетическими характеристиками. Этот путь – один из приоритетных в настоящее время.

Анализ состояния и результатов исследований по вопросам идентификации параметров асинхронных двигателей (АД) показывает, с одной стороны, на обилие публикаций, посвящённых этому направлению, а, с другой – на неослабевающий интерес к проблеме по поиску новых, оригинальных методов решения идентификационных задач [1].

Одним из таких методов является энергетический метод, базирующийся на непосредственном использовании теоремы Телледжена – основополагающей теоретической базы, представляющей закон сохранения энергии в электрических цепях в самой общей постановке [2–4].

Материал и результаты исследований.

А. Общее уравнение энергобаланса, суть энергетического метода идентификации ЭМС

Выполнение задачи идентификации осуществляется на основании схем замещения – графического представления ЭМ в виде сопротивлений, индуктивностей, ёмкостей, т.е. цепей, в которых осуществляется преобразование энергии в соответствии с математическим аппаратом, описывающим энергопроцессы. Питание схемы замещения осуществляется от источника, причём мощность источника равна сумме мощностей элементарных потребителей элементов схемы замещения. Это положение непосредственно вытекает из теоремы Телледжена.

©Д. И. Родькин, Т. В. Коренькова, В. Г. Ковальчук, 2019

Вид схемы замещения определяется тем, какие процессы учитываются в исследуемой ЭМ. При решении задач идентификации, как правило, задаются параметры источника – напряжение и ток, а требуются определения – параметры индуктивностей и сопротивлений. Анализ электромагнитных процессов выполняется путём применения законов Кирхгофа и Ома. При этом лишь в простейших схемах замещения возможно аналитическое решение идентификационной задачи [1].

В тех случаях, когда производится учёт нелинейностей кривой намагничивания или эффекта вытеснения тока, определение параметров схемы замещения невозможно, а задачу идентификации параметров ЭМ в таких случаях, следует отнести к некорректно заданной. Невозможность оценки параметров схемы замещения вызвана тем, что общее число уравнений электрического равновесия, суммы токов в узлах и др., вытекающих из законов Кирхгофа и Ома, существенно меньше числа неизвестных, определение которых должно быть осуществлено в ходе решения идентификационной задачи [5, 6].

Это противоречие может быть устранено достаточно просто, если перейти от уравнений баланса напряжений в схеме замещения к уравнениям баланса составляющих мощности.

Рассмотрим простейшую Т-образную схему замещения асинхронного двигателя (рис. 1) с параметрами: R_1 , L_1 – активное сопротивление статора и его индуктивность рассеяния, соответственно; R_2 , L_2 – активное сопротивление ротора и его индуктивность рассеяния, соответственно; L_3 – индуктивность контура ротора; $U_s(t)$ – напряжение источника питания; $I_1(t)$; $I_2(t)$; $I_3(t)$ – электрические токи в ветвях схемы замещения, соответственно.

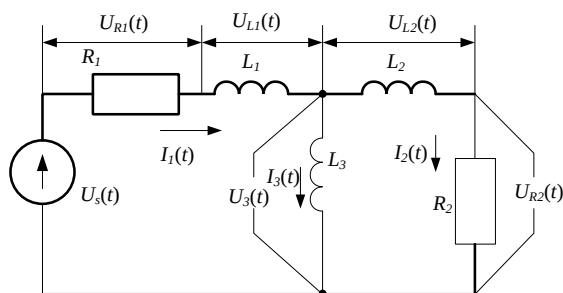


Рис. 1. Схема замещения асинхронного двигателя

Пусть $U_s(t)$ – напряжение источника питания, меняющееся во времени, периодическое, несинусоидальное. В рассматриваемом случае параметры схемы замещения неизвестны и должны быть определены в ходе решения идентификационной задачи: активные сопротивления R_1 и R_2 , индуктивности L_1 , L_2 , L_3 , а также токи I_1 или I_3 при известном I_1 . Традиционными методами задача неразрешима, так как число независимых уравнений, которые могут быть составлены в соответствии с законами Ома и Кирхгофа, значительно меньше числа неизвестных [1, 5, 6]. Это видно из следующего: при двух узлах в приведенной схеме и трёх ветвях число взаимно независимых уравнений

равно трём; число неизвестных, которые должны быть определены – шесть.

Воспользовавшись положениями теоремы Теллджена, можно записать равенство мощностей источника и элементарных потребителей – сопротивлений и индуктивностей схемы замещения:

$$P_s = P_{R1}(t) + P_{L1}(t) + P_{L2}(t) + P_{L3}(t) + P_{R2}(t), \quad (1)$$

где

$$P_s(t) = U_s(t) I_1(t);$$

$$P_{R1}(t) = R_1(t) I_1^2(t); P_{R2}(t) = R_2(t) I_2^2(t);$$

$$P_{L1}(t) = L_1 \frac{dI_1(t)}{dt} I_1(t); P_{L2}(t) = L_2 \frac{dI_2(t)}{dt} I_2(t);$$

$$P_{L3}(t) = L_3 \frac{dI_3(t)}{dt} I_3(t).$$

Представим мощность на выходе источника питания следующим образом:

$$P_s(t) = \sum_0^N U_{ns}(t) \sum_0^M I_{m1}(t), \quad (2)$$

где U_{ns} , I_{m1} – амплитуды гармоник напряжения и тока источника, получаемые путём разложения в ряд Фурье сигналов напряжения $U_s(t)$ и тока $I_1(t)$; N и M – номера гармоник соответствующих сигналов (в пределах эти значения могут быть равны бесконечности; на практике значения N и M могут быть определены конкретными величинами).

Учтём то обстоятельство, что гармонический состав напряжения и тока на элементах схемы замещения такой же, как и на источнике питания. Тогда для мгновенных мощностей на элементах схемы замещения получим [3, 6, 7]

$$P_{R1}(t) = R_1(t) \left(\sum_0^M I_{m1}(t) \right)^2.$$

Следует отметить, что гармонический состав тока соответствует гармоническому составу напряжения, а гармонический состав производной тока – гармоническому составу исходной функции тока в цепи. Таким образом, гармонический состав мощности источника соответствует гармоническому составу мощности элементов схемы замещения.

В приведенных выше выражениях $U_n(t)$, $I_{m1}(t)$ – гармонические функции. Следовательно, мощность на элементах схемы замещения образуется из произведений гармонических функций напряжения и тока с относительно частотами n и m , соответственно. Тогда частоты сигнала мощности определяются суммой и разностью частот исходных компонент электрических сигналов: $k = (n \pm m)$. Следовательно, каждая из гармоник мощности источника питания равна сумме гармоник мощности данного порядка на элементах схемы замещения. Совокупность таких равенств образует систему уравнений энергетического равновесия, число которых равно сумме максимальных значений гармоник напряжения и тока. Так, если максимальная частота гармоники напряжения равна N , а соответствующая частота гармоники тока равна M , то число урав-

нений энергетического баланса будет равно $K = M + N$.

