

УДК 621.313

**РЕШЕНИЕ ОДНОГО КЛАССА НЕКОРРЕКТНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ****Д. И. Родькин**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Энергетические процессы не являются основными для анализа электрических цепей, что объясняется недостаточным использованием интегральных методов. Они, несмотря на их простоту и наглядность, приводят к потере информации об энергопроцессах. С другой стороны, существует целый ряд важных для практических целей задач с некорректно поставленными условиями, для которых нет приемлемых методов решения. Для анализа этих процессов может использоваться энергетический метод, предложенный автором. Целью работы является выявление возможностей энергетического метода идентификации для оценки параметров электрических цепей в условиях некорректно заданных условий. В последнее время возник интерес к исследованию энергопроцессов в цепях с полигармоническими напряжениями и токами с использованием метода мгновенной мощности, в основу которого положен анализ временных зависимостей напряжения, тока и их произведения – мгновенной мощности. На этой базе разработан энергетический метод, сущность которого в том, что энергетический режим в конкретной электромеханической системе можно представить в форме уравнений баланса составляющих мгновенной мощности источника и потребителя. Как правило, при этом анализируются несинусоидальные напряжения и токи. Расширение возможностей энергетического метода возможно при питании исследуемой схемы от источника синусоидального напряжения. Для обеспечения применения энергетического метода реализуется режим питания исследуемой схемы от источника с необходимым гармоническим составом. Для этого вводятся дополнительные, искусственно полученные спектры гармоник напряжения и тока с периодом, отличным от периода напряжения сети. Показана эффективность использования энергетического метода при идентификации параметров схемы, содержащей последовательно включенные активное сопротивление, индуктивность и емкость. При этом для формирования идентификационных уравнений получены составляющие гармоник мгновенной мощности на указанных элементах. Погрешность идентификации параметров схемы при введении искусственных спектров гармоник напряжения и тока с различными периодами с использованием энергетического метода не превышает 5 %. Аналогичные результаты получаются при идентификации параметров асинхронных двигателей по Т-образной схеме замещения. Погрешность идентификации параметров не превышает 4 %. Таким образом, в работе подтверждена эффективность использования энергетического метода при идентификации параметров схем с некорректно заданными условиями.

**Ключевые слова:** энергетический метод, мгновенная мощность, идентификация параметров.

**РІШЕННЯ ОДНОГО КЛАСУ НЕКОРЕКТНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ЗАДАЧ  
ЕНЕРГЕТИЧНИМ МЕТОДОМ****Д. Й. Родькін**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Енергетичні процеси не є основними для аналізу електричних кіл, що пояснюється недостатнім використанням інтегральних методів. Вони, не дивлячись на їх простоту і наочність, призводять до втрати інформації про енергопроцеси. З іншої сторони, існує ціла низка важливих для практичних цілей задач з некорректно поставленими умовами, для яких відсутні прийнятні методи рішення. Для аналізу цих процесів може бути використаний енергетичний метод, запропонований автором. Метою роботи є виявлення можливостей енергетичного методу ідентифікації для оцінки параметрів електричних кіл в умовах некорректно заданих умов. В останній час виникла зацікавленість до дослідження енергопроцесів в ланцюгах з полігармонічними напругами та струмами з використанням методу миттєвої потужності, в основу якого покладено аналіз часових залежностей напруги, струму та їх добутку – миттєвої потужності. На цій базі розроблено енергетичний метод, сутність якого в тому, що енергетичний режим у конкретній електромеханічній системі можливо надати у формі рівнянь балансу складових миттєвої потужності джерела й споживача. Як правило, при цьому аналізуються несинусоїдальні напруги й струми. Розширення можливостей енергетичного методу можливо при живленні досліджуваної схеми від джерела синусоїдальної напруги. Для забезпечення використання енергетичного методу реалізується режим живлення досліджуваної схеми від джерела з необхідним гармонічним складом. Для цього вводять додаткові, штучно отримані спектри гармонік напруги й струму з періодом, відмінним від періоду напруги мережі. Показано ефективність використання енергетичного методу при ідентифікації параметрів схеми, що містить послідовно ввімкнені активний опір, індуктивність та ємність. При цьому для формування ідентифікаційних рівнянь отримано складові гармонік миттєвої потужності на вказаних елементах. Похибка ідентифікації параметрів схеми при введених штучних спектрах гармонік напруги й струму з відмінними періодами з використанням енергетичного методу не перевищує 5 %. Аналогічні результати отримуються при ідентифікації параметрів асинхронного двигуна за Т-подібною схемою заміщення. Похибка ідентифікації параметрів не перевищує 4 %. Таким чином, у роботі підтверджено ефективність використання енергетичного методу при ідентифікації параметрів схем з некорректно заданими умовами.

**Ключові слова:** енергетичний метод, миттєва потужність, ідентифікація параметрів.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Вопросам анализа электрических цепей, исследования режимов их работы, синтеза разнообразных усилительных и корректирующих устройств с использованием линейных элементов посвящено большое число работ зарубежных и отечественных авторов [1–3]. В основе исследований находятся основополагающие законы электротехники – законы Ома и Кирхгофа, с их помощью разработаны многочисленные методы анализа цепей, исследование их энергетических режимов. Последние чаще всего представляют собой финишные результаты анализа по сути, включая определение токов и напряжений на элементах, входящих в структуру исследуемого объекта. Чаще всего энергетический анализ сводится к определению потерь мощности, оценки коэффициента полезного действия, коэффициента мощности и др. Сами энергетические процессы в их существующей постановке не являются базовым материалом для анализа цепей или их синтеза. Во многом объясняется это тем, что до конца прошлого столетия основным методом для оценки энергопроцессов являлись те или иные модификации интегрального метода, предложенного в 60-е годы. Простота и наглядность метода – основное его достоинство, обеспечившее широкое использование в практической деятельности. Недостаток интегрального метода заключается в особенностях операции интегрирования периодических и, прежде всего, гармонических сигналов: при интегрировании гармонических сигналов или их компо-

нент с использованием операций типа  $\int_0^T a \sin(\Omega t)$

результат оказывается равным нулю, что означает со всей очевидностью потерю существенной информации об энергопроцессах. Таким образом, непосредственное применение существовавшей теории энергопроцессов не могло быть плодотворным при решении целого комплекса задач по анализу цепей переменного тока [4].

С другой стороны, как показывает опыт и анализ исследований в указанном направлении, существует целый класс задач с нечетко или некорректно поставленными условиями, т.е. задач достаточно важных для практических целей, но не имеющих надежных, применимых методов исследования или решения. Такие задачи могут быть решены или, возможно, некоторые из них могут быть решены с использованием энергетического метода, расширяющего возможности исследователя, или если энергетическая часть задачи бесконфликтно базируется на основополагающих законах электротехники – законах Ома и Кирхгофа. Этим, по сути, формируется формализованная часть задачи на базе упомянутых законов с полным соответствием закону сохранения.

Целью настоящей работы является выявление возможностей энергетического метода идентификации для оценки параметров электрических цепей при некорректно сформированных условиях или ограничениях. При этом некорректность определяется не прихотью исследователя, а невозможностью

приемлемой формулировки для решения такого класса задач.

#### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Анализ процессов в нелинейных электрических цепях на протяжении многих предшествующих лет является одной из тем, интерес к которой возрос в связи с проблематикой мониторинга, идентификации и диагностики. Особое место занимают «экзотические» варианты анализа с некорректными то ли условиями, то ли задающими параметрами, причем эта некорректность рассматриваемой задачи представляется не какой-то «ошибочностью» при постановке задачи, а той необходимостью, которая диктуется технической или технологической проблемами. Проблематике подобных исследований посвящены многочисленные исследования, опубликованные в разные годы.

Интерес к энергопроцессам в цепях переменного тока возрос в последние 15–20 лет в основном из-за затруднений, вызванных при исследовании в цепях с полигармоническими токами и напряжениями ввиду того, что интегральные методы оценки оказались не только неточными, но и в какой-то степени ошибочными. Выход был найден в использовании метода мгновенной мощности, в основу которого положен анализ временных зависимостей тока, напряжения и их произведения – мощности [5, 6]. Разные направления исследований в данном направлении уже давно дали значимые результаты при разработке и практическом использовании устройств преобразовательной техники, компенсаторов некачественности энергии, измерительных устройств и т.д. [7, 8].

