

УДК 621.314(075.8)

**МЕШАЮЩЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
С НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ И ТОКОМ
(К ТЕОРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМИ СИГНАЛАМИ)**

А. В. Бялобрзеский, А. В. Никитина, Д. И. Родькин, С. А. Сергиенко

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

Многие исследователи энергетических процессов в электрических сетях переменного тока указывают на необоснованность использования полной или кажущейся мощности в задачах оценки качества преобразования электрической энергии и влияния этого процесса на финансовую сторону энергопотребления. Только при синусоидальных сигналах использование этого понятия и оценка вполне приемлемы и платежи включают две компоненты, связанные с активной мощностью и мощностью, характеризующей обменные процессы в реактивных элементах. При полигармонических сигналах влияние разночастотных составляющих мощности, что сейчас мере оценивается как мощность искажения. При этом, однако, при существующих подходах упомянутая мощность определяется некорректно, без соблюдения закона сохранения, вследствие чего она не является той третьей компонентой, по которой могут определяться затраты в зависимости от показателей некачественного преобразования энергии. Обоснована целесообразность оценивания показателей некачественного влияния на энергетический процесс составляющих мощности, вызванных разными компонентами мгновенной мощности. Произведение одночастотных гармоник напряжения и тока образуют постоянную составляющую мощности, знакопеременные компоненты его (канонические) являются компонентами, искажающими или негативно влияющими на энергетический процесс. Псевдоканонические компоненты, суммируясь соответствующим образом с каноническими знакопеременными компонентами, являются дополнительным фактором, влияющим на энергетический процесс. Знакопеременные неканонические компоненты являются основным негативным фактором, влияющим на качество энергетического процесса. Составляющей мощности, относительно которой определяется качество энергетического процесса, является среднееквадратическое значение мгновенной мощности, включающей все компоненты: постоянную составляющую, суммы знакопеременных канонических и псевдоканонических гармоник мощности, а также неканонические знакопеременные гармоники мощности. Показатель качества энергопроцесса определяется как отношение постоянной составляющей к сумме квадратов перечисленных выше знакопеременных гармоник мгновенной мощности. Указанный подход позволяет однозначно формировать финансовую составляющую заинтересованности потребителей в вопросах улучшения качества преобразования энергии при ее потреблении.

Ключевые слова: энергетический процесс, энергетическое влияние, финансовые аспекты некачественности преобразования энергии.

**ЗАВАЖАЮЧИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ВПЛИВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ
З НЕСИНУСОІДАЛЬНОЮ НАПРУГОЮ Й СТРУМОМ
(ДО ТЕОРІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ З НЕСИНУСОІДАЛЬНИМИ СИГНАЛАМИ)**

О. В. Бялобрзеский, А. В. Нікітіна, Д. Й. Родькін, С. А. Сергієнко

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

Багато дослідників енергетичних процесів в електричних мережах змінного струму вказують на необґрунтованість використання повної удаваної потужності в задачах оцінки якості перетворення електричної енергії й впливу цього процесу на фінансову сторону енергоспоживання. Тільки при синусоїдальних сигналах використання цього поняття та оцінка є цілком прийнятними й платежі включають дві компоненти, пов'язані з активною потужністю та потужністю, що характеризує обмінні процеси в реактивних елементах. При полігармонічних сигналах значний вплив різночастотних складових потужності, що зараз оцінюється як потужність спотворення. Проте при цьому при існуючих підходах згадана потужність визначається некоректно, без дотримання закону збереження, внаслідок чого вона не є тією третьою компонентою, за якою можуть коригуватися витрати залежно від показників неякісного перетворення енергії. Обґрунтовано доцільність оцінювання показників неякісного впливу на енергетичний процес складових потужності, викликаних різними компонентами миттєвої потужності. Комбінації одночастотних гармонік напруги й струму утворюють постійну складову потужності, знаковмінні компоненти його є компонентами, які спотворюють або негативно впливають на енергетичний процес. Псевдоканонічні компоненти, підсумовуючись відповідним чином із канонічними знаковміними компонентами, є додатковим чинником, що впливає на енергетичний процес. Знаковмінні неканонічні компоненти є основним від'ємним чинником, що впливає на якість енергетичного процесу. Складовою потужності, відносно якої визначається якість енергетичного процесу, є середньоквадратичним значенням миттєвої потужності, що включає всі компоненти: постійну складову, суми знаковмінних канонічних і псевдоканонічних гармонік потужності, а також неканонічні знаковмінні гармоніки потужності. Показник якості енергопроцесу визначається як відношення постійної складової до суми квадратів перерахованих вище знаковмінних гармонік миттєвої потужності. Зазначений підхід дозволяє однозначно формувати фінансову складову зацікавленості споживачів у питаннях поліпшення якості перетворення енергії при її споживанні.

Ключові слова: енергетичний процес, енергетичний вплив, фінансові аспекти неякісності перетворення енергії.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время в стоимость электроэнергии включаются лишь отдельные компоненты, характеризующие энергетический процесс, – активная и обменная (реактивная) мощность. Нелинейные искажения и вызываемая ими мощность высших гармоник непосредственно в тарифах не учитывается, а на режим энергопотребления устанавливаются качественные и количественные нормы в форме предельно-допустимых показателей гармоник напряжения. Существующий подход не стимулирует потребителя к повышению качества преобразования энергии [1]. Это во многом объясняется существующим математическим аппаратом для оценки показателей энергетических процессов, не позволяющим учитывать все составляющие энергопроцесса. Возможность покомпонентного учета характеристик энергетических процессов любой сложности появляется при использовании теоретической базы мгновенной мощности [1–4].

Ценовой сектор рынка электрической энергии охватывает три субъекта хозяйственной деятельности – генерирующий, транспортирующий и распределяющий, потребляющий. Если не касаться стоимости электрической энергии в периоды ограничений (утренний и вечерний максимумы) и избытка мощностей (в ночное время), то действуют устанавливаемые правила одноставочного или двухставочного тарифов [5].

Практическая сторона экономических взаимоотношений при этом регламентируется стандартами, устанавливающими ограничения на качественные характеристики покупаемого продукта – электрической энергии.

Количественные показатели потребления оцениваются счетчиками электрической энергии, определяющими количество энергии, перешедшей через контрольный узел.

Несмотря на большое количество модификаций систем учета, просматривается тенденция повышения уровня их интеллектуализации, точности и расширения функциональных возможностей; однако в их математическую базу в основном закладываются те представления об энергетических процессах, которые сложились в 20–30-е годы прошлого столетия [6, 7].

Технический прогресс в области преобразования энергии, средств управления преобразовательными устройствами, приборостроения и, прежде всего, измерительной техники способствовал созданию хорошей базы для совершенствования систем учета потребляемой энергии.