Баланс мощности вытекает как следствие из теоремы Телледжена: 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 -той ветви. Поэтому сумма мощностей всех ветвей цепи равняется нулю. Если выделить ветви с независимыми источниками, то баланс мощности можно сформулировать следующим образом: сумма мощностей, отдаваемых независимыми источниками, равняется сумме мощностей, потребляемых остальными ветвями электрической цепи.

В. Декомпозиция составляющих мгновенной мощности

Представим сигналы напряжения и тока на выходе источника питания в форме тригонометрических рядов [6]:

$$U(t) = \sum_0^N U_n \cos(n\Omega t - \varphi_n); \quad (3)$$

$$I(t) = \sum_0^M I_m \cos(m\Omega t - \psi_m),$$

где n, m – номера гармоник напряжения и тока, соответственно; N, M – число гармоник напряжения и тока, соответственно; φ, ψ – фазовые углы сдвига напряжения и тока, соответственно.

Выполнив преобразования, получим:

$$U_n(t) = \sum_0^M U_n \cos(n\Omega t) \cos(\varphi_n) + \sum_0^M U_n \sin(n\Omega t) \sin(\varphi_n); \quad (4)$$

$$I_m(t) = \sum_0^M I_m \cos(m\Omega t) \cos(\psi_m) + \sum_0^M I_m \sin(m\Omega t) \sin(\psi_m), \quad (5)$$

где:

$$\begin{aligned} U_{na} &= U_n \cos(n\Omega t) \cos(\varphi_n); \\ U_{nb} &= U_n \sin(n\Omega t) \sin(\varphi_n); \\ I_{ma} &= I_m \cos(m\Omega t) \cos(\psi_m); \\ I_{mb} &= I_m \sin(m\Omega t) \sin(\psi_m). \end{aligned}$$

Тогда выражения для напряжения, тока и мощности будут иметь вид:

$$U_m(t) = \sum_{m=0}^N U_{na} + \sum_{m=0}^N I_{nb}; \quad (5)$$

$$I_m(t) = \sum_{m=0}^M I_{ma} + \sum_{m=0}^M I_{mb}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P(t) &= U_n(t) I_m(t) = \\ &= \sum_{n=0}^N U_{na} \sum_{m=0}^M I_{ma} + \sum_{n=0}^N U_{nb} \sum_{m=0}^M I_{mb} + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{na} \sum_{m=0}^M I_{mb} + \sum_{n=0}^N U_{nb} \sum_{m=0}^M I_{ma}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выполним анализ последнего выражения. С одной стороны, произведения напряжений и токов одноимённого характера (т.е. косинусных на косинусные или синусных на синусные) всегда дают только косинусные компоненты мощности. Произведения разноимённых гармоник напряжения и тока всегда дают только синусные компоненты мощности.

С другой стороны, только произведения одноимённого характера дают компоненты мощности с частотой равной нулю, т.е. формируют постоянную составляющую мощности.

При этом, каждое из четырёх произведений в (7) при их раскрытии в форме рядов с конечным или бесконечным числом гармоник можно разделить на составляющие, у которых номера гармоник напряжения и тока равны, т.е. $m = n$ и на такие, у которых $m \neq n$. Это положение имеет принципиальный характер по той причине, что в результате реализации произведений одноимённых или разноимённых компонент с равными номерами гармоник, получаемые составляющие мгновенной мощности $P(t)$ имеют частоту k , однозначно определяемую из соотношения $k = (n \pm m)$.

Сказанное выше иллюстрируется следующими примерами:

– произведение гармоник напряжения U_{na} и тока I_{ma} при $n = m = 3$ означает, что в кривой мощности будет присутствовать постоянная составляющая $k_1 = m - n = 0$ и знакопеременная с относительной частотой $k_2 = m + n = 6$;

– произведение гармоник напряжения U_{nb} и тока I_{mb} при $n = 3$ и $m = 5$ означает, что в кривой мощности присутствуют две гармоники с частотами $k_1 = m - n = 2$ и $k_2 = m + n = 8$. При этом гармоники будут косинусными, как и в предыдущем случае, из-за того, что реализуется произведение одноимённых составляющих;

– произведение гармоник напряжения U_{nb} и тока I_{ma} с порядками $n = 3$ и $m = 11$ означает, что в кривой мгновенной мощности будут синусные компоненты с частотами $k_1 = m - n = 8$ и $k_2 = m + n = 14$.

В общем случае, когда в кривых напряжения и тока число гармоник значительно, все три составляющие мгновенной мощности (постоянная, знакопеременная косинусная, знакопеременная синусная) также представляют собой тригонометрические ряды:

$$P_{0\Sigma} = \sum_{k=1}^K P_{k0}; \quad P_{a\Sigma} = \sum_1^{M+N} P_{ka}(t); \quad P_{b\Sigma} = \sum_1^{M+N} P_{kb}(t).$$

Тогда сигнал мгновенной мощности может быть представлен в виде:

$$P(t) = \sum_{k=1}^K P_{k0} + \sum_1^{M+N} P_{ka}(t) + \sum_1^{M+N} P_{kb}(t). \quad (8)$$

Анализ полученной зависимости позволяет сделать достаточно очевидное заключение о том, что при периодических сигналах напряжения и тока сигнал мощности содержит постоянную составляющую и совокупность знакопеременных, которые, как и исходные сигналы (напряжение и ток) можно представить в форме ортогональных компонент [8, 9].

Отсюда становится очевидным то обстоятельство, что гармонический состав мгновенной мощности несёт определённые информационные признаки, которые, в конечном итоге, определяют характеристики процесса преобразования мощности в ходе взаимодействия двух физических величин $U(t)$ и $I(t)$ на соответствующих элементах схемы замещения ЭМС. Необходимость в такого рода информации вызвана тем, что при наличии её можно решать вопросы, связанные с оплатой при использовании электрической энергии. С другой стороны, что не менее важно, появляется возможность определить качественную сторону процесса преобразования энергии [10].

Выполним декомпозицию составляющих мгновенной мощности. Произведение одночастотных компонент напряжения и тока даёт составляющие – постоянную и знакопеременную с двойной частотой результирующего сигнала. Эти составляющие по своим признакам соответствуют таким же составляющим, что и в обычной электросети с гармоническими сигналами. Получаемые таким образом составляющие мгновенной мощности именуются каноническими, где этот термин, в основном, касается переменной косинусной составляющей сигнала мощности, причём амплитуда косинусной составляющей мгновенной мощности равна постоянной составляющей. Синусная составляющая мгновенной мощности определяется произведением разноименных сигналов напряжения и тока одинаковой частоты. Исходя из этих положений разделяем сигналы мгновенной мощности на канонические и неканонические. Выполним анализ возможных составляющих мгновенной мощности сигналов, представленных в (7):

$$\sum_{m=n} U_{na} \sum_{k=m-n=0} I_{ma} + \sum_{m \neq n} U_{nb} \sum_{k=m-n=k_c} I_{mb} = \sum_{m=n} P_{k0} + \sum_{m \neq n} P_{kac} + \sum_{m \neq n} P_{kacs} + \sum_{m \neq n} P_{kbs} ; \quad (8)$$

$$\sum_{m=n} U_{na} \sum_{k=m-n=0} I_{mb} + \sum_{m \neq n} U_{nb} \sum_{k=m-n=k_c} I_{ma} = \sum_{m=n} P_{kbc} + \sum_{m \neq n} P_{kbc s} + \sum_{m \neq n} P_{kbs} . \quad (9)$$