Одно из интенсивно разрабатываемых направлений применения аппарата мгновенной мощности – использование ее в вопросах идентификации параметров электромеханических устройств и систем [9]. Основной выход из комплекса исследований – разработка энергетического метода идентификации, сущность которого заключается в том, что энергетический режим, связанный с процессами преобразования энергии в конкретной электромеханической системе, можно выразить в форме баланса составляющих источника и потребителя – анализируемой схемы, системы и т.д. Компоненты, определяющие мощность, при этом представляются в форме тригонометрических рядов – рядов Фурье [10–12]. Произведение компонент режима – напряжения и тока – произведение тригонометрических рядов. Результат перемножения рядов – новый тригонометрический ряд, гармоники которого представляют собой гармоники мгновенной мощности. Каждый из элементов анализируемой схемы имеет свои гармоники мощности.

Таким образом, уравнения баланса мощностей отдельных гармоник потребителя и источника представляют собой совокупность идентификационных уравнений. Количество таких уравнений зависит от числа компонент (гармоник тока и напряжения).

Для качественной оценки параметров анализируемой схемы при практической реализации задач идентификации приходится принудительно искажать кривую напряжения питания с помощью спе-

циальных полупроводниковых устройств – преобразователей – регуляторов напряжения или частоты. Разложение в ряд полученных кривых позволяет получить выражения для мгновенной мощности элементов схемы замещения, на основании которых составляется весь комплекс идентификационных уравнений – система уравнений для идентификации [13–15]. В обширном списке работ, посвященных этому вопросу, затрагиваются разные стороны решаемой задачи [9, 16].

Дальнейшее развитие работ этого направления вылилось в создание метода, базирующегося на том, что напряжение питания, будучи даже синусоидальным, разлагается в ряд Фурье на интервале, отличном от периода повторяемости процессов, т.е. на произвольном промежутке. Этим вводится в анализ значительное число гармонических напряжения с частотами, отличными от частоты питающего напряжения. При этом полученные гармоники напряжения и тока можно рассматривать в качестве заданных. Неизвестными дополнительно являются значения токов, частоты которых так же, как и составляющие напряжения, зависят от интервала, на котором осуществляется разложение кривых в ряд Фурье. Этот вопрос представляется достаточно многогранным, заслуживающим более детального исследования.

Анализ результатов решения идентификационных задач при использовании разложений в рамках повторяемости процессов достаточно детально рассмотрен в работах [14, 16].

Из анализа следует, что уменьшение периода разложения дает широкий спектр гармоник в исходных составляющих напряжения и тока, в то время как при решении идентификационных задач используется только часть упомянутого спектра, что, как показывает анализ, может привести к ощутимым ошибкам. При этом, исходя из принципиальных соображений, можно сделать вывод об отсутствии ошибок, т.к. в основе построения систем идентификационных уравнений лежит принцип соответствия закону сохранения энергии. Этот формальный признак, однако, находится в противоречии с реальными получаемыми результатами [14, 17], и это можно объяснить, с одной стороны, ошибками измерения параметров напряжения и тока, ошибками получения гармонического состава, ошибками решения конкретной идентификационной задачи.

Рассматриваемый метод можно существенно улучшить следующим образом. Как указывалось, идентификационные уравнения строятся на основании уравнений баланса составляющих мгновенной мощности, получаемых с помощью разложения в ряды Фурье в пределах периода переменного напряжения. В качестве одного из таких уравнений целесообразно использовать уравнение баланса для условий гармонического напряжения и соответствующего тока, т.е. для реального режима питания электрической машины. Очевидно, что при этом следует учитывать разные частоты параметров энергетического режима: для естественного режима электропитания и для искусственной интерпретации

питания путем введения гармонических с периодом, отличным от периода сети.

Этот вопрос, как и те, которые ранее отмечались, нуждается в дополнительных исследованиях.

Решение рассматриваемого метода формирования системы идентификационных уравнений можно реализовать, если учесть следующее положение. Разложение на части периода – введение в состав идентификационных уравнений дополнительных, зависящих от искусственно полученных спектров напряжения и тока. Исходя из этого, понятно, что формально можно учитывать вспомогательные уравнения за счет вводимых дополнительно гармоник напряжения с частотами, отличными от частоты сети. Параметры тока от вводимых источников при этом выступают в качестве неизвестных. Этот вопрос принципиально важен в том отношении, что в литературе подобные исследования не только не решены, но и не поставлены.

С целью анализа этого принципиального вопроса ниже рассмотрен пример анализа применительно к простейшей электротехнической схеме с некорректно заданными исходными данными (рис. 1). Рассматривается схема с линейными индуктивностью и емкостью (рис. 1,а). Известными параметрами являются напряжение сети и ток.

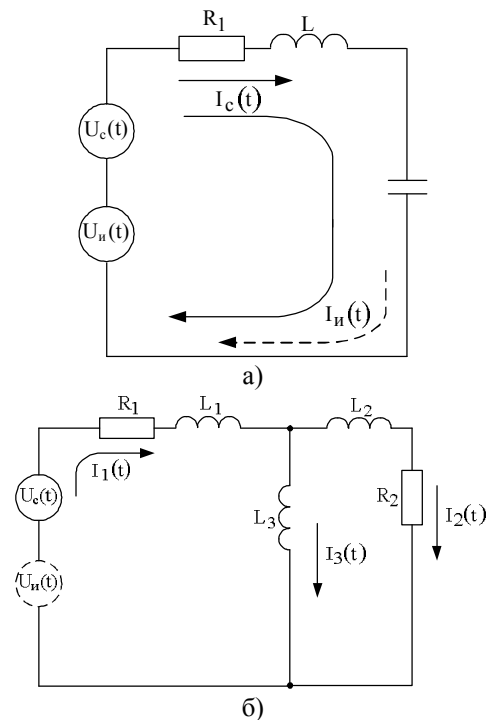


Рисунок 1 – Схемы замещения линейной цепи (а) и асинхронного двигателя (б) с использованием искусственных источников питания

В контуре с синусоидальным напряжением

$$U_c(t) = U_{cn} \cos(\Omega t) \quad (1)$$

и неизвестными параметрами  $R, L, C$  протекает ток

$$I_c(t) = I_{cm} \cos(\Omega t - \varphi). \quad (2)$$

Необходимо определить параметры контура, его резонансную частоту и ток при резонансе.

Задача относится к классу некорректно поставленных из-за того, что могут быть различные параметры  $L$  и  $C$ , при которых выполняются условия, касающиеся тока  $I_c(t)$  при заданном напряжении. Убедимся в этом таким путем.

Для таких условий ток в цепи:

$$I_c(t) = \sqrt{2}I_{cm} (\cos(\Omega t) \cos \varphi + \sin(\Omega t) \sin \varphi) = I_{ca} \cos(\Omega t) + I_{cb} \sin(\Omega t), \quad (3)$$

где  $I_{ca} = \sqrt{2}I_{cm} \cos \varphi$ ;  $I_{cb} = \sqrt{2}I_{cm} \sin \varphi$ .