В восьмидесятые годы по указанным выше причинам начала усиленно и успешно развиваться теория энергопроцессов, базирующаяся на математическом аппарате мгновенной мощности. Основные положения указанного направления сформулированы в работах [4, 8]. При этом достигнуты были достаточно весомые результаты как теоретического, так и прикладного характера. Несмотря на интенсивные исследования в таких направлениях, как создание теории мгновенной мощности и целой гаммы устройств, реализующих ее возможности: управления энергетическими режимами, идентификации пара-

метров электрооборудования по характеристикам энергетических режимов и т.д., – существенного внимания использованию теории мгновенной мощности в задачах учета электрической энергии до настоящего времени не уделялось [7].

Правилом, представляющим направление развития и совершенствования систем учета, должна быть вполне очевидная необходимость учета всех составляющих мощности – параметров энергетического режима [4, 7].

При определении параметров энергетических процессов за основу берется система аксиоматических положений:

- анализируются непосредственно сигналы, характеризующие энергетический процесс, – в рассматриваемом случае изменение мощности во времени;

- элементы теории энергетических процессов в равной степени должны быть применимы к встречающимся на практике сигналам – периодическим, непериодическим, знакопостоянным, с меняющейся амплитудой, частотой и т.п.;

- оценка энергетических процессов может использоваться и при анализе режимов физических объектов с иными, чем в электрических цепях, законами формирования мощности. Показатели должны иметь одинаковую смысловую оценку как в электрических цепях, так, например, и в механических системах, где некоторые понятия, характерные для электрических систем, вообще до сих пор не применяются. При анализе мгновенной мощности как сигнала неизбежно требуется оценка составляющих, которые в разной степени определяют энергетический процесс.

При этом мгновенная мощность может быть получена двумя различными путями:

- путем непосредственного определения произведения напряжения и тока с последующей обработкой и оценкой полученного результата;

- путем определения составляющих напряжения и тока (например, их гармонического состава), перемножения составляющих и последующей оценкой результата с таких же позиций, что и в первом случае.

Электрическая энергия должна иметь свою цену, с учетом всех компонент, входящих как составляющие в выражение мощности. Следует подчеркнуть, что в зависимости от тех или иных теоретических положений, берущихся в качестве основы для анализа, выражения могут быть различными.

Теоретические положения в любой области знаний, как и в области электротехники, с течением времени уточняются, усложняются, но всегда опережают те практические результаты, которые в дальнейшем реализуются как общественно полезная потребность.

В плоскости учета энергии, ценовой политики это достаточно наглядно. Так, в простейшем варианте задачи энергоиспользования видны разные подходы к определению цены использованной энергии. В социально-бытовом секторе – плата за потребленную активную мощность. Эта тенденция берет свое начало с 30-х годов прошлого столетия.

Тенденция существенно изменилась с повышением уровня электрификации быта, в частности, по ме-

ре расширения использования достаточно эффективного осветительного оборудования, которое, наряду с высокой светоотдачей, имеет неудовлетворительные характеристики в части сдвига первой гармоники тока относительного напряжения, искажения кривой тока и т.д. В результате исследований энергетических режимов нагрузкой обнаружены уровни гармоник тока сети в диапазоне 15–35 % действующего значения основной гармоники, при угле сдвига последней относительно напряжения до $\pi/3$.

Следует отметить при этом, что существующие нормы не ограничивают коэффициент искажения тока. Сложившаяся ситуация не вызвана тем, что негативное влияние тока со значительным коэффициентом искажения невелико. Дело в другом, находящемся в иной плоскости:

- применяемая измерительная аппаратура для подобных целей, как правило, несовершенна и базируется на теоретических представлениях полной или кажущейся мощности;

- использование расчетных механизмов на базе полной или кажущейся мощности вряд ли целесообразно ввиду имеющегося противоречия этой базы закону сохранения энергии [7];

- стоимость аппаратуры для измерения параметров энергетического режима, очевидно, будет выше в случае использования расчетного механизма с другой, отличной от существующей аналитической базой. Это превышение стоимости может быть существенным, с одной стороны, а с другой – вызовет необходимость усложнения расчетных механизмов, хотя, несомненно, сделает их более прозрачными.

Целью работы является обоснование несостоятельности понятия «полная мощность» для цепей с несинусоидальными токами и напряжениями, при учете качественных и количественных показателей энергетического процесса.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

С учетом сказанного выше понятно, что фундаментом для создания расчетного механизма оплаты электрической энергии должны быть понятные, формализованные оцененные показатели с вполне очевидными факторами, негативно влияющими в целом на энергопроцесс. В качестве примера рассмотрим существующее в литературе понятие мощности искажения, оцениваемое произведением эффективных значений разночастотных компонент гармоник напряжения и тока [8].

Как отмечено ранее, возможны два пути определения мгновенной мощности при существующей технологии оценки мгновенных значений напряжений и тока. В первом случае массив значений напряжения и тока обрабатывается путем определения их гармонического состава. Произведение полученных рядов Фурье для напряжения и тока с учетом их взаимного фазового сдвига дает новый ряд, коэффициенты которого определяют знакопеременные составляющие мгновенной мощности. Представим ток и напряжение так [9, 10]:

$$i = \sum_{m=0}^M I_m \cos(m\Omega t - \varphi_m); \quad u = \sum_{n=0}^N U_n \cos(n\Omega t - \varphi_n), \quad (1)$$

где I_m, U_n – амплитуды гармонических напряжения и тока.

Преобразуем зависимости для напряжения и тока, выразив их составляющие проекциями в ортогональной системе координат:

$$\begin{cases} i = \sum_{m=0}^M I_{am} \cos m\Omega t + \sum_{m=0}^M I_{bm} \sin m\Omega t; \\ u = \sum_{n=0}^N U_{an} \cos n\Omega t + \sum_{n=0}^N U_{bn} \sin n\Omega t, \end{cases} \quad (2)$$

где $I_{am} = I_m \cos \varphi_m; \quad I_{bm} = I_m \sin \varphi_m; \quad U_{an} = U_n \cos \varphi_n; \quad U_{bn} = U_n \sin \varphi_n$.