Из приведенных зависимостей следует, что составляющие мощности канонического порядка P_{kac} и P_{kbc} имеют такие же частоты, как и составляющие P_{kacs} и P_{kbs} , полученные путём умножения гармоник напряжения и тока разных частот при условии, что сумма $m + n = k_c$ и разность $m - n = k_c$, т.е. частоты этих гармоник совпадают с соответствующими частотами канонических компонент. В этой связи будут справедливы равенства

$$\sum P_{kac \Sigma} = \sum P_{kac} + \sum P_{kacs} .$$

Тогда уравнение для мгновенной мощности имеет вид:

$$P(t) = \sum P_{k0} + \sum P_{kac} + \sum P_{kacs} + \sum P_{kbc} + \sum P_{kbs} + \sum P_{kbs} = \sum P_{k0} + \sum P_{kac \Sigma} + \sum P_{kbc \Sigma} + \sum P_{kbs} . \quad (10)$$

Выражение (10) получено в результате декомпозиции сигнала мощности (в данном случае – мощности источника питания) по ортогональным и частотным составляющим. Подобный анализ осуществляется применительно и к другим элементам схемы замещения как линейным, так и нелинейным. Составляющие мощности при этом будут, естественно, разные в зависимости от физической структуры элемента.

Следует отметить, что операции дифференцирования и интегрирования не приводят к изменению спектра гармонических в сигналах мощности: на реактивных элементах меняется соответствующим образом фаза гармонических составляющих сигнала напряжения относительно проходящего через элемент тока. Исходя из отмеченного, нетрудно сделать вывод о том, что гармонический состав мощности на элементах схемы замещения будет включать такие же гармоники, как и в сигнале мощности на выходе источника питания с учётом того, что активной мощности на реактивностях (индуктивностях и ёмкостях) нет.

С. Уравнения энергетического баланса в задачах идентификации

Уравнения энергетического равновесия на элементах схемы замещения имеют такой же вид, как и для источника питания. В итоге получаем для рассмотренного примера (рис. 1) систему уравнений баланса, представленную на рис. 2.

Сумма левых частей – уравнение энергобаланса мощности источника питания и мгновенной мощности элементов схемы замещения. В правых частях – уравнения энергобаланса по отдельным гармоникам мощности на элементах схемы замещения.

Любое идентификационное уравнение из всего комплекса, как справа, так и слева относительно знака равенства гармонической функции соответствующей частоты преобразуется в алгебраическое уравнение без тригонометрических символов. Это обстоятельство значительно упрощает решение задачи определения параметров схемы замещения, так как образовавшаяся таким путём система превращается из системы тригонометрических уравнений в систему нелинейных алгебраических уравнений. Нелинейность системы вызвана тем, что каждое из слагаемых, входящее в любое из идентификационных уравнений, представляет собой мощность – произведение i -го значения известного или неизвестного параметра на j -й параметр (ток, сопротивление, индуктивность и т.д.). Решение системы нелинейных уравнений не является неразрешимой задачей: известно большое число методов, отличающихся своими возможностями и точностью определения [3].

Если известно число гармонических напряжений N и тока M , то общее число уравнений энергетического баланса с учётом того, что произведение периодических сигналов даёт результирующую частоту $K = M+N$, максимальное число гармонических мощностей будет равно $K = 2(M+N)+1$. Отдельной составляющей здесь выступает нулевая гармоника – постоянный во времени сигнал.

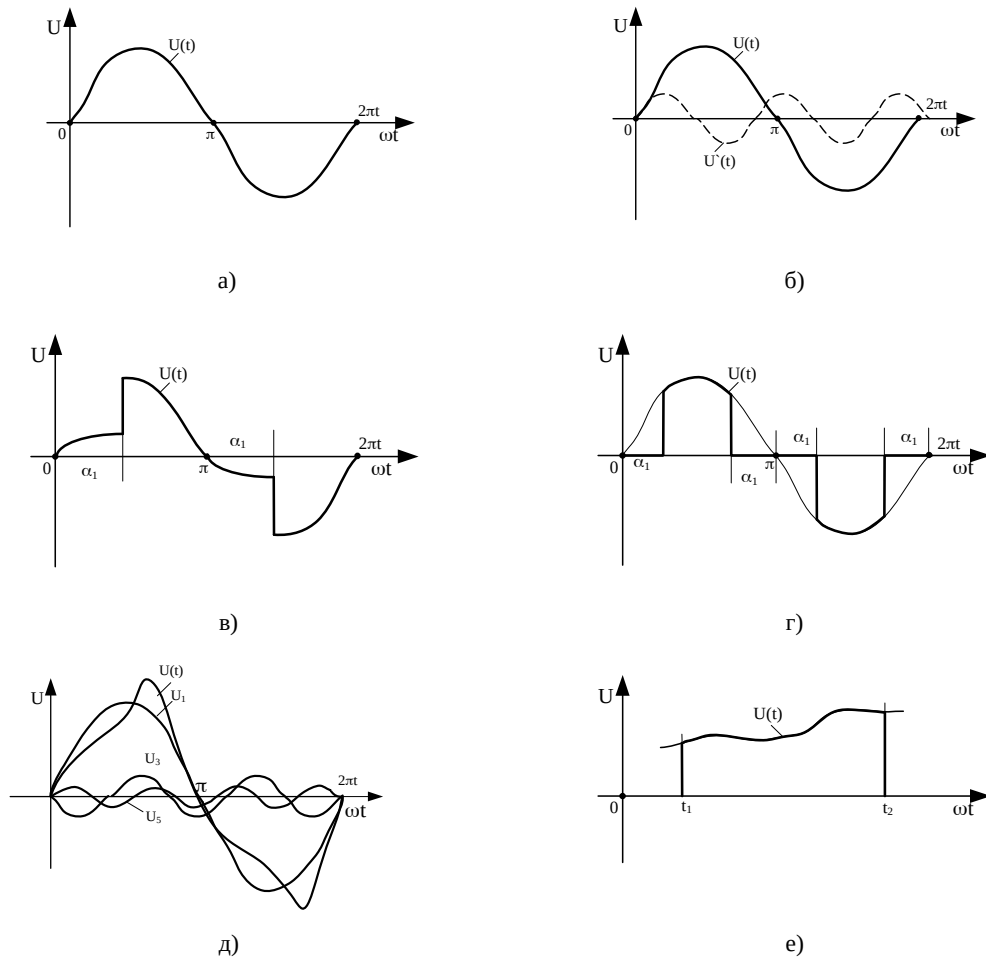


Рис. 3. Виды сигналов входных воздействий:

- а) – периодического сигнала с нелинейными искажениями; б) – с виртуальным периодическим гармоническим сигналом; в) – несинусоидального сигнала от специального генератора; г) – сигнала с разложением на заданном промежутке; д) – сигнала с заданными значениями амплитуд гармоник напряжения; е) – неперiodического знакопостоянного сигнала, меняющегося во времени

	Уравнения энергобаланса по элементам схемы замещения		
$P_s(t)$	$=$	$\Sigma P_{k0s}(t)$	$+$ $\Sigma P_{kas}(t)$ $+$ $\Sigma P_{kbs}(t)$
$P_{R1}(t)$	$=$	$\Sigma P_{k0R1}(t)$	$+$ $\Sigma P_{kaR1}(t)$ $+$ $\Sigma P_{kbR1}(t)$
$P_{R2}(t)$	$=$	$\Sigma P_{k0R2}(t)$	$+$ $\Sigma P_{kaR2}(t)$ $+$ $\Sigma P_{kbR2}(t)$
$P_{L1}(t)$	$=$	$\Sigma P_{k0L1}(t)$	$+$ $\Sigma P_{kaL1}(t)$ $+$ $\Sigma P_{kbL1}(t)$
$P_{L2}(t)$	$=$	$\Sigma P_{k0L2}(t)$	$+$ $\Sigma P_{kaL2}(t)$ $+$ $\Sigma P_{kbL2}(t)$
$P_{L3}(t)$	$=$	$\Sigma P_{k0L3}(t)$	$+$ $\Sigma P_{kaL3}(t)$ $+$ $\Sigma P_{kbL3}(t)$

Общее уравнение энергобаланса Уравнения энергобаланса по гармоникам мощности

Рис. 2. Система идентификационных уравнений

Стремление получить большую точность неизбежно приводит к увеличению значений N и M , что, в свою очередь, сопровождается ростом числа идентификационных уравнений и к их избыточности.

Этого можно избежать, если учесть, что каждое из идентификационных уравнений соответствует закону сохранения энергии. В этом случае в расчётную

идентификационную систему следует брать такое число уравнений, которое в точности соответствует числу неизвестных, причём постоянную составляющую мощности также следует представлять в форме компонент для каждой из пар одноимённых гармоник напряжения и тока и при расчёте учитывать активную мощность только для тех гармоник, которые входят в расчётную схему идентификационных уравнений. Таким образом, появляется возможность составления нескольких «параллельных» идентификационных систем, что в совокупности позволяет выявить ряд закономерностей при оценке влияния частотных зависимостей для точностных характеристик процесса идентификации параметров. Указанные особенности позволяют исключить негативные последствия избыточности числа идентификационных уравнений при решении практических задач.

Д. Особенности формирования сигналов входных воздействий в задачах идентификации

Одним из важнейших вопросов, касающихся реализации энергетического метода, является получение таких сигналов входного воздействия, при которых

возможно получение значимых гармоник напряжения и тока. Опыт показывает, что даже в сетях электро-снабжения большой мощности напряжения и тока – несинусоидальные, причём сигналы тока, как правило, имеют меньшее значение коэффициента искажения, чем сигналы напряжения. Это вызвано, прежде всего, тем, что потребители в своём составе имеют нелинейные элементы, из-за которых результирующий коэффициент искажения напряжения будет определяться двумя факторами – гармониками напряжения питающей сети и гармоническими компонентами от падения напряжения в сети, вызванного гармониками тока нелинейных элементов потребителя.

Если уровень гармоник искажения незначителен, то ими можно пренебречь и считать напряжение синусоидальным, а ток – несинусоидальным.

Этот случай представляется достаточно интересным в том отношении, что позволяет сделать вывод об источнике нелинейных искажений в структуре потребителя. Такая постановка вопроса заслуживает особого внимания в связи с тем, что решая идентификационную задачу, представляется возможным определить соответствующие параметры нелинейности. Рассматриваемый случай в общей постановке соответствует рис. 3, а возможных сигналов при реализации задачи идентификации энергетическим методом.

Достаточно близким к рассматриваемому случаю является входной сигнал синусоидальной формы (рис. 3, б), а система идентификационных уравнений строится, исходя из предположения введения в цепь источника питания дополнительных ЭДС синусоидальной формы с частотами, кратными частоте сетевого сигнала соответствующей амплитуды. При формировании системы идентификационных уравнений полагают, что токи от источников, введенных в статорную цепь ЭДС, являются неизвестными величинами и входят в систему в качестве неизвестных, так же как и неизвестные параметры схемы замещения. Достаточно детально этот вопрос проанализирован в [1, 5]. Очевидно, что метод базируется на том, что число уравнений энергетического баланса при введении в расчёт определённого числа виртуальных источников растёт быстрее, чем число неизвестных параметров схемы замещения и токов от вводимых в расчётную схему источников. Схема вполне пригодна для идентификации параметров в случае линейных параметров схемы замещения.

Третий случай, представленный на рис. 3, в, реализуется применением специального устройства, искажающего питающее напряжение до такого уровня, когда коэффициент искажения напряжения и тока сравнимы. Количество гармонических в сигналах может быть достаточным или избыточным для построения идентификационной системы. В этом случае следует соблюдать высказанное ранее условие: уравнения энергетического баланса следует выбирать в зависимости от величины амплитуд или действующих значений гармоник мощности несинусоидальных сигналов.

Заслуживает внимания сигнал воздействия, фор-

мируемый с использованием компьютерных технологий (рис. 3, г) возможных сигналов. В этом случае анализируемый сигнал получен из синусоидального сигнала напряжения путём исключения из анализа части его, принимая равным нулю значения исследуемого сигнала на участках $(0 - \alpha_1)$; $(\pi - \alpha_1 - \pi)$; $(\pi + \alpha_1 - \pi)$; $(2\pi - \alpha_1 - 2\pi)$.

Разложение в ряд Фурье модифицированного таким образом сигнала даёт необходимый набор составляющих – виртуальных гармоник напряжения и тока, которые аппроксимируют кривую мгновенной мощности на участках, где сигнал зависимости $U(t)$ определён, т.е. не равен нулю. Можно заметить, что существует множество вариантов получения так называемых псевдогармонических сигналов в зависимости от значений углов α_1 , их симметрии относительно точек, в которых значение $U(t)$ равно нулю и т.д. В этом отношении представляется возможность некоторого произвольного выбора участков, где анализируемая функция не определена.

Эта произвольность, однако, связана с неизбежными погрешностями в определении параметров анализируемой схемы замещения вследствие того, что на участках, где функции тока и напряжения не определены, теряется часть информации о протекающем энергетическом процессе. Стремление увеличить значения углов α_1 связано с получением большего числа весомых гармоник напряжения, тока и мощности, что является существенным положительным фактором. В то же время это приводит к неизбежному увеличению погрешностей в определении искомых параметров. Очевидно, необходим какой-то компромисс, обеспечивающий получение параметров с приемлемыми погрешностями. Достоинством рассматриваемого варианта формирования идентификационных уравнений является то, что не используются дополнительные преобразовательные устройства.