Его зависимость имеет такой вид:

$$I_{cm} = \frac{U_{cn}}{\sqrt{R_c^2 + \left(\Omega_c L_c - \frac{1}{\Omega_c C}\right)^2}} = \frac{U_{cn}}{Z_3};$$

$$Z_3 = \sqrt{R_c^2 + \left(\Omega_c L_c - \frac{1}{\Omega_c C}\right)^2}.$$

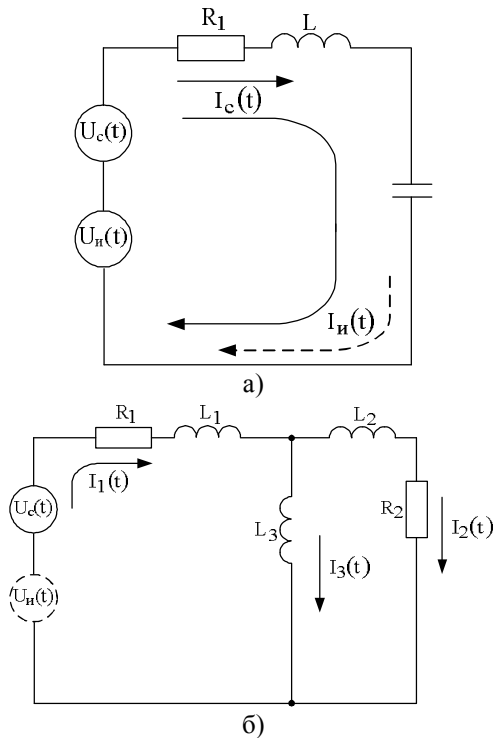


Рисунок 1 – Схемы замещения линейной цепи (а) и асинхронного двигателя (б) с использованием искусственных источников питания

Так как сопротивление  $R_c$  определяется достаточно легко, то на операции его определения не задерживаемся и считаем его равным  $R_c$ .

Следовательно, реактивное сопротивление контура

$$X_3 = \sqrt{Z_3^2 - R_c^2} = A$$

и должно быть равно некоторой постоянной величине.

Тогда имеем равенство

$$\Omega L - \frac{1}{\Omega C} = A, \quad (4)$$

которое представим в более приемлемой форме:

$$\Omega^2 LC - \Omega CA = 1.$$

Обозначив  $L = x$ ,  $C = y$ , запишем:

$$\Omega^2 xy - \Omega Ax = 1, \quad (5)$$

причем  $\Omega$  и  $A$  в нашем случае – константы.

Как видно, уравнение имеет множество решений, вследствие чего поставленную задачу можно отнести к классу некорректно заданных. Для решения этой простой задачи, аналогами которой могут быть разнообразные электромеханические системы и другие динамические объекты, воспользуемся известным приемом, основывающимся на уравнениях баланса мгновенной мощности [13, 15].

Разработанная теория базируется на том, что энергетические процессы рассматриваются во временной области без использования операций усреднения (интегрирования), определения среднеквадратичных величин и т.п. По сложившейся терминологии, выполняемые таким образом задачи осуществляются с использованием метода мгновенной мощности.

Интерес к методу мгновенной мощности, возникший у целого ряда исследователей в последние 15 лет, вызван прежде всего тем, что он позволяет решать целый ряд специфических электротехнических задач. По этой причине и комплекс исследований в этом направлении можно достаточно условно разделить в соответствии с теми проблемами, которые решаются теми или иными коллективами исследователей.

Наиболее ранние работы по проблематике мгновенной мощности, характеризующие сферы теоретических исследований и практического использования результатов, представляются таким образом:

- теоретические исследования энергопроцессов с использованием мгновенной мощности, применение полученных результатов для построения активных фильтров и управляемых компенсирующих устройств [7, 8];

- теоретический анализ энергопроцессов во временной области, создание преобразовательных систем с интегрированными модулями компенсации составляющих мгновенной мощности и улучшения качества питающего напряжения [1, 5];

- анализ процессов преобразования энергии с полигармоническими напряжениями и токами, теоретическое обоснование уравнений баланса гармонических составляющих мгновенной мощности и создание энергетического метода для идентификации параметров электротехнических устройств и систем. Достаточно интенсивно развиваются исследования энергопроцессов во временной области в цепях с нелинейностями, как непосредственное использование полученных результатов в методе энергодиагностики [14, 18].

Замечательное свойство теоретической базы энергетического метода анализа, ошибочно счи-

тающееся как недостаток, заключается в том, что при умножении компонент, образующих мощность, полученный результат содержит существенно большее количество составляющих, чем в каждом из исходных величин, например, в напряжении  $U(t)$  и токе  $I(t)$ . Это видно из простейшего примера, для чего воспользуемся ранее приведенными зависимостями:

$$P(t) = U_c(t)I_c(t) = U_{cn}I_{cm} \cos(\Omega t) \cos(\Omega t - \varphi) = \frac{U_{cn}I_{cm}}{2} + \frac{U_{cn}I_{cm}}{2} \cos(2\Omega t) \cos \varphi + \frac{U_{cn}I_{cm}}{2} \sin(2\Omega t) \sin \varphi = P_0 + P_a(t) + P_b(t), \quad (6)$$

где  $P_0$  – постоянная составляющая;  $P_a, P_b$  – ортогональные составляющие мгновенной мощности.

Вывод очевиден – умножение двух сигналов во временном их представлении приводит к увеличению числа составляющих и преобразованию частот. Каждый из исходных сигналов имеет, естественно, одну составляющую с частотой  $\Omega$ , а исходный результат формально содержит три сигнала: сигнал с частотой  $\Omega_1 = \Omega_i - \Omega_u = 0$ , т.е. постоянный во времени сигнал, и ортогональные составляющие  $P_a$  и  $P_b$  с частотой  $\Omega_2 = \Omega_i + \Omega_u = 2\Omega$ . Здесь индексами "u" и "i" обозначены частоты сигналов напряжения и тока. Аналогичная картина со своими, естественно, особенностями имеет место при умножении полигармонических сигналов напряжения и тока:

$$U(t) = \sum_{n=0}^{n=N} U_{an} \cos(n\Omega t) + \sum_{n=0}^{n=N} U_{bn} \sin(n\Omega t); \quad (7)$$

$$I(t) = \sum_{m=0}^{m=M} I_{am} \cos(m\Omega t) + \sum_{m=0}^{m=M} I_{bm} \sin(m\Omega t). \quad (8)$$

Мгновенная мощность, как результат умножения исходных сигналов:

$$P(t) = \sum_{n=0}^{n=N} U_{an} \cos(n\Omega t) \sum_{m=0}^{m=M} I_{am} \cos(m\Omega t) + \sum_{n=0}^{n=N} U_{bn} \sin(n\Omega t) \sum_{m=0}^{m=M} I_{bm} \sin(m\Omega t) + \sum_{n=0}^{n=N} U_{an} \cos(n\Omega t) \sum_{m=0}^{m=M} I_{bm} \sin(m\Omega t) + \sum_{n=0}^{n=N} U_{bn} \sin(n\Omega t) \sum_{m=0}^{m=M} I_{am} \cos(m\Omega t). \quad (9)$$

Анализ результатов, которые получают в результате операций перемножения соответствующих рядов, будет следующим:

- каждое из элементарных произведений гармоник напряжения с относительной частотой  $n$  на ток с относительной частотой  $m$  дает гармонику мощности, порядок которой определяется  $K_1 = n + m$ ;  $K_2 = n - m$ ;
- максимальный порядок гармоник мгновенной мощности равен  $K_m = N + M$ ;
- общее число элементарных произведений составляющих напряжения  $U_n$  и тока  $I_m$  равно про-

изведению  $P_m = NM$ , причем  $P_m \gg K_m$ . Так, например, при  $M = N = 5$  максимальная частота гармоник мощности  $K_m = 10$ ; общее число произведений компонент  $P_m = 25$ ;

– общее число гармоник мгновенной мощности с учетом составляющих с частотой  $K = 0$  (постоянных составляющих), в соответствии с приведенным ранее анализом, будет

$$r = M + 2(N + M) = 25.$$

Это означает, что при пяти параметрах, определяемых, например, пятью источниками напряжения, при использовании энергетического метода оценки получается значительное число независимых параметров энергетического режима – составляющих гармоник мгновенной мощности. Отмеченное трудно переоценить, если учесть то обстоятельство, что при использовании метода можно воспользоваться уравнениями энергетического баланса между источником питания и потребителем в форме уравнений баланса на составляющих мгновенной мощности:

- баланса постоянных составляющих любой из гармоник или по всей их совокупности;
- баланса знакопеременных косинусных составляющих заданной гармоники или их совокупности (по всем знакопеременным составляющим);
- баланса знакопеременных синусных составляющих заданной гармоники или их совокупности.