Мгновенная мощность определяется произведением

$$p = ui. \quad (3)$$

Используя ортогональные проекции гармоник тока и напряжения (2), мгновенная мощность:

$$\begin{aligned} p &= \left(\sum_{n=0}^N U_{an} \cos n\Omega t + \sum_{n=0}^N U_{bn} \sin n\Omega t \right) \times \\ &\times \left(\sum_{m=0}^M I_{am} \cos m\Omega t + \sum_{m=0}^M I_{bm} \sin m\Omega t \right) = \\ &= \sum_{n=0}^N U_{an} \cos n\Omega t \sum_{m=0}^M I_{am} \cos m\Omega t + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{bn} \sin n\Omega t \sum_{m=0}^M I_{am} \cos m\Omega t + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{an} \cos n\Omega t \sum_{m=0}^M I_{bm} \sin m\Omega t + \\ &+ \sum_{n=0}^N U_{bn} \sin n\Omega t \sum_{m=0}^M I_{bm} \sin m\Omega t. \end{aligned} \quad (4)$$

Введем понятие одноименных и разноименных произведений. Разноименные – это произведения, в которые входят разные тригонометрические функции, например косинусные и синусные, одноименные – это произведения, в которые входят две косинусные или две синусные функции. Из приведенного выше выражения следует, что мгновенная мощность – это сумма двух произведений одноименных и двух разноименных ортогональных составляющих тока и напряжения. Так как произведение двух гармонических функций упрощается до суммы двух гармонических функций с частотами, равными сумме и разности частот исходных функций, то мгновенная мощность представляет собой сумму гармонических

$$p = ui = \sum_{k=0}^K P_{ak} \cos k\Omega t + \sum_{k=0}^K P_{bk} \sin k\Omega t, \quad (5)$$

учитывая, что при $k = 0 \Rightarrow \cos(k\Omega t) = 1, \sin(k\Omega t) = 0$ зависимость для мгновенной мощности приобретает форму

$$p = P_0 + \sum_{k=1}^K P_{ak} \cos k\Omega t + \sum_{k=1}^K P_{bk} \sin k\Omega t, \quad (6)$$

где P_0 – постоянная составляющая мощности; P_{ka}, P_{kb} – проекции косинусных и синусных ортогональных составляющих мощности; $K = M + N$.

На рис. 1 представлены возможные варианты определения параметров мгновенной мощности. Один

из них заключается в получении произведения ui , дальнейшего гармонического анализа его с помощью блока FT (*Fourier Transform*), определения составляющих мощности p_k , определения среднеквадратичного значения мощности P_{RMS} ; второй реализуется путем измерения тока и напряжения, разложения их в тригонометрический ряд и последующего покомпонентного умножения для получения составляющих мгновенной мощности p_k . Конечным результатом как в первом, так и во втором случаях является среднеквадратичное значение мощности P_{RMS} . Результаты в обоих случаях одинаковы, однако во втором случае имеется возможность выполнить анализ процесса

формирования составляющих мгновенной мощности p_k , что является важным, т.к. анализ частотных преобразований позволяет наиболее полно учесть все особенности процесса, в частности, его показатели.

Эти особенности при несинусоидальных (полигармонических) токах и напряжениях достаточно сложны, что следует из общей зависимости для мгновенной мощности: постоянной активной, знакопеременной активной, обменной или реактивной, дополнительной от частотных энергетических преобразований, образующих в совокупности канонические составляющие или компоненты, а также неканонические компоненты как результат произведения гармоник тока и напряжения разной частоты [9–11].

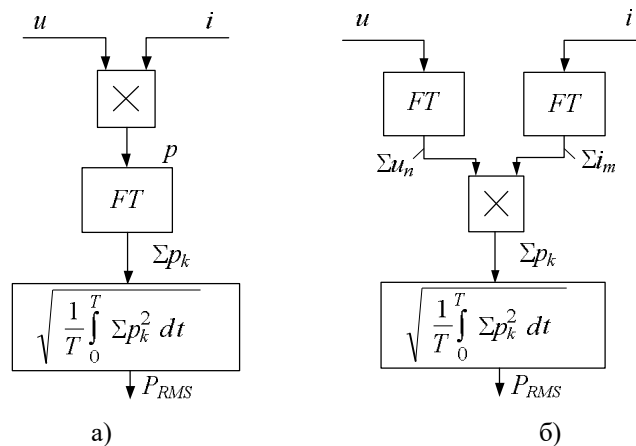


Рисунок 1 – Варианты измерения и оценки параметров мгновенной мощности: а) при непосредственном измерении мощности p ; б) при раздельном определении гармоник напряжения и тока

При этом в основу классификации составляющих заложены известные положения: постоянная составляющая мгновенной мощности, или активная мощность, формируется только теми гармоническими напряжениями и токами, частоты которых одинаковы; реактивная или обменная составляющая мгновенной мощности формируется только из одночастотных компонент напряжения и тока при наличии фазового сдвига между этими компонентами; знакопеременная активная мощность является результатом взаимодействия гармоник напряжения и тока одинаковых частот; дополнительной псевдоканонической компоненты от произведения гармоник напряжения и тока разных частот, арифметически складывающейся с каноническими компонентами знакопеременной активной и реактивной мощности; знакопеременных неканонических компонент, формируемых произведениями напряжения и тока разных частот.

На рис. 2 приведена диаграмма формирования составляющих мгновенной мощности в зависимости от относительных частот гармонических напряжения (m) и тока (n). По этому признаку выделены канонические составляющие с относительными частотами $k = m \pm n \equiv (2m = 2n) \cap 0$ при $m = n$, обуславливающие постоянную активную мощность, знакопеременные синусные и косинусные составляющие мощности и неканонические с относительными частотами $k = m \pm n$ при $m \neq n$, обуславли-

вающие знакопеременные синусные и косинусные составляющие мощности. При этом в последних можно выделить псевдоканонические - меняющиеся с такой же частотой, что и канонические $k = m \pm n \equiv 2m \cap 2n$ при $m \neq n$, и неканонические $k = m \pm n \neq 2m \cap 2n$.

Заслуживают внимания неканонические составляющие мгновенной мощности, классифицируемые (рис. 2) как псевдоканонические, которые имеют частоту, равную частоте канонических составляющих мгновенной мощности.

Природа этого явления не имеет до настоящего времени должного понимания, однако проявления вполне очевидны. Происходит арифметическое суммирование знакопеременных канонических составляющих с соответствующими по частоте знакопеременными псевдоканоническими составляющими. Это является причиной дополнительного влияния знакопеременных составляющих мгновенной мощности на потребителя.

Таким образом, мгновенную мощность следует рассматривать в виде суммы:

$$p = p_0 + \sum_{\substack{k=m+n \\ k=2n=2m}} (p_{akc} + p_{bkc}) + \sum_{\substack{k=m \pm n \\ k=2m \cap 2n}} (p_{akcs} + p_{bkcs}) + \sum_{\substack{k=m \pm n \\ k \neq 2m \cap 2n}} (p_{aks} + p_{bks}), \quad (7)$$

где p_0 – нулевая составляющая мгновенной мощности (активная мощность) для всех гармоник; p_{ac} – косинусные канонические составляющие; p_{bc} – синусные канонические составляющие; p_{acs} – косинусные составляющие неканонического

порядка (псевдоканонические компоненты); p_{bcs} – синусные составляющие неканонического порядка (псевдоканонические компоненты); p_{as} – косинусные неканонические составляющие; p_{bs} – синусные неканонические составляющие.