Значительный интерес представляет система формирования сигналов для идентификации параметров путём использования преобразователя частоты, с помощью которого осуществляется реализация нужного числа гармонических компонент заданной амплитуды и частоты (рис. 3, д). Как правило – это 3÷4 гармоники питающего напряжения с частотами, кратными частоте основной гармоники. Положительные качества такой системы очевидны, так как задается в форме конкретных значений амплитуда, частота, количество, фазовый сдвиг гармонических компонент без необходимости поиска и устранения малозначущих гармоник напряжения и тока. Детально этот вопрос рассмотрен [1, 5, 6, 10]. Недостаток рассматриваемого варианта заключается в необходимости использования дорогостоящего оборудования – преобразователя частоты, мощность которого сравнима с мощностью двигателя, параметры которого идентифицируются.

Для рассматриваемых целей возможно использование систем, где идентифицируемый объект (асинхронный двигатель) при осуществлении процедуры идентификации подключается к источнику питания, напряжение на котором знака не меняет (рис. 3, е).

К таким схемным решениям относятся устройства питания обмоток статора от накопителей энергии – емкостных или электромеханических.

В первом случае емкостной накопитель заряжается от выпрямительного регулируемого устройства, а затем подключается к статорным обмоткам двигателя. В процессе разряда накопителя изменяется напряжение на нем, а также ток, проходящий по системе обмоток двигателя.

Меняющиеся параметры измеряются с помощью классической схемы: датчики напряжения и тока, аналогово-цифровой преобразователь, вычислительное устройство. Интервал времени от включения накопителя на двигатель до полного разряда разбивается на участки, на которых осуществляется разложение в ряд Фурье двух измеренных сигналов в соответствии с известным подходом к определению коэффициентов ряда Фурье для сигналов, заданных в цифровой форме [1]. Полученные таким образом коэффициенты рядов Фурье переводятся в формат идентификационных уравнений, решаемых известными способами. Особенность в том, что анализируются сигналы не периодические, а знакопостоянные, что не противоречит теории рядов.

Е. Эффективность применения энергетического метода в задачах идентификации

Для оценки эффективности проведем сравнение энергетического метода с методами на базе эквивалентных сопротивлений схемы замещения, уравнений баланса активной и реактивной мощностей, канонических составляющих мгновенной мощности при идентификации электромагнитных параметров (ЭМП) АД серии 4АП100L4. Схема замещения асинхронного двигателя представляется первичной цепью, контуром намагничивания и вторичной цепью (рис. 4).

Учёт потерь в стали достигается введением в контур намагничивания активного сопротивления, которое нелинейно зависит от частоты тока [1, 5, 10]:

$$R_{\mu}(\nu) = R_{\mu} \nu^{\alpha}, \quad (12)$$

где R_{μ} сопротивление контура намагничивания при номинальной частоте; ν – относительная частота; α – постоянный коэффициент, зависящий от состояния пакета стали.

Для синусоидальных сигналов коэффициент α изменяется в диапазоне $1,3 \div 1,6$; при питании асинхронного двигателя от источника полигармонического напряжения коэффициент α выбирается в пределах $1,4 \div 1,8$. Это связано с тем, что потери в стали возрастают за счёт дополнительных потерь, обусловленных высшими гармониками.

Сопротивление вторичного контура зависит от эффекта вытеснения и может быть представлено зависимостью:

$$R'_2(\nu, \beta) = R'_{20}(1 + \beta \nu^2) / s_{\nu} \quad (13)$$

где R'_{20} сопротивление ротора при частоте равной нулю; β – коэффициент, определяющий влияние эффекта вытеснения;

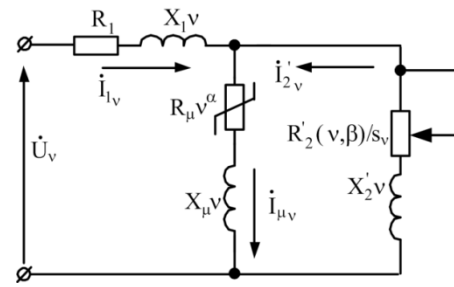


Рис. 4. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

$s_{\nu} = 1 \pm (1-s_1) / \nu$ – скольжение двигателя на ν -ой гармонике, зависящее от частоты;

s_1 – скольжение двигателя на первой гармонике

Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя производится в режиме неподвижного ротора, т.е. при $s_{\nu} = s_1 = 1,0$.

Для реализации первого метода составляющие полного комплексного сопротивления на каждой гармонике выражаются в виде зависимостей [1, 2]:

– вещественная часть полного сопротивления

$$R_{\Sigma}(\nu) = R_1 + \frac{R_{\mu}(\nu) R'_2(\nu, \beta) + (R_{\mu}(\nu))^2 R'_2(\nu, \beta) + \nu^2 R_{\mu}(\nu) X_2'^2 + \nu^2 R'_2(\nu, \beta) X_{\mu}^2}{(R'_2(\nu, \beta) + R_{\mu}(\nu))^2 + (\nu X_2' + \nu X_{\mu})^2} \quad (14)$$

– мнимая часть полного сопротивления

$$X_{\Sigma}(\nu) = \nu X_1 + \frac{\nu^2 (R_{\mu}(\nu))^2 X_2' + (R'_2(\nu, \beta) + R_{\mu}(\nu))^2 + (R'_2(\nu, \beta))^2 X_{\mu} + \nu^3 X_{\mu} X_2'^2 + \nu^3 X_{\mu}^2 X_2'}{(\nu X_2' + \nu X_{\mu})^2} \quad (15)$$

При составлении системы уравнений идентификации параметров для каждой анализируемой гармонике составляются по два уравнения для вещественной и мнимой частей. Для анализируемой схемы замещения число неизвестных равно $N = 6$ (сопротивление статора R_1 , индуктивное сопротивление рассеяния статора X_1 ; индуктивное сопротивление рассеяния ротора X_2 ; сопротивление ротора R'_2 ; активное R_{μ} и индуктивное X_{μ} сопротивления контура намагничивания). Количество анализируемых гармоник при N неизвестных из условия $2G = N$ должно быть равно $G = N / 2$.

Второй метод основан на уравнениях баланса активной и реактивной мощностей, а также на анализе схемы замещения по уравнениям Кирхгофа (6).

Количество анализируемых гармоник при 12 неизвестных параметрах (добавляются ещё 6 неизвестных параметров – ортогональные составляющие тока ротора, тока и напряжения контура намагничивания) должно составлять $G = N / 3$.