В условиях нашего примера таких уравнений баланса будет 30, что позволяет решать разные, в том числе идентификационные, задачи с 30 неизвестными. Здесь уместно отметить, что каждое из уравнений баланса полностью соответствует закону сохранения. Аппарат мгновенной мощности хорошо себя зарекомендовал при решении идентификационных задач, в частности, для определения параметров электромеханических систем [12–14].

Возможности энергетического метода для оценки параметров до конца не изучены, и автор, в соответствии со сказанным, пытается в данной работе выявить возможности метода для решения нетрадиционных, в частности, некорректно поставленных задач. Ранее, на примере цепи с индуктивностью, емкостью и сопротивлением, показана невозможность решения задачи. Второй пример, как следует из рис. 1,б, соответствует часто затрагиваемой в исследованиях схеме замещения асинхронного двигателя в соответствии с так называемым ее вариантом Т-образной схемой. Условия примера таковы: известно сопротивление  $R_1$  ввиду того, что оно легко определяется, неизвестны индуктивности статора  $L_1$ , ротора  $L_2$  и контура намагничивания  $L_\mu$ . Известно также то, что двигатель подключен к источнику гармонического напряжения  $U_c$ , причем ток в цепи источник питания–потребитель также известен. Исходных уравнений для идентификации параметров явно недостаточно.

*Решение некорректно заданных идентификационных задач.*

Для решения класса электротехнических задач, заданных некорректно, воспользуемся приемом, который может быть использован в случае наличия в арсенале исследователя отработанных подходов энергетического метода при решении идентификационных задач. Сущность приема в том, что в контур сеть-потребитель включается (виртуально) один (рис.1,а) или несколько источников, если анализируется более сложный схемный вариант. Вопрос выбора параметров источника и его параметров заслуживает особого внимания, хотя некоторые вопросы излагаются ниже. Напряжение источника находится в пределах значений  $U_c$ , частота напряжения введенного источника отлична от частоты источника  $U_c$ . Так как все параметры схем замещения линейны, то, воспользовавшись принципом суперпозиции, можно записать выражение для тока  $I_u(t)$ :

$$\begin{aligned} I_u(t) &= I_{um} \cos(\Omega_u t - \phi_u) = \\ &= I_{ua} \cos(\Omega_u t) + I_{ub} \sin(\Omega_u t). \end{aligned} \quad (10)$$

Как следует из наших рассуждений, в данном случае  $I_{ua}$  и  $I_{ub}$  – новые неизвестные, обусловленные введением нового источника. Выполнив эту простейшую операцию, по существу обеспечиваем режим полигармонического питания, имея два источника напряжения с известными параметрами, один известный ток, а также неизвестные: индуктивность, емкость и две квадратурные составляющие тока второго источника  $I_{ua}$  и  $I_{ub}$ , т.е. в целом четыре неизвестных. Несмотря на то, что число неизвестных возросло вдвое (от двух до четырех), однако, как следует из изложенного выше, число уравнений, которое может быть получено при анализе энергетического режима  $M = N = 2$ :  $r = M + 2(N + M) = 10$ .

Составляющие мгновенной мощности определяются в соответствии с известной зависимостью:

$$\begin{aligned} P(t)_{L\Sigma} &= LI(t) \frac{dI(t)}{dt} = \Omega_1 L (I_{a1} \cos \Omega_1 t + I_{b1} \sin \Omega_1 t + \\ &+ I_{a2} \cos k_1 \Omega_1 t + I_{b2} \sin k_1 \Omega_1 t) (-I_{a1} \sin \Omega_1 t + \\ &+ I_{b1} \cos \Omega_1 t - k_1 I_{a2} \sin k_1 \Omega_1 t + k_1 I_{b2} \cos k_1 \Omega_1 t), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $k_1$  – коэффициент, определяющий отношение частоты искусственного источника к частоте используемого,  $k_1 = \Omega_u / \Omega_c$ .

Раскрыв скобки и группируя компоненты, получим:

$$\begin{aligned} P(t)_{L\Sigma} &= \frac{1}{2} \Omega_1 L (2I_{a1} I_{b1} \cos 2\Omega t + (I_{a1}^2 - I_{b1}^2) \sin 2\Omega t + \\ &+ (I_{a1} I_{b2} - I_{b1} I_{a2}) (k_1 - 1) \cos(1 - k_1) \Omega_1 t + \\ &+ (I_{b1} I_{b2} + I_{a1} I_{a2}) (1 + k_1) \sin(1 - k_1) \Omega_1 t + \\ &+ (I_{a1} I_{b2} + I_{b1} I_{a2}) (1 + k_1) \cos(1 + k_1) \Omega_1 t + \\ &+ (-I_{a1} I_{a2} + I_{b1} I_{b2}) (1 + k_1) \sin(1 + k_1) \Omega_1 t + \\ &+ 2k_1 I_{a2} I_{b2} \cos 2k_1 \Omega_1 t + k_1 (-I_{a2}^2 + I_{b2}^2) \sin 2k_1 \Omega_1 t); \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P(t)_{C\Sigma} &= \frac{1}{C} I(t) \int I(t) dt = \frac{1}{\Omega_1 C} (I_{a1} \cos \Omega_1 t + \\ &+ I_{b1} \sin \Omega_1 t + I_{a2} \cos k_1 \Omega_1 t + I_{b2} \sin k_1 \Omega_1 t) \times \\ &\times (I_{a1} \sin \Omega_1 t - I_{b1} \cos \Omega_1 t + \frac{1}{k_1} I_{a2} \sin k_1 \Omega_1 t - \\ &- \frac{1}{k_1} I_{b2} \cos k_1 \Omega_1 t). \end{aligned} \quad (13)$$

Открыв скобки, получим:

$$\begin{aligned} P(t)_{C\Sigma} &= \frac{1}{2\Omega_1 C} (-2I_{a1} I_{b1}) \cos 2\Omega t + \\ &+ (I_{a1}^2 - I_{b1}^2) \sin 2\Omega t + (I_{a1} I_{b2} - I_{b1} I_{a2}) \times \\ &\times (1 - \frac{1}{k_1}) \cos(1 - k_1) \Omega_1 t + (I_{a1} I_{a2} + I_{b1} I_{b2}) \times \\ &\times (1 - \frac{1}{k_1}) \sin(1 - k_1) \Omega_1 t + (-I_{a1} I_{b2} - I_{b1} I_{a2}) \times \\ &\times (1 + \frac{1}{k_1}) \cos(1 + k_1) \Omega_1 t + (I_{a1} I_{a2} - I_{b1} I_{b2}) \times \\ &\times (1 + \frac{1}{k_1}) \sin(1 + k_1) \Omega_1 t + \frac{2}{k_1} I_{a2} I_{b2} \cos 2k_1 \Omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{k_1} (I_{a2}^2 - I_{b2}^2) \sin 2k_1 \Omega_1 t. \end{aligned} \quad (14)$$

Мгновенную мощность в элементах схемы замещения получим, воспользовавшись известными выражениями для источника, активного сопротивления и индуктивности, емкости:

$$P_u(t) = U(t) I(t);$$

$$P_R(t) = I^2(t) R;$$

$$P_L(t) = E(t) I(t) = L \frac{dI(t)}{dt} I(t); \quad (15)$$

$$P_C(t) = E(t) I(t) = \frac{I(t)}{C} \left( \int I(t) dt \right),$$

где  $P_u, P_R, P_L, P_C$  – мощность источника, активного сопротивления, индуктивности, емкости во времени.

В нашем случае напряжение источника содержит две составляющие  $U_1$  и  $U_2$ , которые с целью наглядности рассматриваются как не имеющие фазового сдвига.

