
К ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛОЖЕНИЙ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ

Событие недавнего прошлого – создание полупроводниковых силовых приборов, обладающих свойствами полного запираания и высокого быстродействия, в свое время прошло мало замеченным, но оказало поистине революционное влияние на все отрасли электротехнической промышленности. Это воздействие ощущается до настоящего времени. Этот феномен заключается, прежде всего, в возможностях управления потоками электрической энергии для реализации систем управления электромеханическими преобразователями энергии, создания статических преобразователей частоты с уникальными возможностями по эффективности. По существу отмеченный факт является одним из фундаментальных вопросов начавшейся энергетической стороны разворачивающейся научно-технической революции [1, 2].

Реализация разработок, касающихся создания многофункциональных устройств и систем управления и преобразования параметров электрической энергии вскрыла другую сторону проблемы – отсутствие теоретических разработок, на основе которых могли бы быть построены перспективные системы преобразования параметров электроэнергии. Осознание этого позволило ученым сосредоточить усилия в направлениях исследования энергопроцессов во временной области – создание теоретических основ мгновенной мощности. Начало этих исследований относится к концу восьмидесятых – началу девяностых, т.е. ко времени начала массового освоения и использования в промышленности широкого спектра инверторных преобразователей частоты. Результаты теоретических исследований хорошо известны и связаны с созданием нескольких теорий энергопроцессов. Отметим, что теории энергопроцессов, упомянутые выше, – это теории векторного управления энергетическими режимами, нашедшие свою сферу применения в задачах управления электрическими машинами переменного тока [3, 4].

Следует отметить важное обстоятельство, характерное тем, что вопросам теоретических обобщений, касающихся аспектов мгновенной мощности, в последние 20-25 лет уделено огромное внимание в Европейских странах, в Украине, России. В Украине в указанных направлениях достаточно плодотворно работал и работает проф. Жемеров Г.Г. со своей школой. Их усилия в основном сосредоточены в направлении создания оборудования для электроприводов большой мощности с улучшенными показателями за счет использования компенсирующих возможностей дополнительно вводимых модулей со свойствами генерирования реактивной мощности, компенсации высших гармонических путем генерирования «антигармоник» – гармонических обратной полярности [5, 6].

Определенное, значащее место в развитии теории мгновенной мощности займут, по всей вероятности работы [7, 8], опубликованные сравнительно недавно. Наряду с вкладом в развитие теории мгновенной мощности, в статьях выполнен анализ подходов к теоретическим вопросам в зависимости от выбранной системы координат векторной системы, что представляется важным по целому ряду причин. Одна из них – поиск наиболее удобного представления математического аппарата в зависимости от конкретной решаемой задачи.

Независимо от исследований данного класса, т.е. затрагивающих вопросы описания процессов с целью создания систем управления энергетическими режимами, развились работы иного класса, причем в нашей стране: работы затрагивающие проблемы частотных преобразований сигналов мощности преимущественно в однофазных цепях. Характерно при этом, что в работах [9–11] поставлен вопрос об однозначности математического описания процессов энергетического характера в других, отличных от электрических цепей средах. Это позволяет, несомненно, с единых позиций рассматривать энергетические процессы в комплексах, включающих преобразовательные устройства, передаточные механизмы, технологические машины, т.е. в цепях преобразования энергии электромеханических и иных комплексов. В основе этих исследований находятся уравнения энергетического равновесия гармонических составляющих мгновенной мощности [12].

Основной принцип, на котором базируются все известные на практике методы идентификации, заключается в следующем: тем или иным путем необходимо создать условия при которых «проявляют» себя элементы, входящие в схему замещения. Разнообразие методов идентификации в основном вызвано многообразием схем замещений, обеспечивающих упомянутое заранее «проявление» реактивных элементов. Достаточно просто известные методы можно разбить на следующие:

– методы, базирующиеся на разночастотном питании схемы, при котором получают совокупность значений напряжений, токов для разных частот питания, получаемого от источника переменного напряжения регулируемой частоты [12];

– метод, базирующийся на подаче полигармонического напряжения на идентифицируемое устройство, в результате чего получают напряжение и ток, содержащие соответствующие спектры составляющих. Эти составляющие в дальнейшем являются исходным материалом для решения конкретной идентификационной задачи. Здесь, как и в предыдущем случае, требуется специальный источник питания с известным спектром выходного напряжения или регулируемым в зависимости от ставящихся задач;

– метод, базирующийся на анализе характеристик, получаемых путем подключения анализируемой схемы к источнику гармонического или постоянного напряжения. Для анализа получают временные зависимости переходного режима – кривые переходного процесса. Дальнейшая обработка сигналов позволяет получить систему идентификационных уравнений для решения поставленной задачи.