Существенно более широкие возможности для определения параметров дают уравнения баланса составляющих гармоник мгновенной мощности.

$$\begin{aligned}
U_{1v} I_{1av} &= (I_{1av}^2 + I_{1bv}^2) R_1 + (I_{1av}^2 + I_{1bv}^2) R_\mu(v) + \\
&+ (I_{2av}^2 + I_{2bv}^2) R_2'(v, \beta); \\
U_{1v} I_{1bv} &= (I_{1av}^2 + I_{1bv}^2) X_1 + (I_{1av}^2 + I_{1bv}^2) X_\mu + \\
&+ (I_{2av}^2 + I_{2bv}^2) X_2'; \\
I_{1av} &= I_{1av} + I_{1bv}'; \quad I_{1bv} = I_{1bv} + I_{1bv}'; \\
U_{1bv} &= I_{1bv} R_1 - I_{1av} v X_1; \\
U_{1bv} &= I_{1bv} R_\mu(t) - I_{1av} v X_\mu; \\
U_{1bv} &= I_{1bv} R_2'(v, \beta) - I_{1av} v X_2'; \\
U_{1av} &= U_{1v} - (I_{1av} R_1 + I_{1bv} v X_1); \\
U_{1av} &= I_{1av} R_2'(v, \beta) - I_{1bv} v X_2'.
\end{aligned} \quad (16)$$

Принцип суперпозиции для мощностей позволяет проводить анализ как для линейных, так и для нелинейных цепей. Методы на основе эквивалентных сопротивлений схемы замещения и балансе активной и реактивной мощностей применимы только для анализа линейных цепей.

В соответствии с выше изложенным, для определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя составляется система уравнений энергетического баланса составляющих гармоник мгновенной мощности на источнике питания и элементах схемы замещения:

$$\begin{cases} P_{0\Sigma} = P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R_2'}; \\ P_{ka\Sigma} = P_{kaR_1} + P_{kaR_\mu} + P_{kaR_2'} + P_{kaL_1} + P_{kaL_\mu} + P_{kaL_2'}; \\ P_{kb\Sigma} = P_{kbR_1} + P_{kbR_\mu} + P_{kbR_2'} + P_{kbL_1} + P_{kbL_\mu} + P_{kbL_2'}. \end{cases} \quad (17)$$

Такой подход к составлению уравнений для идентификации параметров дает возможность ограничиться числом гармоник $G = (N - 1) / 2$.

Ошибки идентификации ЭМП при использовании указанных методов сведены в табл. 2. При определении ЭМП сигнал напряжения и тока анализировались на интервале повторяемости, т.е. при $T = 0,02$ с.

Анализ полученных результатов показывает, что наименьшая ошибка при определении ЭМП АД наблюдается при использовании энергетического метода и не превышает 5 %. Адекватность методов определения ЭМП АД определяется путём сравнения экспериментальных и расчётных кривых тока статора.

Степень совпадения оценивалась по коэффициенту детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{X-1} (I_j - I_{sr})^2}{\sum_{j=1}^{X-1} (I_j - I_{ras}(j\Delta t))^2}, \quad (18)$$

где X – количество точек на рассматриваемом участке экспериментальной кривой; I_j – j -е значение экспериментальной кривой тока; $I_{ras}(j\Delta t)$ – i -е значение расчётной кривой тока; $I_{sr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} I_i$ – среднее арифметическое значение экспериментальной кривой.

Г. Возможности применения энергетического метода идентификации параметров в электромеханических комплексах

Энергетический метод может быть использован в задачах идентификации параметров не только в элек-

тротехнических, но и в системах другой физической природы: механических, гидравлических, пневматических и т.п., где исходные сигналы (электромагнитный момент и частота вращения, напор и расход перекачиваемой жидкости, давление и подача сжатого воздуха), формирующие мощность, могут иметь сложный характер изменения во времени. В качестве примера рассмотрим применение энергетического метода в задачах идентификации параметров электрогидравлического комплекса (ЭГК) при развитии нелинейных гидродинамических процессов в трубопроводе [12–14]. Схема замещения простейшего ЭГК, содержащая преобразователь частоты, асинхронный двигатель, насос, запорно-регулирующую арматуру, трубопровод и потребителя, приведена на рис. 5.

На схеме приняты следующие обозначения: $H_0 v^2$ – гидравлический источник энергии; R_p – гидравлическое сопротивление насоса, c/m^2 ; $v = \omega_i / \omega_n$ – относительная частота вращения рабочего колеса насоса; ω_i , ω_n – текущее и номинальное значения угловой частоты вращения НА, соответственно, c^{-1} .

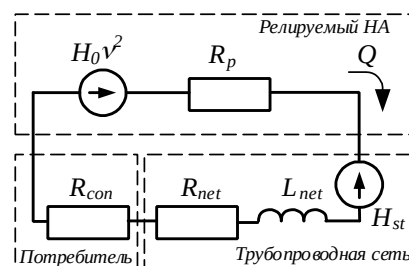


Рис. 5 Эквивалентная электрическая схема замещения ЭГК

Для приведенной схемы замещения ЭГК справедливо уравнение энергобаланса:

$$p_s(t) = \Delta p_p(t) + \Delta p_{net\Sigma}(t) + \Delta p_{st}(t) + p_{con}(t), \quad (19)$$

где $\Delta p_{net\Sigma}(t) = \Delta p_{Rnet}(t) + \Delta p_{Lnet}(t) + \Delta p_{Cnet}(t)$ – суммарные потери мощности на участке трубопровода.

Мощность на выходе источника гидравлического питания (насоса) имеет вид:

$$p_s(t) = H_0 v^2 Q_p(t), \quad (20)$$

где $Q_p(t) = Q_0 + \sum_{l=1}^L Q_l \cos(\Omega t - \gamma_l) =$ – сигнал рас-

$$= Q_0 + \sum_{l=1}^L Q_{la} \cos(\Omega t) + \sum_{l=1}^L Q_{lb} \sin(\Omega t)$$

хода; l, L – номер и число гармоник сигнала расхода, соответственно; Q_0, Q_l – амплитудные значения постоянной и переменной составляющих сигнала расхода, соответственно; $Q_{lb} = Q_l \cos(\gamma)$, $Q_{la} = Q_l \sin(\gamma)$ – ортогональные косинусная и синусная составляющие сигнала расхода, соответственно; Ω – круговая частота сигнала расхода; γ – угол сдвига фазы сигнала расхода относительно начала координат.

Использование рядов Фурье, позволяет представить выражение (20) тригонометрической зависимостью вида:

Табл. 2. Результаты определения электромагнитных параметров АД серии 4АП100L4ВЗ с использованием разных методов

		ЭМП АД					R ²
		R ₁ , Ом	R' ₂ , Ом	L ₁ , Гн	L _μ , Гн	L' ₂ , Гн	
1	Каталожные данные	1,35	1,39	0,0068	0,25	0,0067	
Ошибка определения ЭМП, %							
2	регламентированный ДСТУ 7217-87	–	1,94	36,866	29,7	7,164	0,777
3	с использованием уравнений баланса активной и реактивной мощностей	–	0,719	7,353	12,0	8,955	0,943
4	с использованием уравнений баланса канонических составляющих гармоник мгновенной мощности	–	0,36	1,471	3,6	14,925	0,964
5	с использованием уравнений баланса гармоник мгновенной мощности отдельно по постоянным, каноническим и неканоническим составляющим	–	1,439	2,941	2,0	1,493	0,998

$$p_s(t) = H_0 v^2 Q_p(t) = H_0 v^2 \left(Q_0 + \sum_{l=1}^L Q_{la} \cos(\Omega t) + \sum_{l=1}^L Q_{lb} \sin(\Omega t) \right) = (21)$$

$$= P_{s0}(t) + \sum_{r=1}^R P_{rsa} \cos(\Omega_r t) + \sum_{r=1}^R P_{rsb} \sin(\Omega_r t),$$

где r, R – номер и число гармоник сигнала гидравлической мощности источника, соответственно; P_{s0}, P_{rsa}, P_{rsb} – амплитудные значения постоянной и ортогональных косинусной и синусной составляющих сигнала гидравлической мощности источника, соответственно; Ω_r – круговая частота сигнала гидравлической мощности источника гидравлического питания.