С учетом отмеченного, выражения для напряжения и тока представим в форме:

$$U(t)_{\Sigma} = U_1 \cos(\Omega_1 t) + U_2 \cos(k_1 \Omega_1 t);$$

$$I(t)_{\Sigma} = I_1 \cos(\Omega_1 t - \psi_1) + I_2 \cos(k_1 \Omega_1 t - \psi_2).$$

Мощность двух источников:

$$P_u(t) = U(t)_{\Sigma} I(t)_{\Sigma}.$$

С учетом преобразования получим:

$$\begin{aligned}
 P(t)_{\Sigma} = & \frac{1}{2}(U_1 I_{a1} + U_2 I_{a2} + U_1 I_{a1} \cos 2\Omega_1 t + \\
 & + U_1 I_{b1} \sin 2\Omega_1 t + (U_1 I_{a2} + U_2 I_{a1}) \times \\
 & \times \cos(1 - k_1)\Omega_1 t + (U_2 I_{b1} - U_1 I_{b2}) \times \\
 & \times \sin(1 - k_1)\Omega_1 t + (U_1 I_{a2} + U_2 I_{a1}) \times \\
 & \times \cos(1 + k_1)\Omega_1 t + (U_1 I_{b2} + U_2 I_{b1}) \times \\
 & \times \sin(1 + k_1)\Omega_1 t + U_2 I_{a2} \cos 2k_1\Omega_1 t + \\
 & + U_2 I_{b2} \sin 2k_1\Omega_1 t).
 \end{aligned} \quad (16)$$

Мгновенная мощность на активном сопротивлении имеет вид:

$$\begin{aligned}
 P(t)_{R\Sigma} = & I^2(t)R = R(I_{a1} \cos \Omega_1 t + \\
 & + I_{b1} \sin \Omega_1 t + I_{a2} \cos k_1\Omega_1 t + \\
 & + I_{b2} \sin k_1\Omega_1 t) \times (I_{a1} \cos \Omega_1 t + I_{b1} \sin \Omega_1 t + \\
 & + I_{a2} \cos k_1\Omega_1 t + I_{b2} \sin k_1\Omega_1 t).
 \end{aligned} \quad (17)$$

Раскрыв скобки, получим:

$$\begin{aligned}
 P(t)_{R\Sigma} = & \frac{1}{2}R(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{a2}^2 + I_{b2}^2 + \\
 & + (I_{a1}^2 - I_{b1}^2) \cos 2\Omega_1 t + 2I_{a1}I_{b1} \sin 2\Omega_1 t + \\
 & + 2(I_{a1}I_{a2} + I_{b1}I_{b2}) \cos(1 - k_1)\Omega_1 t + \\
 & + 2(I_{b1}I_{a2} - I_{a1}I_{b2}) \sin(1 - k_1)\Omega_1 t + \\
 & + 2(I_{a1}I_{a2} - I_{b1}I_{b2}) \cos(1 + k_1)\Omega_1 t + \\
 & + 2(I_{a1}I_{b2} + I_{b1}I_{a2}) \sin(1 + k_1)\Omega_1 t + \\
 & + (I_{a2}^2 - I_{b2}^2) \cos 2k_1\Omega_1 t + 2I_{a2}I_{b2} \sin 2k_1\Omega_1 t).
 \end{aligned} \quad (18)$$

Система уравнений баланса составляющих мгновенной мощности при использовании двух гармоник напряжения и тока имеет вид:

$$\begin{aligned}
 R(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{a2}^2 + I_{b2}^2) = & U_1 I_{a1} + U_2 I_{a2}; \\
 \frac{1}{\Omega_1 C} (-2I_{a1}I_{b1}) + \Omega_1 L(2I_{a1}I_{b1}) + & R(I_{a1}^2 - I_{b1}^2) = U_1 I_{a1}; \\
 \frac{1}{\Omega_1 C} (I_{a1}^2 - I_{b1}^2) + \Omega_1 L(I_{a1}^2 - & I_{b1}^2) + 2R(I_{a1}I_{b1}) = U_1 I_{b1}; \\
 \frac{1}{\Omega_1 C} ((I_{a1}I_{b2} - I_{b1}I_{a2})(1 - \frac{1}{k_1})) + & \Omega_1 L \times \\
 \times ((I_{a1}I_{b2} - I_{b1}I_{a2}) \times (k_1 - 1)) + & \\
 + 2R(I_{a1}I_{a2} + I_{b1}I_{b2}) = & U_1 I_{a2} + U_2 I_{a1}; \\
 \frac{1}{\Omega_1 C} ((I_{a1}I_{a2} + I_{b1}I_{b2})(1 - \frac{1}{k_1})) + & \\
 + \Omega_1 L((I_{b1}I_{b2} + I_{a1}I_{a2}) \times (1 + k_1)) + & \\
 + 2R(I_{b1}I_{a2} - I_{a1}I_{b2}) = & U_2 I_{b1} - U_1 I_{b2}; \\
 \frac{1}{\Omega_1 C} ((-I_{a1}I_{b2} - I_{b1}I_{a2})(1 + \frac{1}{k_1})) + & \\
 + \Omega_1 L((I_{a1}I_{b2} + I_{b1}I_{a2}) \times (1 + k_1)) + & \\
 + 2R(I_{a1}I_{a2} - I_{b1}I_{b2}) = & U_1 I_{a2} + U_2 I_{a1};
 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{\Omega_1 C} ((I_{a1}I_{a2} - I_{b1}I_{b2})(1 + \frac{1}{k_1})) + & \\
 + \Omega_1 L((-I_{a1}I_{a2} + I_{b1}I_{b2}) \times (1 + k_1)) + & \\
 + 2R(I_{a1}I_{b2} + I_{b1}I_{a2}) = & U_1 I_{b2} + U_2 I_{b1}; \\
 \frac{1}{\Omega_1 C} (\frac{2}{k_1} I_{a2}I_{b2}) + \Omega_1 L(2k_1 I_{a2}I_{b2}) + & \\
 + R(I_{a2}^2 - I_{b2}^2) = & U_2 I_{a2}; \\
 \frac{1}{\Omega_1 C} (\frac{1}{k_1} (I_{a2}^2 - I_{b2}^2)) + \Omega_1 L \times & \\
 \times (k_1 (-I_{a2}^2 + I_{b2}^2)) + 2R(I_{a2}I_{b2}) = & U_2 I_{b2}.
 \end{aligned}$$

Для подтверждения работоспособности математического аппарата энергетического метода при решении некорректно заданной идентификационной задачи полагаем известными:

- напряжение питания  $U = 220$  В;
- частоту питания  $\Omega = 314$  с<sup>-1</sup>;
- активную составляющую тока источника  $I_{ca} = 0,209$  А;
- реактивную составляющую тока источника  $I_{cb} = 5,605$  А;
- напряжение дополнительного источника  $U_d = 220$  В;
- частоту дополнительного источника  $\Omega_d = 628$  с<sup>-1</sup>.

Неизвестными параметрами являются активное сопротивление, индуктивность, емкость и составляющие тока от второго источника.

Использование энергетического метода при идентификации электромеханических параметров (ЭМП) схемы (рис. 1,а) с учетом двух гармоник приводит к появлению избыточных уравнений. То есть при использовании двух гармоник напряжения и тока с номерами 1 и 2 получаются уравнения составляющих мгновенной мощности с номерами 0, 1, 2, 3, 4. С учетом разделения мгновенной мощности по косинусным и синусным составляющим получается девять уравнений для идентификации ЭМП схемы. Если разделить постоянную составляющую, то это даст еще одно дополнительное уравнение для идентификации ЭМП. Поэтому необходимо выяснить, каким образом влияют используемые уравнения составляющих гармоник мгновенной мощности на идентифицируемые ЭМП рассматриваемой схемы. Для этого были определены ЭМП схемы (рис. 1,а) при использовании различных уравнений мгновенной мощности.

Параметры, заданные в схеме и рассчитанные с использованием уравнений баланса составляющих мгновенной мощности, приведены в табл. 1. В табл. 1 приняты следующие обозначения: 0 – уравнение по постоянной составляющей мгновенной мощности; 1а, 2а, 3а, 4а – уравнения косинусных составляющих мгновенной мощности по первой, второй, третьей, четвертой гармонике, соответственно; 1б, 2б, 3б, 4б – уравнения синусных составляющих мгновенной мощности по первой, второй, третьей, четвертой гармонике, соответственно.