Первые из двух методов относятся к разряду частотных в виду зависимости сопротивлений от частоты воздействия: в первом – путем задания ряда частот питающего напряжения последовательно друг за другом, во втором задающий сигнал содержит компоненты с разными частотами. Как будет показано ниже, частотный метод или вернее подход, не исчерпал своих возможностей по ряду причин и нуждается прежде всего обобщения и анализа.

Формально первый и второй случаи эквивалентны так как из совокупности гармонических U_n и I_m тока могут быть выбраны гармоники для которых $m=n$ и с ними можно выполнять все операции, что и в первом случае.

Несмотря на большое количество работ, посвященных теории энергопроцессов, не заметно существенную разницу в математической интерпретации в известных подходах и более поздних с использованием элементов теории мгновенной мощности, отсутствуют работы, затрагивающие проблематику построения измерительных устройств, оценки показателей энергопроцессов, учитывающих особенности физических процессов. Анализ показывает, что оценивание процессов преобразования энергии с использованием теории мгновенной мощности, как теоретической базы для получения показателей качества энергопреобразований, требует специального подхода для получения комплекса оценок, отличных, естественно, от существующих. Окончательные результаты могут иметь свои особенности, которые вызовут иную трактовку расчетных механизмов за пользование электроэнергией.

Опыт и эксперимент показывают, что в основе механизма формирования мгновенной мощности полигармонических сигналов находятся сложные частотные преобразования – взаимодействие напряжений и токов равных или разных частот. В основе этих преобразований лежат известные тригонометрические зависимости, показывающие, что в результате этих процессов образуется компонента мгновенная мощность, которая в свою очередь состоит из составляющих разных частот: постоянной составляющей (или гармоники нулевой частоты), знакопеременных составляющих определенных частот, которые просто представить в форме ортогональных составляющих – косинусных и синусных [14–17].

Анализ, выполненный в [12], показал, что общая форма записи выражений для мгновенной мощности одна и та же независимо от вида элемента, так как включает три составляющих, принимающих соответствующие значения в зависимости от перемноженных функциональных зависимостей:

$$P(t) = \sum_{i=1}^{i=\tau} P_{k0i} + \sum_{i=1}^{i=\tau} P_{kai}(t) + \sum_{i=1}^{i=\tau} P_{kbi}(t), \quad (1)$$

где i – номер или имя элемента, на котором определяется мощность; P_{k0i} – постоянная составляющая мощности (активная составляющая) на i -том элементе, образованная произведением компонент с $m = n$ для $k = 2m = 2n$; $P_{kai}(t)$ – косинусная составляющая мгновенной мощности k -го порядка, полученная в ходе частотных преобразований для $k = 2m = 2n$ при $m = n$, а также $k = n + m$ и $k = n - m$ для $m \neq n$. При этом косинусные составляющие мгновенной мощности получаются только в результате перемножения одноименных (косинусных или синусных) компонент; $P_{kbi}(t)$ – синусная составляющая мгновенной мощности k -го порядка, i -того элемента, полученная в ходе частотных преобразований для $k = 2m = 2n = m + n$ при $m = n$, а также $k = n + m$ и $k = n - m$ для $m \neq n$. При этом синусные составляющие мгновенной мощности получаются только в результате перемножения разноименных (косинусных или синусных) компонент. Детально эти вопросы рассмотрены в.

Полученные подобным образом зависимости мгновенной мощности источника и i элементов, как указывалось ранее, отвечают теореме Теллеждена и, что особенно важно, позволяют трактовать ее более расширенно, учитывая то, что это базисная теорема во всех аспектах отвечает фундаментальному закону природы – закону сохранения [14].