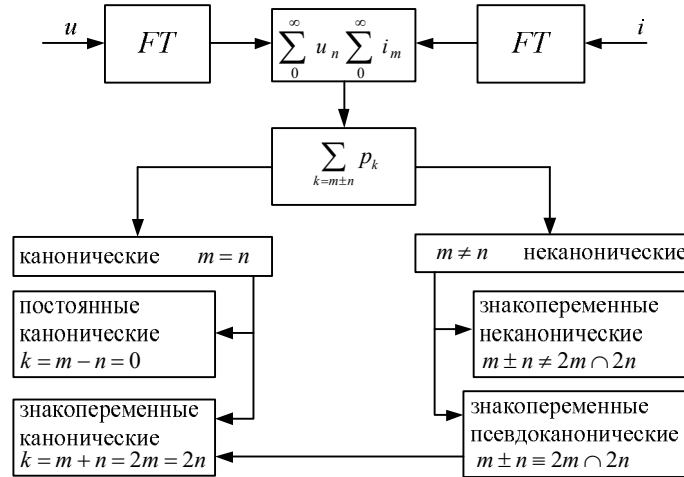


Рисунок 2 – Диаграмма формирования составляющих мгновенной мощности

Фрагмент общей картины формирования составляющих мощности представлен на диаграмме (рис. 3), где конечные ряды напряжения u_n и тока i_m включают гармоники 1, 3, 5, 7... $n=m$, $N=M$. Произведения одноименных составляющих $U_1I_1; U_3I_3; \dots U_nI_m$ соответствуют вертикальным линиям, и как результат – получение канонических составляющих P_{kc} мощности с частотами 0, 2; 0, 6; 0, 10; 0, 14...0, 2n. Неканонические составляющие P_{ks} получены в результате умножения разночастотных компонент конечных рядов тока и напряжения, в результате чего частоты результирующей функции, соответственно, $k = m \pm n$, чему соответствуют значения относительных частот 2, 4; 2, 8; 2, 12... $(m-n)$, $(m+n)$. Штрихпунктирными линиями представлены псевдоканонические составляющие, имеющие частоты 2 и 6, образованные комбинациями U_3I_1 , U_1I_7 и суммирующиеся с каноническими гармониками, образованными произведениями U_1I_1 и U_3I_3 . На диаграмме показана лишь часть тех возможных комбинаций, которые получаются в результате реализации произведений U_nI_m .

С позиции оплаты количества и качества электрической энергии формально каждая из составляющих мгновенной мощности должна иметь соответствующий коэффициент при формировании цены.

Воспользуемся указанным ранее приемом и выделим возможные пути построения экономических моделей для определения платы при наличии полигармонических сигналов [7, 12–14]:

– определение формулы цены в случае пренебрежения гармониками тока и напряжения. В этом

случае анализ ведется по первым гармоникам тока и напряжения и углу сдвига между ними, последние определяются на основании гармонического анализа реальных кривых u и i ;

– определение формулы цены в случае, если одна из компонент (напряжение или ток) синусоидальна, а другая имеет сложный гармонический состав;

– определение формулы цены без приведенных выше упрощений. Этот вопрос отличается очевидной сложностью и может рассматриваться с учетом дополнительных положений.

Допустим, в общем случае, что эффективные значения переменного напряжения и тока

$$U_3 = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_N^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^N U_n^2}; \quad (9)$$

$$I_3 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_M^2} = \sqrt{\sum_{m=0}^M I_m^2}, \quad (10)$$

где U_n и I_m – эффективные значения гармоник напряжения и тока.

Полная или кажущаяся мощность:

$$S = U_3 I_3 = \sqrt{\sum_{m=1}^M I_m^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N U_n^2}. \quad (11)$$

Преобразуем полученное произведение:

$$S = \sqrt{\sum_{n=1, m=1}^{M, N} U_n^2 I_m^2 + \sum_{n=1, m=1}^{M, N} U_n^2 I_m^2}. \quad (12)$$

В первой части подкоренное выражение $U_n^2 I_m^2$ при $n = m$ определяет квадрат полной мощности гармоники напряжения и тока, равна сумме квадратов активной и реактивной мощности; вторая составляющая определяет квадрат мощности искажения [15–17].

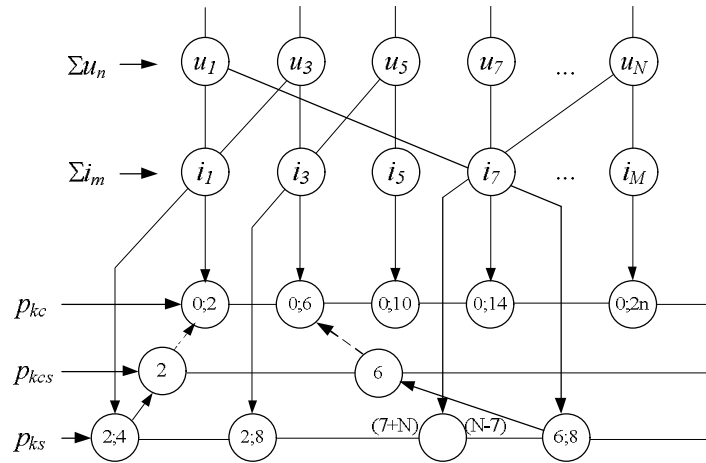


Рисунок 3 – Фрагмент діаграми формування складових миттєвої потужності: p_{kc} – канонічні складові; p_{ks} – неканонічні складові; p_{kcs} – псевдоканонічні складові

Полагаючи повну потужність одноименных гармоник в виде $S_k^2 \Big|_{\substack{k=n+m \\ n=m}} = U_n^2 I_m^2$, получим, учитывая, что в общем случае, при $M \neq N$ число составляющих полной мощности одноименных гармоник тока и напряжения $K' = 2 \min(N, M)$:

$$S = \sqrt{\sum_{k=2}^{K'} S_k^2 + T^2} = \sqrt{\sum_{k=2}^{K'} P_k^2 + \sum_{k=2}^{K'} Q_k^2 + \sum_{\substack{n=1, m=1 \\ m \neq n}}^{M, N} U_n^2 I_m^2}. \quad (13)$$

Отметим, что сделанные преобразования убедительны, как и известные выражения для эффективных значений напряжения и тока (9, 10), а также выражение для полной мощности S несинусоидальных токов и напряжений (11). Безупречность выводов не согласуется, однако, с физическими оценками, которые можно получить из (13). Это видно из следующего [17, 18].