Также были определены ЭМП рассматриваемой схемы при варьировании частоты второго источника (табл. 2) и выполнена оценка влияния величины составляющих мгновенной мощности при использовании всех постоянных составляющих и отдельно от каждой гармонике напряжения и тока (табл. 3) для уравнений:

$$R(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{a2}^2 + I_{b2}^2) = U_1 I_{a1} + U_2 I_{a2};$$

$$R(I_{a1}^2 + I_{b1}^2) = U_1 I_{a1}; \quad (20)$$

$$R(I_{a2}^2 + I_{b2}^2) = U_2 I_{a2}.$$

Для подтверждения работоспособности указанного подхода в табл. 4 приведены составляющие мгновенной мощности источника и элементов схемы замещения. Результаты анализа данных (табл. 4) показывают, что баланс мгновенной мощности соблюдается для всех рассматриваемых идентификационных уравнений.

Таблица 1 – Идентифицируемые параметры схемы замещения при использовании различных уравнений мгновенной мощности

Используемые уравнения составляющих мгновенной мощности	R, Ом	L, Гн	C, мкФ	I <sub>a2</sub> , А	I <sub>b2</sub> , А
Искомые параметры, заданные в схеме					
	0,731	0,065	80	0,195	5,456
Расчетные параметры с помощью энергетического метода					
0, 1a, 1b, 2a, 2b	0,731	0,062	82,58	0,165	5,611
0, 1a, 1b, 3a, 3b	0,731	0,064	81,073	0,168	5,629
0, 1a, 1b, 4a, 4b	0,731	0,063	82,67	0,163	5,638
0, 2a, 2b, 3a, 3b	0,731	0,062	82,66	0,165	5,611
0, 2a, 2b, 4a, 4b	0,731	0,069	83,78	0,160	5,673
1a, 1b, 2a, 2b, 3a	0,731	0,0643	82,51	0,162	5,621
1a, 1b, 2a, 2b, 3b	0,731	0,0648	82,183	0,169	5,666

Таблица 2 – Идентифицируемые параметры схемы замещения при различных частотах искусственного источника

k <sub>1</sub> = Ω <sub>2</sub> /Ω <sub>1</sub> , где Ω <sub>1</sub> = 314 с <sup>-1</sup>	R, Ом	L, Гн	C, мкФ	I <sub>a2</sub> , А	I <sub>b2</sub> , А
Искомые параметры, заданные в схеме					
	0,731	0,065	80	0,195	5,456
Расчетные параметры с помощью энергетического метода					
2	0,731	0,062	82,58	0,165	5,611
1,7	0,731	0,0614	83,308	0,166	5,615
1,5	0,731	0,0608	84,53	0,1667	5,624
1,4	0,731	0,0601	86,353	0,168	5,636
1,2	0,731	0,0606	84,012	0,1659	5,626

Таблица 3 – Идентифицируемые параметры схемы замещения при использовании различных уравнений по постоянной составляющей

Используемое уравнение по постоянной составляющей	R, Ом	L, Гн	C, мкФ	I <sub>a2</sub> , А	I <sub>b2</sub> , А
Искомые параметры, заданные в схеме					
	0,731	0,065	80	0,195	5,456
Расчетные параметры с помощью энергетического метода					
1	0,731	0,062	82,58	0,165	5,611
2	0,731	0,062	82,58	0,165	5,611
3	0,731	0,0625	82,37	0,168	5,605



Таблица 4 – Значения составляющих мгновенной мощности на источнике и элементах схемы замещения

$R(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{a2}^2 + I_{b2}^2) = U_1 I_{a1} + U_2 I_{a2}$	
$R(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{a2}^2 + I_{b2}^2)$ , Вт	$U_1 I_{a1} + U_2 I_{a2}$ , Вт
115,011	115,06
$R(I_{a1}^2 + I_{b1}^2) = U_1 I_{a1}$	
$R(I_{a1}^2 + I_{b1}^2)$ , Вт	$U_1 I_{a1}$ , Вт
91,988	91,96
$R(I_{a2}^2 + I_{b2}^2) = U_2 I_{a2}$	
$R(I_{a2}^2 + I_{b2}^2)$ , Вт	$U_2 I_{a2}$ , Вт
23,022	23,1

Зависимость тока от частоты получим из следующего соотношения:

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + \left(\Omega L - \frac{1}{\Omega C}\right)^2}}$$

Для значений параметров рассматриваемой схемы (рис. 1,а), приведенных в табл. 5, построим график зависимости тока от частоты (рис. 2).

Таблица 5 – Известные параметры анализируемой схемы

$U_1$ , В	$R$ , Ом	$L$ , Гн	$C$ , мкФ
220	0,731	0,065	80

Из зависимости определяем резонансную частоту  $\Omega_r = 438,5 \text{ с}^{-1}$ .

Идентификация электромагнитных параметров для схемы замещения асинхронного двигателя при использовании псевдоисточников.

При идентификации ЭМП асинхронного двигателя (АД) воспользуемся Т-образной схемой замещения (рис. 3). В схеме известны напряжение от источника с частотой 314 рад/с, токи от этого источника и активное сопротивление статора. Незвестными являются индуктивности статора, ротора и контура намагничивания, активное сопротивление ротора, а также составляющие токов ротора и контура намагничивания.

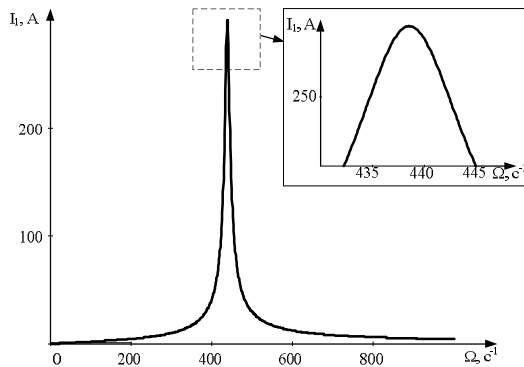


Рисунок 2 – Зависимость тока от частоты

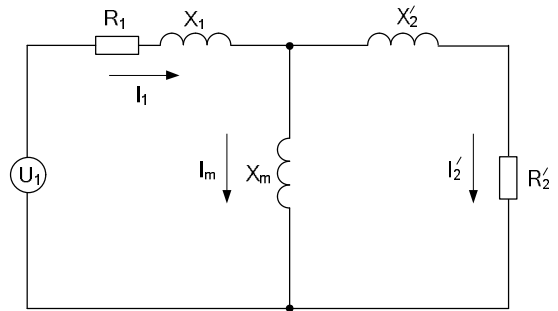


Рисунок 3 – Т-образная схема замещения АД

Общее количество неизвестных параметров и количество уравнений при использовании энергетического метода с учетом уравнений по закону Кирхгофа для токов приведены в табл. 6.