Расширительность толкования теоремы в существовании:

равенства активной мощности источника сумме активных мощностей i элементов схемы замещения – $P_{0u} = \sum_{i=1}^{i=\tau} P_{0i}$ [12]; равенства активной мощности того или иного элемента (включая источник системы источник-потребитель) сумме активных мощностей гармоник мгновенной мощности – $P_{0i} = \sum_{i=1}^{i=\tau} P_{k0i}$; совокупности равенств каждой из косинусных составляющих мгновенной мощности источника сумме косинусных составляющих (одного порядка) i элементов потребителя – $P_{ka_u} = \sum_{i=1}^{i=\tau} P_{kai}$; совокупности равенств каждой из синусных составляющих мгновенной мощности источника сумме синусных составляющих (одного порядка) i элементов потребителя – $P_{kb_u} = \sum_{i=1}^{i=\tau} P_{kbi}$.

Указанные два последних положения, несомненно, имеют такую же фундаментальность, как и составляющие равенства для активной мощности – прямого следствия для закона сохранения.

При анализе энергопроцессов следует учитывать, что $U(t)$ и $I(t)$ – физические величины, а энергия, как физическая величина, определяется интегралом произведения указанных выше двух компонент, т.е. путем опре-

деленной математической и технической операции. При исследовании энергопроцессов в руках исследователя оказываются три параметра: напряжение, ток, мощность; их анализ позволит получить комплекс показателей как напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$, так и их произведения – мощности $P(t)$. Показатели, характеризующие указанные три параметра достаточно разнообразны, получаются с помощью определенных математических операций (гармонический состав, эффективные и средние значения и т.п.) и образуют множества, характеризующие энергетический процесс каждый в определенной мере в отдельности, а также с позиций общих общепринятых позиций, вытекающих из затронутых выше множеств. С учетом сказанного получим выражения для множеств:

$$\begin{aligned} U(t) &\Rightarrow \{U_0, U_1 \dots U_n; U_{\Sigma}; k_u\} = M_u \\ I(t) &\Rightarrow \{I_0, I_1 \dots I_m; I_{\Sigma}; k_i\} = M_i \quad ; \\ P(t) = U(t)I(t) &\Rightarrow \{P_0, P_1 \dots P_k; P_{\Sigma}; k_p\} = M_p \end{aligned} \quad (2)$$

где M_u, M_i, M_p – множества показателей параметров напряжения, тока, мощности; $U_0, U_1, \dots U_n$ – гармонические составляющие напряжения; U_{Σ}, k_u – эффективное значение напряжения и коэффициент искажения. Соответствующие показатели имеют место для тока и мощности. Напряжение, ток и мощность в той или иной мере характеризуют энергетический режим, совокупность же показателей, характерных для напряжения, тока и мощности, т.е. множества $\{M_u\}, \{M_i\}, \{M_p\}$ характеризуют его в полной мере.

Из сказанного следует весьма важное заключение: энергопроцесс не может, например, быть охарактеризован только множествами $\{M_u\}$ и $\{M_i\}$ в равной степени как и $\{M_p\}$ не позволяют дать полную характеристику элементов энергопроцесса, т.е. $\{M_u\}$ и $\{M_i\}$.

Зависимости $U(t)$ и $I(t)$ при анализе представляются рядами $U(t) = \sum_{n=0}^{n=N} U_n(t)$ и $I(t) = \sum_{m=0}^{m=M} I_m(t)$, образующими множества M_u и M_i соответственно одной и второй физической величин. Эти множества, в соответствии с известными положениями, имеют свои показатели (оценки): среднее значение за период U_0 и I_0 , средние по модулю U_{m0} и I_{m0} , эффективные значения U_{Σ} и I_{Σ} , т.д., причем каждая из оценок, определяемая известными методами, в отличие от компонент, образующих соответствующие множества, является не векторной, а скалярной величиной. Таким образом, произведения U_0 и I_0, U_{Σ} и I_{Σ} образуют не что иное, а произведение средних или эффективных значений оценок соответствующих множеств. Как известно, одно из произведений образует постоянную составляющую мощности, а второе – так называемую полную мощность, что, однако, не совсем соответствует процессам преобразования энергии в случае полигармонических сигналов напряжения и тока. Здесь достаточно отметить, что активная мощность определяется суммой мощностей, вызванных как нулевыми составляющими напряжения и тока, так и активной мощностью высших гармоник, а полная мощность, равная произведению U_{Σ} и I_{Σ} , вообще никакой физической интерпретации не имеет.