В зависимости (13) для полной мощности в качестве компоненты, связывающей S с активной мощностью гармоник, включена сумма квадратов активных мощностей их в виде $A_{(p^2)} = \sum_{k=2}^{K'} P_k^2$, что не соответствует традиционной форме представления активной мощности. В этой связи закономерен вопрос: какой величине, определяющей в той или иной мере характер энергопроцесса как в источнике, так и в элементарном потребителе (элементе потребителя), должна соответствовать первая составляющая в подкоренном выражении (13). Объективная оценка энергопроцесса, вытекающая из закона сохранения энергии и, соответственно, активной мощности, – это арифметическая сумма активных мощностей ее гармоник:

$$A_{(p^2)} = P_{\Sigma}^2 = \left(\sum_{k=2}^{K'} P_k \right)^2. \quad (14)$$

При этом, как следует из теории, отдельные составляющие активной мощности могут иметь не только положительные знаки, но и отрицательные, что соответствует не потреблению мощности, а ее

генерации. Без учета этого нельзя утверждать, в каком соотношении находятся к друг другу $A_{(p^2)}$ и $A_{(p^2)}$. В наиболее характерном и часто встречающемся случае активная мощность гармоник положительна, что позволяет сделать вывод о том, что сумма квадратов активных мощностей гармоник меньше квадрата их суммы. Отсюда можно сделать однозначный вывод: в формализованном представлении полной мощности полигармонических сигналов отсутствует компонента, оценивающая активную мощность, определяемую известным путем из произведений зависимостей напряжения и тока, представленных в форме тригонометрических рядов.

Сказанное в полной мере касается и реактивных мощностей гармоник $A_{(Q^2)} = \sum_{k=1}^{K'} Q_k^2$, вытекающих из зависимости (13). Значение реактивной мощности, как известно, определяется суммой $Q_{\Sigma} = \sum_{k=1}^{K'} Q_k$.

Отличие последней зависимости от приведенного ранее результата в том, что в выражении для S компонента, отвечающая за реактивные мощности, представляет собой сумму квадратов реактивной мощности гармоник, в то время как в соответствии с законом сохранения энергии в подкоренном выражении должен быть квадрат суммы. Таким образом, и в рассматриваемом случае составляющая реактивной мощности, представленная в (13), не является компонентой, объективно отражающей ту или иную сторону энергетического процесса.

Учитывая важность сделанных выводов, выполним оценку адекватности получения искажающего эффекта, получаемого известным путем с помощью зависимости (13), а также другими путями, т.е. из непосредственных временных зависимостей напряжения u , тока i и мощности $p = ui$. Здесь применим термин «искажающий эффект» вместо мощности искажения T , определяемой согласно [6].

Пусть зависимости напряжения и тока имеют вид в соответствии с выражениями (1), (2), мощность определим в виде

$$p = \sum_{n=1}^N U_n \cos(n\Omega t - \varphi_n) \sum_{m=1}^M I_m \cos(m\Omega t - \varphi_m). \quad (15)$$

Так как среднее за период значение произведения гармоник напряжения и тока с разными частотами равно нулю, то активная мощность

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=1, m=1}^{N, M} U_n I_m \cos(n\Omega t - \varphi_n) \cos(m\Omega t - \varphi_m) dt = \sum_{n=m=1}^{N=M} U_n I_m \frac{\cos(\varphi_n - \varphi_m)}{2}. \quad (16)$$

В соответствии с правилами интегрирования суммы, среднее значение мощности равно сумме средних значений мощности отдельных гармоник:

$$P_{\Sigma} = \sum_{k=2}^{K^*} P_k. \quad (17)$$

Полученная таким образом мощность определяет энергию, необратимо преобразующуюся в тепловую, механическую или другой вид энергии.

Аналогичный результат получается и для реактивной мощности:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{k=2}^{K^*} Q_k, \quad (18)$$

т.е. суммарное значение реактивной мощности равно сумме реактивных мощностей гармоник напряжения и тока с равными их частотами.

Эффективные значения напряжения и тока определяются соответственно

$$U_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}; \quad (19)$$

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (20)$$

В то же время на практике суммарные значения активной и реактивной мощности определяются, как показано ранее, путем интегрирования соответствующих произведений напряжения и тока. При этом можно заметить, что

$$P_{\Sigma}^2 \neq \sum_{k=1}^{K^*} P_k^2 \text{ и } Q_{\Sigma}^2 \neq \sum_{k=1}^{K^*} Q_k^2. \quad (21)$$

С учетом отмеченного очевидно, что значение искажающего фактора, определяемого из (13), будет отличаться в меньшую сторону от того значения, которое можно получить с использованием обоснованных значений P_{Σ} и Q_{Σ} :

$$T_{u1}^2 = \sqrt{S^2 - (P_{\Sigma})^2 - (Q_{\Sigma})^2}; \quad (22)$$

$$T_{u2}^2 = \sqrt{S^2 - \sum_{k=1}^{K^*} P_k^2 - \sum_{k=1}^{K^*} Q_k^2}. \quad (23)$$

Отсюда следует, что $\sum_1^{m,n} T_{u1}^2 \neq \sum_1^{m,n} T_{u2}^2$, причем

$$T_{u1} < T_{u2}.$$

Очевидно, что если искажающий фактор в какой-то мере дает характеристику качеству преобразова-

ния энергии, то получаемый в ходе анализа показатель с одной стороны должен отвечать принципам математической логики, а с другой – быть в соответствии с законами природы, в данном случае с законом сохранения энергии, представляемым в той или иной форме.

Из изложенного выше видно, что полная мощность представляется произведением эффективных значений напряжения и тока – среднеквадратичных их значений – их мер. Эта оценка с позиции математического анализа безупречна, однако в физическом плане несостоятельна. Она, в частности, не обладает фундаментальным свойством интегрируемости. Так, интеграл временной зависимости мощности означает энергию, переданную от источника к потребителю в течение заданного временного интервала. При этом интервал времени, на котором осуществляется интегрирование, формально может быть каким угодно.

Полная или кажущаяся мощность – скалярная величина, имеющая определенное значение и достаточно простое геометрическое толкование лишь для синусоидальных зависимостей напряжения и тока. Геометрическая трактовка полной мощности как гипотенузы прямоугольного треугольника, катеты которого – суть активная и реактивная мощность.

Распространение этого понятия на несинусоидальные величины в принципе ошибочно и с формальных позиций вследствие того, что составляющие мощности (активная и реактивная) в классическом выражении представляются в форме суммы квадратов компонент, а не квадратов сумм, как того требует формальное соблюдение закона сохранения в форме их баланса.

С этой позиции вытекает вывод об отсутствии оснований использования понятия полной мощности при определении энергетических показателей с целью включения в формулы цены составляющей мощности искажения. Исключением представляются те случаи, где коэффициенты искажения напряжения и тока близки к нулю. При этом очевидно, что возможная граница применимости понятия полной мощности для оценки энергетических показателей должна устанавливаться с учетом конкретных технических и экономических условий.

В соответствии со сказанным очевидно необходимость разработки математического аппарата оценки энергетических режимов, базирующихся на анализе временных зависимостей u и i , а также их произведения – мгновенной мощности $p = ui$ [8, 10, 11].