Ниже приведен ряд выражений для сигналов мощностей элементов рассмотренной схемы замещения. Потери мощности на активном сопротивлении насоса:

$$\Delta p_p(t) = R_p Q_p^3(t). \quad (22)$$

Аналогичным образом могут быть представлены потери мощности на:

активном сопротивлении участка трубопровода

$$\Delta p_{R_{net}}(t) = R_{net} Q_{net}^3(t); \quad (24)$$

индуктивном сопротивлении участка трубопровода

$$\Delta p_{L_{net}}(t) = L_{net} Q_{net}(t) d(Q_{net}(t)/dt); \quad (25)$$

емкостном сопротивлении участка трубопровода

$$\Delta p_{C_{net}}(t) = \frac{Q_{net}(t)}{C_{net}} \int_0^T Q_{net}(t) dt. \quad (26)$$

Гидравлическая мощность у потребителя (в конечной точке трубопроводной сети):

$$p_{con}(t) = R_{con} Q_{con}^3(t). \quad (27)$$

Гармонический анализ составляющих мощности, входящих в (19), позволил перейти к уравнениям энергобаланса для отдельных компонент гидравлической мощности между источником и элементами ЭГК:

$$\begin{aligned} P_{s0} &= \Delta P_{st0} + \Delta P_{R_{\Sigma}0} + \Delta P_{L_{net}0} + \Delta P_{C_{net}0} + P_{con0}; \\ P_{s1a} &= \Delta P_{st1a} + \Delta P_{R_{\Sigma}1a} + \Delta P_{L_{net}1a} + \Delta P_{C_{net}1a} + P_{con1a}; \\ P_{s1b} &= \Delta P_{st1b} + \Delta P_{R_{\Sigma}1b} + \Delta P_{L_{net}1b} + \Delta P_{C_{net}1b} + P_{con1b}; \\ P_{rsa} &= \Delta P_{rsta} + \Delta P_{rR_{\Sigma}a} + \Delta P_{rL_{net}a} + \Delta P_{rC_{net}a} + P_{rcon a}; \\ P_{rsb} &= \Delta P_{rstb} + \Delta P_{rR_{\Sigma}b} + \Delta P_{rL_{net}b} + \Delta P_{rC_{net}b} + P_{rcon b}, \end{aligned} \quad (28)$$

где индексу «0» соответствуют постоянные составляющие мощности, индексам «a», «b» – косинусные и синусные компоненты, соответственно; $\Delta P_{R_{\Sigma}}$, $\Delta P_{L_{net}}$, $\Delta P_{C_{net}}$ – амплитудные значения потерь гидравлической мощности на суммарном активном сопротивлении $R_{\Sigma} = R_p + R_{net}$, на индуктивном и емкостном сопротивлениях участка гидросети, соответственно; ΔP_{st} – амплитудное значение потерь гидравлической мощности, расходуемой на преодоление статического сопротивления; P_{con} – амплитудное значение гидравлической мощности у потребителя.

Для нахождения n неизвестных параметров ЭГК (активных гидравлических сопротивлений насоса, трубопровода и потребителя, индуктивных и емкостных сопротивлений участков гидросети) необходимо использовать n -ое количество идентификационных уравнений системы (28), которые отображают картину энергобаланса между наиболее весомыми составляющими мощности в силовом канале ЭГК.

В реальных условиях активные сопротивления

насоса, трубопровода и потребителя зависят от изменения производительности в гидросистеме [14]. Определение активных сопротивлений на каждом из элементов ЭГК приводит к увеличению количества неизвестных параметров схемы замещения и росту составляющих, входящих в систему (19).

Выводы. Показано, что энергетический метод идентификации параметров с использованием полных уравнений баланса мгновенной мощности применим для анализа как линейных, так и нелинейных электрических, механических, электромеханических, гидравлических и др. систем.

При этом, в основе уравнений баланса мощностей должно лежать равенство мощности источника полигармонического напряжения сумме мощностей всех элементов электрической системы. Выражение для мгновенной мощности любого элемента схемы замещения определяется произведением ортогональных составляющих исходных сигналов (напряжения и тока, напора и расхода, частоты вращения и электромагнитного момента) и включает сложные зависимости для нелинейных элементов.

Уравнения баланса мощностей позволяют получить необходимое число идентификационных уравнений для определения электромагнитных параметров электродвигателей. Составление идентификационных уравнений с использованием составляющих мощности канонического и неканонического порядка расширяет возможности энергетического метода. Установлено, что эффективность метода при оценивании электромагнитных параметров электрических машин существенно зависит от уровней гармоник в сигналах напряжения и тока, определяющих мгновенную мощность.

Список литературы

1. Загирняк М. В., Родькин Д. И., Черный А. П., Ромашихин Ю. В. *Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей*. Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2013. 164 с.
2. Родькин Д. И., Ромашихин Ю. В. Возможность и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007, Тематичний вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». С. 507 – 512.
3. Родькин Д. И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського*. Кременчук: КДПУ, 2007, Ч. 1, Вип. 3 (44). С. 66 – 71.
4. Родькин Д. И., Бялобрыжеский А. В., Ломонос А. И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническим напряжением и током. *Електротехніка*. Москва: АО «Фирма Знак». 2004, №6. С. 37 – 47.
5. 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, Ч. 2, Вип. 3 (44). С. 130 – 136.
6. Родькин Д. И., Ромашихин Ю. В. Идентификация параметров асинхронных двигателей с псевдополигармоническим воздействием. *Електроприводи переменного тока: Труды междунар. науч. техн. конф. 12 – 16 марта 2012*. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 67 – 71.
7. Родькин Д. И. Декомпозиция составляющих мощности полигармонических сигналов. *Електротехніка*. Москва: АО «Фирма Знак». 2003, № 6. С. 34 – 37.
8. Калинов А. П., Лейко В. В., Родькин Д. И. Спектральный ана-

лиз мгновенной мощности в сети с полигармоническим напряжением и током. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Кременчук: КДПУ, 2006, Ч. 2, № 3 (38). С. 59 – 72.