Сказанное имеет принципиальное значение в том отношении, что получение каких-то показателей из оценок соответствующих множеств напряжения и тока не имеет какого бы то ни было отношения к проблеме показателей энергопреобразования, т.е. мощности. Мощность $P(t) = U(t)I(t)$, образованная произведением компонент $U(t) = \sum_{n=0}^{n=N} U_n(t)$ и $I(t) = \sum_{m=0}^{m=M} I_m(t)$, представляется новым множеством M_p – полным произведением компонент $U(t)$ и $I(t)$. Нужно различать оценки M_u, M_i от оценок M_p : первые являются оценками тока и напряжения, а оценки мощности являются оценками множества, образованного произведениями $U(t)$ и $I(t)$. Оценки M_u, M_i – объективные критерии соответствующих физических величин – не более того, и с этой позиции представляют интерес для исследователя. Оценки или показатели энергопроцессов могут быть получены только путем определения соответствующих показателей множества M_p . Между показателями M_u, M_i, M_p имеется некоторая, но не всегда очевидная связь, и это требует четкого разделения понятий, на которых образуются математические принципы получения оценок.

Это положение со всей очевидностью вызывает необходимость выполнения операции анализа тех подходов, которые существуют в настоящее время в практике измерения несинусоидальных сигналов. Если эта задача является для измерения напряжения и тока хорошо известной и по существу – тривиальной, то при измерении и оценивании показателей мощности возможны два принципиально отличающихся друг от друга подхода.

В первом случае измеряется ток и напряжение, определяются их составляющие и показатели каждого из сигналов. Сигнал мгновенной мощности определяется как произведение рядов, описывающих зависимости тока и напряжения $P(t) = \sum_{n=0}^{n=N} U_n(t) \cdot \sum_{m=0}^{m=M} I_m(t)$.

При этом мощность $P(t)$ имеет вид

$$P(t) = \sum_{k=0}^{k=N+M} P_{0k} + \sum_{k=1}^{k=N+M} P_{ka}(t) + \sum_{k=1}^{k=N+M} P_{kb}(t), \quad (3)$$

где P_{0k} – активная мощность; P_{ka} – косинусные составляющие мощности; P_{kb} – синусные составляющие мощности гармоник.

Опустим в составляющих мощности $P(t)$ индекс t , характеризующий функцию времени, полагая, что индекс «а» означает косинусную функцию, а «b» – синусную. Зависимость (3) преобразуем, учитывая то, что косинусные и синусные составляющие образуются в произведениях как одночастотных, так и разночастотных компонент:

$$P(t) = \sum_{k=0}^{k=N=M} P_{0k} + \sum_{k=1}^{k=N=M} P_{kac} + \sum_{k=1}^{k=N+M} P_{kas} + \sum_{k=1}^{k=N=M} P_{kbc} + \sum_{k=1}^{k=N+M} P_{kbs}. \quad (4)$$

Здесь, как видим, измеряется напряжение и ток, определяются их составляющие (гармонический состав) и показатели каждого из сигналов.

Во втором случае сигнал мощности $P(t)$ определяется путем прямого измерения зависимости $P(t)$ или путем умножения сигналов напряжения и тока.

При этом амплитуды постоянной и косинусных составляющих мощности будут:

$$P_{0\Sigma} = \sum_{m=n=0}^{m=N=M} P_{0k} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T P(t)dt;$$

$$P_{kac} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) \cos(k\Omega t)dt; \quad P_{kas} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) \cos(k\Omega t)dt. \quad (5)$$

Амплитуды неканонических составляющих гармоник мощности

$$P_{kbc} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) \sin(k\Omega t)dt; \quad P_{kbs} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) \sin(k\Omega t)dt. \quad (6)$$

В связи с тем, что гармоники мощности образуются путем умножения гармонических функций, то частоты гармоник мощности будут $k = m \pm n$. Из этого следует, что упомянутые частоты будут:

$k = 0$ и $k = 2m = 2n$ (при $m = n$) – так называемые, канонические гармоники мощности (индекс гармоник – c);

$k \neq 0, k = m \pm n$ – неканонические гармоники мощности (индекс гармоник – s).

Аналогичные составляющие мощности получаются при умножении составляющих напряжения и тока, представленных в форме рядов Фурье.

Уравнение (3) существенно отличается от аналогичного, составленного из компонент (5) и (6). В первом составляющие определяются произведением конкретных гармоник напряжения и тока, в то время как другой вариант уравнения баланса получается путем интегрирования зависимости $P(t)$, т.е. физической величины. При этом в результате интегрирования для получения P_{kac} в конечный результат войдет и какая то компонента P_{kas} в случае, если частоты этих составляющих одинаковы.