Рассмотрим пример расчета энергетического режима при несинусоидальном напряжении источника питания u и тока i , равных соответственно

$$u = \sqrt{2} \cdot 200 \cos \Omega_1 t + \sqrt{2} \cdot 60 \cos 5\Omega_1 t + \sqrt{2} \cdot 40 \cos 7\Omega_1 t; \quad (24)$$

$$i = \sqrt{2} \cdot 100 \cos(\Omega_1 t - \pi/12) + \sqrt{2} \cdot 50 \cos(5\Omega_1 t - \pi/4) + \sqrt{2} \cdot 20 \cos(7\Omega_1 t - \pi/3). \quad (25)$$

Активная мощность определяется произведением одночастотных действующих значений напряжения U_n и тока I_m с учетом угла сдвига фаз:

$$P_{\Sigma} = \sum P_k = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_5 I_5 \cos \varphi_5 + U_7 I_7 \cos \varphi_7. \quad (26)$$

Реактивна составляющая определяется аналогичным путем:

$$Q_{\Sigma} = \sum Q_k = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_5 I_5 \sin \varphi_5 + U_7 I_7 \sin \varphi_7. \quad (27)$$

При анализе определяются также такие составляющие: квадрат суммы активной мощности $(\sum P_k)^2$, а также сумма квадратов постоянных составляющих гармоник $\sum (P_k)^2$, что дает возможность выполнить анализ в соответствии с зависимостями (22) и (23). Аналогично определяются значения квадрата суммы $(\sum Q_k)^2$ и суммы квадратов $\sum (Q_k)^2$ реактивной мощности одночастотных компонент напряжения и тока.

В табл. 1 приведены расчетные параметры энергетического режима, включая значения T_{u1} и T_{u2} – расчетные значения с использованием показателей полной (кажущейся) мощности S , определяемой как корень квадратный из произведения квадратов среднеквадратичных значений напряжения U_3 и тока I_3 . Определены значения отношений $\xi_1 = \frac{T_{u1}}{S}$ и $\xi_2 = \frac{T_{u2}}{S}$, дающих некоторое представление об искажающем энергетическом влиянии несинусоидальных напряжения и тока:

$$\xi_1 = \frac{T_{u1}}{S} = \frac{13163}{24151} = 0,545; \quad \xi_2 = \frac{T_{u2}}{S} = \frac{6512}{24151} = 0,27.$$

Таблица 1 – Расчетные параметры энергетического режима

№ п/п	Параметр	Расчетные параметры режима			Расчетные величины
		Номера гармоник $U_n \cdot I_m$			
		1	5	7	
1	U_n , В	200	60	40	
2	I_m , А	100	50	20	
3	φ_m , град	15	45	60	
4	$\cos \varphi_m$	0,966	0,707	0,5	
5	$\sin \varphi_m$	0,2588	0,707	0,866	
6	S_k , ВА	20000	3000	800	
7	P_k , Вт	19320	2121	400	21847
8	Q_k , ВАр	5176	2121	693	7990
9	$(\sum P_k)^2$	–	–	–	477029281
10	$(\sum Q_k)^2$	–	–	–	63840100
11	$(P_k)^2$	373262400	4498641	480249	378241290
12	$(Q_k)^2$	26790976	4498641	480249	3169866
13	U_n^2	40000	3600	1600	45200
14	$\sqrt{\sum U_n^2} = U_3$, В	–	–	–	212,6
15	I_m^2	10000	2500	400	12900
16	$\sqrt{\sum I_m^2} = I_3$, А	–	–	–	113,6
17	$S = U_3 I_3$, ВА	–	–	–	24151,4
18	S^2	–	–	–	583270801
19	$T_{u1} = \sqrt{S^2 - \sum P_k^2 - \sum Q_k^2}$	–	–	–	13163
20	$T_{u2} = \sqrt{S^2 - (\sum P_k)^2 - (\sum Q_k)^2}$	–	–	–	6512

Дополнительно определены коэффициенты искажения напряжения и тока, а также коэффициент мощности и коэффициент реактивности:

$$K_i = \frac{\sqrt{I_3^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{113,6^2 - 100^2}}{100} = 0,539;$$

$$K_u = \frac{\sqrt{U_3^2 - U_1^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{212,6^2 - 200^2}}{200} = 0,361;$$

$$K_Q = \frac{\sum Q_k}{S} = \frac{7990}{24151,4} = 0,33;$$

$$K_p = \frac{\sum P_k}{S} = \frac{21847}{24151,4} = 0,9.$$

Очевидна різниця в значеннях коефіцієнтів ξ_1 і ξ_2 , визначаючих мешаюче енергетичне впливання. Установлено, що відхилення в значеннях коефіцієнтів тим більше, чим більше значення коефіцієнтів іскаження напруги і тока, при цьому зв'язок між упомянутими коефіцієнтами представляє собою достаточнo складну звисимість.

Учитывая полученный результат, а также то, что полная мощность по формальным признакам не может представлять собой базовый параметр для оценки показателей энергетического режима при несинусоидальных напряжениях и токе, оценим их с позиции мгновенной мощности в форме произведения $p = ui$.

Рассмотрим порядок формирования гармоник мгновенной мощности по аналогии с (4), полагая, что в напряжении и токе (2) отличными от нуля являются 1-ая, 5-ая и 7-ая гармоники:

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{2}U_{a1} \cos \Omega t + \sqrt{2}U_{a5} \cos 5\Omega t + \sqrt{2}U_{a7} \cos 7\Omega t + \\ &+ \sqrt{2}U_{b1} \sin \Omega t + \sqrt{2}U_{b5} \sin 5\Omega t + \sqrt{2}U_{b7} \sin 7\Omega t; \\ i &= \sqrt{2}I_{a1} \cos \Omega t + \sqrt{2}I_{a5} \cos 5\Omega t + \sqrt{2}I_{a7} \cos 7\Omega t + \\ &+ \sqrt{2}I_{b1} \sin \Omega t + \sqrt{2}I_{b5} \sin 5\Omega t + \sqrt{2}I_{b7} \sin 7\Omega t. \end{aligned} \quad (28)$$