9. Родькин Д. И. Оценка составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов. *Електроінформ*. Львів: ЕКОінформ. 2003, №3. С. 13 – 15.
10. Загирняк М. В., Родькин Д. И., Коренькова Т. В. Оценка процессов энергопреобразования с использованием составляющих мгновенной мощности. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ. 2013. Вип. 1 (21). С. 8 – 21.
11. Загирняк М. В., Родькин Д. И., Коренькова Т. В. Анализ процессов преобразования энергии в электромеханическом комплексе. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ. 2012. Вип. 3 (19). С. 30 – 36.
12. Родькин Д. И., Калинов А. П., Ромашихин Ю. В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока. *Електроприводи переменного тока: Труды Междунар. четырнадцатой науч.-техн. конф. 13-16 марта 2007*. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2007. С. 273 – 278.
13. Родькин Д. И., Коренькова Т. В. Энергетический метод анализа управляемости электромеханических систем. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КДУ. 2010, Вип. 2 (10). С. 8 – 16.
14. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Harmonic analysis of power in an electrohydraulic complex with nonlinear processes in the pipeline system. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Energy and Power System*. Kyiv, 2016. pp. 143 – 148.

References (transliterated)

1. Zagirnyak M. V., Rodkin D. I., Chornyi O. P., Romashikhin Yu. V. *Energeticheskii metod identifikatsii parametrov asinkhronnykh dvigateley* [Energy method for identification of parameters of asynchronous motors]. Kremenchug: PE Shcherbatykh AV, 2013. 164 p.
2. Rod'kin D. I., Romashihin YU. V. *Vozmozhnost' i effektivnost' metoda mgnovennoy moshchnosti v identifikatsionnykh zadachah* [Possibility and efficiency of the instantaneous power method in identification problems]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprodzerzhynskoho derzhavnotekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky)*. [Collection of scholarly papers of Dneprodzerzhynsky State Technical University (Technical Sciences)]. Dniprodzerzhynsk: DDTU, 2007, Tematychnyi vyp. «Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriia i praktyka». pp. 3507 – 512.
3. Rodkin D. I. Balans sostavlyayushchikh mgnovennoy moshchnosti poligarmonicheskikh signalov [The balance of the components of the instantaneous power of polyharmonic signals]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu im. M. Ostrohradskoho* [Bulletin Mykhailo Ostrohradskyi Polytechnic University]. Kremenchuk : KDPU, 2007, Ch. 1, Vyp. 3 (44). pp. 66 – 71.
4. Rod'kin D. I., Byalobrzheskij A. V., Lomonos A. I. Pokazатели energoprocessov v seti s poligarmonicheskimi napryazheniem i tokom [Indicators of energy processes in a network with polyharmonic voltage and current]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering]. Moskva: AO «Firma Znak». 2004, №6. pp. 37 – 47.
5. Romashihin YU. V., Rod'kin D. I., Kalinov A. P. Energeticheskii metod identifikatsii parametrov asinkhronnykh dvigateley [Energy method for identifying the parameters of asynchronous engines]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu im. M. Ostrohradskoho* [Bulletin Mykhailo Ostrohradskyi Polytechnic University]. Kremenchuk : KDPU, 2007, Ch. 2, Vyp. 3 (44). pp. 130 – 136.
6. Pod'kin D. I., Romashihin YU. V. Identifikatsiya parametrov asinkhronnykh dvigateley s psevdopoligarmonicheskimi vozdviistviem [Identification of parameters of asynchronous motors with pseudopolyharmonic influence]. *Elektropryvody peremennogo toka: Trudy mezhdunar. nauch. tekhn. konf. 12 – 16 marta 2012 goda, Ekaterinburg* [AC Drives: Proceedings of the Intern. scientific tech. conf. March 12 - 16, 2012]. Ekaterinburg: UrFU, 2012. pp. 67 – 71.
7. Rod'kin D. I. Dekompozitsiya sostavlyayushchikh moshchnosti poligarmonicheskikh signalov [Decomposition of the power components of polyharmonic signals]. *Elektrotekhnika* [Electrical

- engineering]. Moskva: AO «Firma Znak». 2003, № 6. pp. 34 – 37.
8. Kalinov A. P., Lejko V. V., Rod'kin D. I. Spektral'nyj analiz mgnovennoj moshchnosti v seti s poligarmonicheskim napryazheniem i tokom [Spectral analysis of instantaneous power in a network with polyharmonic voltage and current]. *Visnyk Kremenchut'skoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu* [Bulletin Polytechnic University]. Kremenchuk: KDPU, 2006, Ch. 2, № 3 (38). pp. 59 – 72.
 9. Rodkyn D. Y. Otsenka sostavliayushchikh mhnovennoi moshchnosti polyharmonycheskykh sygnalov [Evaluation of the components of the instantaneous power of polyharmonic signals]. *Elektroinform* [ELEKTROinform]. Lviv: EKOinform. 2003, №3. pp. 13 – 15.
 10. Zagirnyak M. V., Rodkin D. I., Korenkova T. V. Otsenka protsessov energopreobrazovaniya s ispol'zovaniyem sostavlyayushchikh mgnovennoy moshchnosti [Evaluation of energy conversion processes using instantaneous power components]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy* [Electromechanical and energy saving systems]. Kremenchuk: KrNU. 2013, Vyp. 1 (21). pp. 8 – 21.
 11. Zahyriak M. V., Rodkyn D. Y., Korenkova T. V. Analiz protsessov preobrazovaniya enerhiy v elektromekhanicheskom komplekse [Analysis of energy conversion processes in the electromechanical complex]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*. Kremenchuk: KrNU. 2012, Vyp. 3 (19). pp. 30 – 36.
 12. Rod'kin D. I., Kalinov A. P., Romashihin YU. V. Effektivnost' metoda energodiagnostiki parametrov dvigatelej peremennogo toka [The effectiveness of the method of energy diagnostics parameters of AC motors]. *Elektroprivody peremennogo toka: Trudy Mezhdunar. chetyrnadcatykh nauch.-tekhn. konf. 13-16 marta 2007 r., Ekaterinburg* [Alternating current electrical drives: Proceeding of the fourteenth International scientific-technical Conference 13-16 march 2007]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UMC UPI, 2007. pp. 273 – 278.
 13. Rod'kin D. I., Koren'kova T. V. Energeticheskij metod analiza upravlyayemosti elektromekhanicheskikh sistem [Energy analysis method of controllability of electromechanical systems]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy* [Electromechanical and saving up systems]. Kremenchuk: KSU, 2010, Vyp. 2 (10). pp. 8 – 16.
 14. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Harmonic analysis of power in an electrohydraulic complex with nonlinear processes in the pipeline system. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Energy and Power System*. Kyiv, 2016. pp. 143 – 148.

Поступила 01.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Родькін Дмитро Йосипович (Родькин Дмитрий Иосифович, Rodkin Dmitry Iosifovich) – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, завідувач кафедри систем автоматичного управління і електроприводу; м. Кременчук, Україна; e-mail: viktoriya_kovalch@ukr.net

Коренькова Тетяна Валеріївна (Коренькова Татьяна Валерьевна, Korenkova Tetyana Valeryivna) – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, доцент кафедри систем автоматичного управління і електроприводу; м. Кременчук, Україна; e-mail: tanya74kor@gmail.com

Ковальчук Вікторія Григоріївна (Ковальчук Виктория Григорьевна, Kovalchuk Viktoriia Grigorivna) – Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, асистент кафедри систем автоматичного управління і електроприводу; м. Кременчук, Україна; e-mail: viktoriya_kovalch@ukr.net