В соответствии со сказанным уравнение (4) можно представить так:

$$P(t) = \sum_{k=0}^{k=N=M} P_{0k} + \sum_{k=1}^{k=N=M} (P_{kac} + P'_{kas}) + \sum_{k=1}^{k=N+M} (P_{kbc} + P'_{kbs}) + \sum_{k=1}^{k=N+M} P_{kaq}(s) + \sum_{k=1}^{k=N=M} P_{kbs}(s). \quad (7)$$

При этом $P_{kas} = P'_{kas} + P_{kaq}(s)$; $P_{kbs} = P'_{kbs} + P_{kbs}(s)$.

Важность этого вывода в том, что, например, составляющая P_{kas1} , полученная путем измерения $P(t)$ и последующего интегрирования, так же и составляющая P_{kas2} , полученная путем перемножения соответствующих гармоник напряжения и тока, не равны друг другу, причем $P_{kas1} > P_{kas2}$ и $P_{kus1} > P_{kus2}$. Отмеченное явление представляется тем «мешающим» фактором, который в конечном итоге во много определяет влияние несинусоидальных напряжений и тока на режим и показатели энергопотребления.

Обозначим $P_{kac} + P'_{kas} = P_{ka\Sigma}$; $P_{kbc} + P'_{kbs} = P_{kb\Sigma}$. Тогда окончательно выражения $P(t)$ и P_{Σ} будут:

$$P(t) = \sum_{k=0}^{k=N=M} P_{0k} + \sum_{k=1}^{k=N=M} P_{ka\Sigma} + \sum_{k=1}^{k=N=M} P_{kb\Sigma} + \sum_{k=1}^{k=N+M} P_{kaq}(s) + \sum_{k=1}^{k=N=M} P_{kbs}(s); \quad P_{0\Sigma} = \sum_{k=0}^{k=N=M} P_{0k};$$

$$P_{\Sigma} = \sqrt{\left(\sum_{k=0}^{k=N=M} P_{0k} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^{k=N=M} (P_{ka\Sigma})^2 + \sum_{k=1}^{k=N=M} (P_{kb\Sigma})^2 \right) + \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^{k=N+M} (P_{kaq}(s))^2 + \sum_{k=1}^{k=N=M} (P_{kbs}(s))^2 \right)}. \quad (8)$$

Все приведенные в выражениях компоненты являются составляющими, определяющими совокупность показателей энергопроцесса.

Значительное внимание исследователей уделено вопросу оценки влияния несинусоидальных напряжений и токов на энергетические показатели различных элементов систем электроснабжения и потребителей – электрических машин, трансформаторов и др. Анализ этого вопроса показывает, что полученные результаты, в основном, касаются тех последствий, которые сопутствуют несинусоидальности напряжения и тока [18]. Эти последствия, как правило, связаны со снижением срока службы изоляции, увеличением потерь и т.п. Энергетическая сторона вопроса – влияние несинусоидальности на параметры энергопроцесса – по существу, осталось в стороне, в связи с тем, что мощность искажения, как показано выше, является косвенным, необоснованным параметром, характеризующим энергопроцесс. Оценку влияния гармонических мощности на процесс, как отмечено, можно оценить только по составляющим мгновенной мощности и ее оценок.

Как указывалось, две из упомянутых оценок очевидны – это среднее значение мгновенной мощности $P_{0\Sigma}$ и ее эффективное, т.е. среднеквадратичное значение P_{Σ} , которое в силу своей значимости и адекватности исходных предпосылок, должно браться в качестве базовой величины. Таким образом, показатели энергопроцессов

будут представлять отношение показателя, вытекающего из (8) к эффективному значению мгновенной мощности. Это объясняется тем, что анализируемый подход учитывает процессы частотных преобразований не в каком-то комплексе, а с учетом каждой из компонент, образующих мгновенную мощность $P(t)$. При этом учитываются и достаточно интересные явления, связанные с появлением гармоник, образованными разночастотными компонентами и имеющими частоты канонических гармоник мощности. Это существенно усложняет картину частотных преобразований в целом и требует внимания к анализу этого явления.