Тогда мгновенная мощность, в соответствии с рис. 3:

$$\begin{aligned} p = ui &= U_{a1}I_{a1} + U_{a5}I_{a5} + U_{a7}I_{a7} + U_{b1}I_{b1} + U_{b5}I_{b5} + U_{b7}I_{b7} + \\ &+ (-U_{a1}I_{a1} + U_{b1}I_{b1}) \cos 2\Omega t + \\ &+ (U_{a1}I_{b1} + U_{b1}I_{a1}) \sin 2\Omega t + \\ &+ (U_{a5}I_{a7} + U_{a7}I_{a5} + U_{b5}I_{b7} + U_{b7}I_{b5}) \cos 2\Omega t + \\ &+ (-U_{a5}I_{b7} + U_{a7}I_{b5} + U_{b5}I_{a7} - U_{b7}I_{a5}) \sin 2\Omega t + \\ &+ (U_{a5}I_{a1} + U_{a1}I_{a5} + U_{b5}I_{b1} + U_{b1}I_{b5}) \cos 4\Omega t + \\ &+ (U_{a5}I_{b1} - U_{a1}I_{b5} - U_{b5}I_{a1} + U_{b1}I_{a5}) \sin 4\Omega t + \\ &+ (-U_{a5}I_{a1} + U_{a7}I_{a1} - U_{a1}I_{a5} + U_{a1}I_{a7} + \\ &+ U_{b5}I_{b1} + U_{b7}I_{b1} + U_{b1}I_{b5} + U_{b1}I_{b7}) \cos 6\Omega t + \\ &+ (U_{a5}I_{b1} + U_{a7}I_{b1} + U_{a1}I_{b5} - U_{a1}I_{b7} + \\ &+ U_{b5}I_{a1} - U_{b7}I_{a1} + U_{b1}I_{a5} + U_{b1}I_{a7}) \sin 6\Omega t + \\ &+ (-U_{a7}I_{a1} - U_{a1}I_{a7} + U_{b7}I_{b1} + U_{b1}I_{b7}) \cos 8\Omega t + \\ &+ (U_{a7}I_{b1} + U_{a1}I_{b7} + U_{b7}I_{a1} + U_{b1}I_{a7}) \sin 8\Omega t + \\ &+ (-U_{a5}I_{a5} + U_{b5}I_{b5}) \cos 10\Omega t + \\ &+ (U_{a5}I_{b5} + U_{b5}I_{a5}) \sin 10\Omega t + \\ &+ (-U_{a5}I_{a7} - U_{a7}I_{a5} + U_{b5}I_{b7} + U_{b7}I_{b5}) \cos 12\Omega t + \\ &+ (U_{a5}I_{b7} + U_{a7}I_{b5} + U_{b5}I_{a7} + U_{b7}I_{a5}) \sin 12\Omega t + \\ &+ (-U_{a7}I_{a7} + U_{b7}I_{b7}) \cos 14\Omega t + \\ &+ (U_{a7}I_{b7} + U_{b7}I_{a7}) \sin 14\Omega t, \end{aligned} \quad (29)$$

или через гармонические составляющие мощности:

$$\begin{aligned} p &= P_0 + P_{a2} \cos 2\Omega t + P_{b2} \sin 2\Omega t + \\ &+ P_{a4} \cos 4\Omega t + P_{b4} \sin 4\Omega t + P_{a6} \cos 6\Omega t + \\ &+ P_{b6} \sin 6\Omega t + P_{a8} \cos 8\Omega t + P_{b8} \sin 8\Omega t + \\ &+ P_{a10} \cos 10\Omega t + P_{b10} \sin 10\Omega t + P_{a12} \cos 12\Omega t + \\ &+ P_{b12} \sin 12\Omega t + P_{a14} \cos 14\Omega t + P_{b14} \sin 14\Omega t, \end{aligned} \quad (30)$$

здесь

$$\begin{aligned} P_0 &= U_{a1}I_{a1} + U_{a5}I_{a5} + U_{a7}I_{a7} + U_{b1}I_{b1} + U_{b5}I_{b5} + U_{b7}I_{b7}; \\ P_{a2} &= -U_{a1}I_{a1} + U_{b1}I_{b1} + \\ &+ U_{a5}I_{a7} + U_{a7}I_{a5} + U_{b5}I_{b7} + U_{b7}I_{b5} = P_{a2c} + P_{a2cs}; \\ P_{b2} &= U_{a1}I_{b1} + U_{b1}I_{a1} - \\ &- U_{a5}I_{b7} + U_{a7}I_{b5} + U_{b5}I_{a7} - U_{b7}I_{a5} = P_{b2c} + P_{b2cs}; \\ P_{a4} &= U_{a5}I_{a1} + U_{a1}I_{a5} + U_{b5}I_{b1} + U_{b1}I_{b5} = P_{a4s}; \\ P_{b4} &= U_{a5}I_{b1} - U_{a1}I_{b5} - U_{b5}I_{a1} + U_{b1}I_{a5} = P_{b4s}; \\ P_{a6} &= -U_{a5}I_{a1} + U_{a7}I_{a1} - U_{a1}I_{a5} + U_{a1}I_{a7} + \\ &+ U_{b5}I_{b1} + U_{b7}I_{b1} + U_{b1}I_{b5} + U_{b1}I_{b7} = P_{a6s}; \\ P_{b6} &= U_{a5}I_{b1} + U_{a7}I_{b1} + U_{a1}I_{b5} - U_{a1}I_{b7} + \\ &+ U_{b5}I_{a1} - U_{b7}I_{a1} + U_{b1}I_{a5} + U_{b1}I_{a7} = P_{b6s}; \\ P_{a8} &= -U_{a7}I_{a1} - U_{a1}I_{a7} + U_{b7}I_{b1} + U_{b1}I_{b7} = P_{a8s}; \\ P_{b8} &= U_{a7}I_{b1} + U_{a1}I_{b7} + U_{b7}I_{a1} + U_{b1}I_{a7} = P_{b8s}; \\ P_{a10} &= -U_{a5}I_{a5} + U_{b5}I_{b5} = P_{a10c}; \\ P_{b10} &= U_{a5}I_{b5} + U_{b5}I_{a5} = P_{b10c}; \\ P_{a12} &= -U_{a5}I_{a7} - U_{a7}I_{a5} + U_{b5}I_{b7} + U_{b7}I_{b5} = P_{a12s}; \\ P_{b12} &= U_{a5}I_{b7} + U_{a7}I_{b5} + U_{b5}I_{a7} + U_{b7}I_{a5} = P_{b12s}; \\ P_{a14} &= -U_{a7}I_{a7} + U_{b7}I_{b7} = P_{a14c}; \\ P_{b14} &= U_{a7}I_{b7} + U_{b7}I_{a7} = P_{b14c}. \end{aligned}$$

Анализ амплитуд гармонического ряда мгновенной мощности (30), представленных приведенными выше выражениями с учетом принятой на рис. 2 классификации, позволяет выделить:

- активная мощность P_0 ;
- канонические P_{b2c} , P_{a10c} , P_{b10c} , P_{a14c} , P_{b14c} ;
- псевдоканонические P_{a2cs} , P_{b2cs} ;
- неканонические P_{a4s} , P_{b4s} , P_{a6s} , P_{b6s} , P_{a8s} , P_{b8s} , P_{a12s} , P_{b12s} .

Подобная классификация позволяет анализировать энергетические процессы с позиции энергетического воздействия в части оценки качества анализируемого процесса: передачи активной мощности, обмена мощности между реактивными элементами в схеме, а также влияния, вызванного взаимодействием составляющих напряжения и тока различной частоты.