Система уравнений для идентификации ЭМП АД при использовании одного дополнительного источника:

$$\begin{aligned}
 R_1((I_{1a_1})^2 + (I_{1b_1})^2) + R_2'((I_{2a_1})^2 + (I_{2b_1})^2) &= U_1 I_{1a_1}; \\
 R_1((I_{1a_3})^2 + (I_{1b_3})^2) + R_2'((I_{2a_3})^2 + (I_{2b_3})^2) &= U_1 I_{1a_3}; \\
 \Omega [L_1(2I_{1a_1} I_{1b_3} - 2I_{1b_1} I_{1a_3}) + L_\mu(2I_{\mu a_1} I_{\mu b_3} - 2I_{\mu b_1} I_{\mu a_3}) + \\
 + L_2(2I_{2a_1} I_{2b_3} - 2I_{2b_1} I_{2a_3})] + R_1(2I_{1a_1} I_{1a_3} + 2I_{1b_1} I_{1b_3}) + \\
 + R_2'(2I_{2a_1} I_{2a_3} + 2I_{2b_1} I_{2b_3}) &= U_1 I_{1a_3} + U_1 I_{1a_1}; \\
 \Omega [L_1(2I_{1a_1} I_{1b_1}) + L_\mu(2I_{\mu a_1} I_{\mu b_1}) + \\
 + L_2(2I_{2a_1} I_{2b_1})] + R_1((I_{1a_1})^2 - \\
 - (I_{1b_1})^2) + R_2'((I_{2a_1})^2 - (I_{2b_1})^2) &= U_1 I_{1a_1}; \\
 \Omega [L_1(-2I_{1a_1} I_{1a_3} - 2I_{1b_1} I_{1b_3}) + L_\mu(-2I_{\mu a_1} I_{\mu a_3} - \\
 - 2I_{\mu b_1} I_{\mu b_3}) + L_2(-2I_{2a_1} I_{2a_3} - 2I_{2b_1} I_{2b_3})] + \\
 + R_1(2I_{1a_1} I_{1b_3} - 2I_{1b_1} I_{1a_3}) + \\
 + R_2'(2I_{2a_1} I_{2b_3} - 2I_{2b_1} I_{2a_3}) &= U_1 I_{1b_3} - U_1 I_{1b_1}; \\
 \Omega [L_1(-(I_{1a_1})^2 + (I_{1b_1})^2) + L_\mu(-(I_{\mu a_1})^2 + \\
 + (I_{\mu b_1})^2) + L_2(-(I_{2a_1})^2 + (I_{2b_1})^2)] + \\
 + R_1(2I_{1a_1} I_{1b_1}) + R_2'(2I_{2a_1} I_{2b_1}) &= U_1 I_{1b_1}; \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Omega [L_1(4I_{1a_1}I_{1b_3} + 4I_{1b_1}I_{1a_3}) + L_\mu(4I_{\mu a_1}I_{\mu b_3} + \\ & + 4I_{\mu b_1}I_{\mu a_3}) + L_2(4I_{2a_1}I_{2b_3} + 4I_{2b_1}I_{2a_3})] + \\ & + R_1(2I_{1a_1}I_{1a_3} - 2I_{1b_1}I_{1b_3}) + R_2'(2I_{2a_1}I_{2a_3} - \\ & - 2I_{2b_1}I_{2b_3}) = U_{1_1}I_{1a_3} + U_{1_3}I_{1a_1}; \\ & \Omega [L_1(-4I_{1a_1}I_{1a_3} + 4I_{1b_1}I_{1b_3}) + L_\mu(-4I_{\mu a_1}I_{\mu a_3} + \\ & + 4I_{\mu b_1}I_{\mu b_3}) + L_2(-4I_{2a_1}I_{2a_3} + 4I_{2b_1}I_{2b_3})] + \\ & + R_1(2I_{1a_1}I_{1b_3} + 2I_{1b_1}I_{1a_3}) + R_\mu(2I_{\mu a_1}I_{\mu b_3} + 2I_{\mu b_1}I_{\mu a_3}) + \\ & + R_2'(2I_{2a_1}I_{2b_3} + 2I_{2b_1}I_{2a_3}) = U_{1_1}I_{1b_3} + U_{1_3}I_{1b_1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Omega [L_1(6I_{1a_3}I_{1b_3}) + L_\mu(6I_{\mu a_3}I_{\mu b_3}) + \\ & + L_2(6I_{2a_3}I_{2b_3})] + R_1((I_{1a_3})^2 - (I_{1b_3})^2) + \\ & + R_2'((I_{2a_3})^2 - (I_{2b_3})^2) = U_{1_3}I_{1a_3}; \\ & \Omega [L_1(-3(I_{1a_3})^2 + 3(I_{1b_3})^2) + L_\mu(-3(I_{\mu a_3})^2 + \\ & + 3(I_{\mu b_3})^2) + L_2(-3(I_{2a_3})^2 + 3(I_{2b_3})^2)] + \\ & + R_1(2I_{1a_3}I_{1b_3}) + R_2'(2I_{2a_3}I_{2b_3}) = U_{1_3}I_{1b_3}; \\ & I_{2a_1} + I_{\mu a_1} = I_{1a_1}; \quad I_{2b_1} + I_{\mu b_1} = I_{1b_1}; \\ & I_{2a_3} + I_{\mu a_3} = I_{1a_3}; \quad I_{2b_3} + I_{\mu b_3} = I_{1b_3}. \end{aligned}$$

Таблица 6 – Количество искусственных источников и количество идентификационных уравнений

Кол-во искусственных источников	Суммарное кол-во источников	Анализируемые гармоники напряжения и тока	Количество неизвестных	Количество уравнений
0	1	1	6	3
1	2	1,3	10	10
2	3	1,3,5	14	21
3	4	1,3,5,7	18	40
...	...	...	...	...
m-1	m	1,3,5,...	4m+2	

Для подтверждения работоспособности энергетического метода при идентификации ЭМП АД при питании от источника синусоидального напряжения используем следующие данные:

– АД серии 4АП100L4 с паспортными данными  $P_i=4$  кВт,  $U_i=380$  В,  $I_{i1}=8,7$  А,  $2p=4$ ,  $\omega_i=148,6$  с<sup>-1</sup>,  $\cos \phi=0,84$ ,  $\eta=0,84$ ;

– параметры схемы замещения  $R_1=1,35$  Ом,  $R_2'=1,38$  Ом,  $X_1=2,123$  Ом,  $X_2'=2,129$ ,  $X_\mu=77,244$  Ом;

– напряжение питания  $U=5,6$  В;

– частота питания  $\Omega = 314$  с<sup>-1</sup>;

– напряжение дополнительного источника  $U_d=4,3$  В;

– частота дополнительного источника  $\Omega_d = 942$  с<sup>-1</sup>.

Ошибки идентификации ЭМП приведены в табл. 7. Анализ результатов, приведенных в табл. 7, показал, что погрешность идентификации ЭМП АД при использовании псевдоисточников не превышает 4%.

Таблица 7 – Погрешности идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей

$\Delta R_2$ , %	$\Delta X_1$ , %	$\Delta X_\mu$ , %	$\Delta X_2$ , %
0,471	2,058	3,626	2,625

**ВЫВОДЫ.** На основании полученных в работе результатов можно сформулировать следующие выводы:

– энергетический метод идентификации параметров электротехнических устройств и систем, предложенный автором как ответвление современной теории энергопроцессов, бурно развивающейся в последние десятилетия, базируется на использовании уравнений энергетического баланса мощности потребителя и источника в форме гармонических составляющих, представленных в форме постоянной и квадратурных знакопеременных компонент мгновенной мощности, причем упомянутые компоненты являются базисом для системы идентификационных уравнений;

– решение идентификационных задач, как показали исследования, возможно в трех вариантах использования энергетического метода: с использованием формируемых и измеряемых полигармонических сигналов тока и напряжения; псевдополигармонических сигналов контролируемых величин, получаемых за счет получаемых искусственных спектров напряжения и тока при разложении реальных сигналов на части периода напряжения сети; с использованием дополнительно вводимых искусственных источников напряжения с целью получения требуемого числа уравнений в идентификационной системе уравнений;

– проведенный анализ позволил сделать вывод, что при использовании энергетического метода в

сочетании с изложенным подходом определяются параметры схем с необходимой точностью при питании от сети синусоидального напряжения;

– повышение эффективности использования энергетического метода для определения параметров схем замещения с некорректно заданными условиями достигается за счет введения дополнительных искусственных спектров гармоник напряжения и тока с различными периодами, формированием и решением идентификационной системы уравнений;