Выводы. Сложившиеся подходы анализа энергопроцессов, базирующиеся на понятии полной мощности не достаточно объективно оценивают характер и особенности энергопреобразования в цепях с несинусоидальными напряжениями и токами. В этой связи очевидна актуальность исследований в данном направлении.

Показатели энергопроцессов, включающие оценку параметров сигналов компонент мощности (напряжения и тока), должны дополняться оценками мощности, получаемыми из произведения компонент $U(t)$ и $I(t)$.

Базовым параметром, характеризующим энергопроцесс, представляется эффективное значение мгновенной мощности и ее компоненты – активной (постоянное значение мгновенной мощности), комплекс синусных и косинусных составляющих разной частоты, образованными посредством перемножения составляющих напряжения на ток. Показатели энергопреобразования при этом получаются математическими соотношениями конкретных компонент мгновенной мощности к базовой.

Изучение механизма частотных энергопреобразований позволяет выделить канонические составляющие (как результат произведения одночастотных компонент напряжения и тока) и неканонические (результат произведения разночастотных составляющих) и выявить особенность этих процессов в форме равенств частот составляющих канонического и неканонического порядка. Упомянутая особенность приводит преимущественно к увеличению переменных составляющих мощности канонического порядка, что эквивалентно снижению составляющих мощности при его конкретном эффективном значении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Черный А.П., Коренькова Т.В. Направления развития теории мгновенной мощности и ее применение в задачах электромеханики // Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Одеса, 2011. – С. 347–354.
2. Родькин Д.И. Актуальные вопросы теории и практики энергоресурсосберегающих электромеханических систем // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – Вип. 3/2008(50). – Ч. 1. – С. 8–17.
3. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning – New York: Wiley, 2007. – 380 p.
4. Kim K., Blaabjerg F., Bak B. Jensen Spectral analysis of instantaneous powers in single-phase and three-phase systems with use of p-q-r theory // IEEE Trans. on Power Electronics, 2002. – Vol. 17, No. 5 – pp. 711–720.
5. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Тугай Д.В. Система составляющих полной мощности и энергетических коэффициентов на основе p-q-r теории мощности // Технічна електродинаміка, тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2004. – Ч. 1. – С. 69–74.
6. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Мгновенные и средние активные и реактивные мощности в линейных цепях с синусоидальными напряжениями // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – №43. – С. 153–160.
7. Полищук С. И., Артеменко М. Ю., Михальский В. М. Аналитическое построение координатных систем в теории мгновенной мощности трехфазных цепей для управления устройствами активной фильтрации // Техническая электродинамика. – 2013. – № 2. – С. 25–36.
8. Винничук С. Д. Обоснование теории мощности системы периодических многофазных токов // Электронное моделирование. – Киев: ИПМЭ НАН Украины, 2012. – Т. 34. – № 2. – С. 23–37.
9. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами. Часть 2. Определение и использование показателей энергетических режимов // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 106–115.
10. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Коренькова Т.В. Анализ процессов преобразования энергии в электромеханическом комплексе // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Кременчук, 2012. – Вип. 3/2012 (19) – С. 30–36.
11. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Коренькова Т.В. Оценка процессов энергопреобразования с использованием составляющих мгновенной мощности // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2013. – Вип. 1/2013 (21) – С. 8–21.
12. Родькин Д.И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов // Вісник КДПУ. – Кременчук: Кременчугський державний політехнічний університет, 2007. – Вип. 3/2007(44). – Ч. 1. – С. 66–77.
13. Родькин Д.И., Ромашин Ю.В. Энергетический метод идентификации электромеханических устройств и систем // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – Минск, 2011. – Вып. 3. – С. 10–20.
14. Родькин Д. И. О несоответствии некоторых положений теории энергопроцессов теореме Телледжена // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 28. – с. 71–79.
15. Родькин Д.И., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническими напряжениями и токами // Електротехніка. – 2004. – № 6. – С. 37–42.
16. Родькин Д. И., Коренькова Т.В. Энергетический метод анализа управляемости электромеханических систем // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 2/2010 (10) – С. 8–16.
17. Родькин Д.И. Декомпозиция составляющих мощности полигармонических сигналов // Електротехніка. – 2003. – № 6. – С. 34–37.
18. Родькин Д. И. О необходимости разделения понятий качества потребления и преобразования энергии // Вісник Кременчугського державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип.2(19). – С.143–148.