– при использовании искусственных спектров гармоник напряжения и тока погрешность идентификации параметров значительно ниже, чем в случае использования традиционных методов, и в приведенных примерах не превышает 4 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мгновенные и средние активные и реактивные мощности в линейных цепях с синусоидальными напряжениями / Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – № 43. – С. 153–160.
2. Баланс энергий в силовых цепях / В.Е. Тонкаль, А.Е. Новосельцев, С.П. Денисюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с.
3. Electrical power systems quality / R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, H.W. Beaty // McGraw-Hill, 1996. – 265 p.
4. Электрические цепи с вентильными коммутаторами / К.А. Шидловский, В.С. Федий. – К.: Артпринт, 2010. – 269 с.
5. Система составляющих полной мощности и энергетических коэффициентов на основе р-q-г теории мощности / Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов, Д.В. Тугай // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електроніки». – 2004, част. 1. – С. 69–74.
6. Spectral analysis of instantaneous powers in single-phase and three-phase systems with use of p-q-r theory / K. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak Jensen // IEEE Trans. on Power Electronics, 2002. – Vol. 17, № 5. – PP. 711–720.
7. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83. – Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983. – PP. 1375–1386.
8. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – New York: Wiley, 2007. – 380 p.
9. Направления развития теории мгновенной мощности и ее применение в задачах электромеханики / М.В. Загирняк, Д.И. Родькин, А.П. Черный // Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Одеса, 2011. – С. 347–354.
10. Декомпозиция составляющих мощности полигармонических сигналов / Д.И. Родькин // Электротехника. – 2003. – № 6. – С. 34–37.
11. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническим напряжением и током / Д.И. Родькин, А.В. Бялобржеский, А.И. Ломонос // Электротехника. – 2004. – № 6. – С. 37–42.
12. Новая система показателей качества использования электрической энергии / Д.И. Родькин // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 3. – С. 20–26.
13. Энергетический метод идентификации электромеханических устройств и систем / Д.И. Родькин, Ю.В. Ромашихин // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – Минск, 2011. – Вып. 3. – С. 10–20.
14. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах / Д.И. Родькин, Ю.В. Ромашихин // XIV Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика»: 36. наук. пр. – Дніпродзержинськ: ДГТУ, 2007. – С. 507–512.
15. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов / Д.И. Родькин // Вісник КДПУ. – Вип. 3/2007 (44), част. 1. – Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 66–77.
16. О несоответствии некоторых положений теории энергопроцессов теореме Телледжена / Д.И. Родькин // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 71–79.
17. Корекція електричних сигналів силових кіл електроприводів у комп'ютеризованих системах моніторингу: Монографія / В.М. Сидоренко, О.П. Чорний, Д.Й. Родькін, Ю.Г. Осадчук. – Кременчук, 2011. – 228 с.
18. О необходимости разделения понятий качества потребления и преобразования энергии / Д.И. Родькин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2 (19), част. 1. – С. 143–148.

#### THE POSSIBILITY SOLUTIONS ONE CLASS ILL-POSED ELECTROTECHNICAL PROBLEMS WITH ENERGY METHOD

##### D. Rodkin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Energy processes are not the main to the electrical circuit analysis, which can be explained by insufficient using of integrated methods. Despite their simplicity and clarity they lead to the loss of information about the energy process. On the other hand, there are many important problems for practical purposes with incorrectly posed conditions for which there is no acceptable solution methods. To analyze these processes can be used energy method proposed by the author. The aim is identifying opportunities for energy identification method to estimate the parameters of electrical circuits in incorrectly set conditions. The method is based on the analysis of time dependences of voltage, current, and their products i.e. instantaneous power. Energy method is developed on this basis. Feature of the method is that the energy mode

in particular electromechanical system can be expressed in the form of balance equations of instantaneous power components for the source and the consumer. Typically, in this case analyzes the non-sinusoidal voltages and currents. Enhanced capabilities of the energy method possible when the power circuit is a sinusoidal voltage source. To ensure the application the energy method is implemented power mode follow circuit from the source with the necessary harmonic structure. For this purpose introduces additional synthetically produced spectra of the current and voltage harmonics with a period different from the period of the mains voltage. Efficiency of use the energy method for identification of parameters of the circuit that contains series connection of resistance, inductance and capacitance has been shown. Harmonic components of the instantaneous power on the specified elements for the formation of identity equations have been obtained. The error of parameter identification circuit when administered artificial spectra of voltage and current harmonics with different periods using the energy method does not exceed 5 %. Similar results are obtained for parameter identification of induction motors for T-equivalent circuit. The error parameter identification is less than 4 %. Thus, the work confirms the efficiency of using the energy method for parameter identification of electric circuits with incorrectly posed conditions.

**Key words:** energy method, instantaneous power, the identification parameters.

#### REFERENCES

- Zhemerov, G.G. and Tugay, D.V. (2004), "Instantaneous and average active and reactive power in linear circuits with sinusoidal voltages", *Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika, NTU "KhPI"*, Vol. 43, pp. 153–160. (in Russian)
- Tonkal, V.E., Novoseltsev, A.E. and Denusyuk, S.P. (1992), *Balans energii v silovykh tsepyakh* [The energy balance in power circuits], Naukova dumka, Kiev, Ukraine. (in Russian)
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. and Beaty, H.W. (1996), *Electrical power systems quality*, McGraw-Hill.
- Shidlovskiy, K.A. and Fediy, V.S. (2010), *Elektricheskie tsepi s ventilnymi kommutatorami* [Electrical circuit with the valve switches], Artpoint, Kiev, Ukraine. (in Russian)
- Zhemerov, G.G., Krilov, D.S. and Tugay, D.V. (2004), "System of the total power components and factors energy conversion derived of power pqr theory", *Tekhnichna elektrodinamika, tematychniy vypusk. Problemy sychasnoi elektroniky*, no. 1, pp. 69–74. (in Russian)
- Kim, K., Blaabjerg, F. and Bak Jensen, B. (2002), Spectral analysis of instantaneous powers in single-phase and three-phase systems with use of p-q-r theory, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 17, no. 5, pp. 711–720.
- Akagi, H., Kanazava, Y. and Nabae, A. (1983), Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits, *IPEC'83, Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan, pp. 1375–1386.
- Akagi, H., Watanabe, E.H. and Aredes, M. (2007) *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley, New York, USA.
- Zagirnyak, M.V., Rodkin, D.Y. and Cherniy, A.P. (2011), "Direction of development of the instantaneous power theory and its application to problems in electrical engineering", *Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika, Odessa*, pp. 347–354. (in Russian)
- Rodkin, D.Y. (2003), "Decomposition of the power components polyharmonic signals", *Journal of Electrotechnology*, Vol. 6, pp. 34–37. (in Russian)
- Rodkin, D.Y., Byalobrzhesky, A.V. and Lomonos, A.I. (2004), "Indicators of energy process in circuit with polyharmonic voltage and current", *Journal of Electrotechnology*, Vol. 6, pp. 37–41. (in Russian)
- Rodkin, D.Y. (2004), "The new indicators system of quality using electricity", *Naukovyy visnyk NGU*, Vol. 3, pp. 20–26. (in Russian)
- Rodkin, D.Y. and Romashyhin, Yu.V. (2011), "The energy method for identification of electromechanical devices and systems", *Izvestiya vysshikh uchebnikh zavedeniy I energeticheskikh obedneniy SNG, Energetika*, Minsk, Vol. 3, pp. 10–20. (in Russian)
- Rodkin, D.Y. and Romashyhin, Yu.V. (2007), "The scope and efficiency of the energy diagnostics method for identification tasks", *Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika, Dniprodzerzhynsk*, pp. 507–512. (in Russian)
- Rodkin, D.Y. (2007), "Balance of components of the instantaneous power of polyharmonic signals", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 3, no. 44, pp. 66–77. (in Russian)
- Rodkin, D.Y. (2010), "On the inconsistency of some theory of the energy processes with Telledzhen's theorem", *Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika, NTU "KhPI"*, Vol. 28, pp. 127–135. (in Russian)
- Sydorenko, V.M., Chorniy, A.P., Rodkin, D.Y. and Osadchuk, Yu.G. (2011), "Korektsiya elektrychnykh sygnaliv sylovykh kil elektroprivodiv u kompyuteryzovanykh systemakh monitoryngu" [Correction electrical signals into electric power circuits in computerized monitoring systems], monograph, Kremenchuk, Ukraine. (in Ukrainian)
- Rodkin, D.Y. (2003), "The need to separate the concepts of quality and consumption of energy conversion", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 2, no. 19, pp. 143–148. (in Russian)

Стаття надійшла 2.03.2013.