Здесь важно отметить следующее обстоятельство, вытекающее из сделанных ранее замечаний, касающихся особенностей формирования составляющих мгновенной мощности. Особенность состоит в том, что при определении ряда параметров энергетического режима являются востребованными все компоненты мгновенной мощности (канонические, псевдоканонические и неканонические), однако в зависимости от способа определения составляющих

мгновенной мощности получение некоторых из них затруднительно или невозможно. Так, при определении составляющих мгновенной мощности путем интегрирования зависимости p на соответствующем интервале получается сумма переменных компонент канонического порядка, включающая слагаемые как канонические, так и псевдоканонические. Их разделение принципиально возможно и не вызывает особенных затруднений, однако это неизбежно связано с выполнением рассмотренной математической операции. Один путь решения этой задачи – выделение соответствующих слагаемых из зависимостей канонических компонент, как это показано выше.

Выполнив таким образом разделение составляющих мгновенной мощности, используя значения тех или иных компонент, можно получить показатель энергетического режима, взяв за базовую величину среднеквадратичное значение мгновенной мощности на периоде разложения зависимости p в ряд Фурье.

В соответствии с полученными зависимостями легко получить выражение для параметров, характеризующих энергетический процесс. Как показано в [17, 18], эффективное значение мгновенной мощности

$$P_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p)^2 dt} = \sqrt{P_{0\Sigma}^2 + \sum_{k=1}^K P_{ak}^2 + \sum_{k=1}^K P_{bk}^2} = \sqrt{P_{0\Sigma}^2 + \sum_{k=1}^K (P_{akc} + P_{akcs})^2 + \sum_{k=1}^K (P_{bkc} + P_{bkcs})^2} + \left(\sum_{k=1}^K P_{aks}^2 + \sum_{k=1}^K P_{bks}^2 \right) \quad (31)$$

В условиях приведенного примера

$$P_3 = \sqrt{P_0^2 + (P_{a2c} + P_{a2cs})^2 + (P_{b2c} + P_{b2cs})^2 + \left(P_{a10c}^2 + P_{b10c}^2 + P_{a14c}^2 + P_{b14c}^2 + P_{a4s}^2 + P_{b4s}^2 + P_{a6s}^2 + P_{b6s}^2 + P_{a8s}^2 + P_{b8s}^2 + P_{a12s}^2 + P_{b12s}^2 \right)} \quad (32)$$

Очевидно, что показатели энергопроцессов и, соответственно, плата за электроэнергию определяются в зависимости от значений P_0 , P_3 , знакопеременных компонент канонических и неканонических составляющих мгновенной мощности.

Оплата электрической энергии, как известно, включает несколько составляющих: плата за использованную активную мощность – энергию, надбавки за реактивную мощность, возможные платежи, вызванные воздействием несинусоидального напряжения и тока. Если первые из двух перечисленных составляющих непосредственно связаны с энергетическим воздействием в форме активной и реактивной мощности, то третья составляющая (если она включается в форме независимой платежной компоненты) зависит от уровней гармоник напря-

жения и тока, но не мощности, определяемой этими гармониками. При этом третья надбавка, с одной стороны, не определяется теми или иными зависимостями в форме энергетической компоненты – произведения гармонических напряжения и тока, но формируется дифференцированно в зависимости от значений то ли гармоник тока, то ли напряжения.

Можно сделать вывод о том, что такое положение – результат некорректного подхода при оценке составляющей мощности искажения, о чем сказано выше, а также из-за отсутствия математического аппарата, корректно определяющего составляющие мощности искажения, если под этим термином понимать соответствующие компоненты из произведения разночастотных составляющих гармоник напряжения и тока.

Энергетические составляющие процесса преобразования определены ранее в ходе математической обработки и декомпозиции составляющих мгновенной мощности. Эта операция выполнена для однофазной сети, что, естественно, позволяет распространить полученные результаты и на трехфазную сеть.

При этом выделены следующие составляющие:

- постоянная составляющая или активная мощность одночастотных составляющих полигармонических сигналов;
- знакопеременные составляющие мгновенной мощности, полученные в ходе преобразований одночастотных компонент полигармонических сигналов (канонические составляющие);
- знакопеременные составляющие мощности, полученные в ходе преобразований разночастотных компонент полигармонических сигналов (неканонические составляющие);
- знакопеременные составляющие мгновенной мощности неканонического порядка, имеющие такую же частоту канонического порядка (псевдоканонические составляющие).

Ранее указывалось, что в целом в зависимости от гармонического состава тока и напряжения частоты канонических и неканонических составляющих совпадают, вследствие чего их результирующие значения должны определяться путем геометрического суммирования, причем и составляющие, и их геометрическая сумма могут являться теми параметрами, благодаря которым определяются показателями энергетического режима, по которым могут определяться составляющие элементы финансовой стороны платы за использованную энергию и качества ее преобразования.

Дополнительно подчеркиваем то обстоятельство, что процесс формирования составляющих мгновенной мощности связан с частотными преобразователями, в результате которых спектр гармоник мгновенной мощности существенно расширился как в сторону больших частот, чем частоты гармоник напряжения и тока ($k = m + n$), так и в сторону более низких ($k = m - n$). Это важное обстоятельство следует иметь в виду вследствие того, что подавляю-

щая часть потребителей в промышленности – это потребители с двигательным характером нагрузки, для которых характерны так называемые критические (резонансные) частоты, которые охватывают диапазон как пусковых частот (скоростей), так и скоростей, близких к номинальной. В данном случае вопрос рассматривается с такой позиции: переменная составляющая момента, естественно, определяет воздействие на механическую часть приводной системы, в результате чего возможен резонансный режим, когда частота воздействия, равная частоте переменной составляющей момента, совпадает с собственной частотой механических колебаний приводной части установки. В электромеханических системах знакопеременные составляющие мощности вызывают соответствующие моменты и усилия, которые во многих отношениях определяют вибрации – источник механического воздействия на систему. Этот пример показывает, что причиной этого специфического воздействия является мощность и ее составляющие, хотя первопричина – в несинусоидальности компонент, образующих мощность.

Это позволяет осуществить дифференцированный учет энергетических воздействий знакопеременных составляющих мгновенной мощности. Техническую сторону такого подхода здесь не затрагиваем, но сосредотачиваем внимание на вопросе формализации собственно показателей энергетического режима.

Понятие энергетического влияния, не сложившееся должным образом до настоящего времени, означает декомпозицию на составляющие мгновенной мощности с выделением компонент, определяющих воздействие, вызванное конкретными компонентами (активной, реактивной и др.) с целью определения их финансового оценивания. При использовании полной мощности несинусоидальных сигналов это мощность искажения, если использование этого показателя формально возможно из-за незначительных искажений напряжения и тока, хотя и в этом случае неизбежно несоответствие закону сохранения.

Ранее указывалось, что понятие «показатели энергопроцессов» в электрических сетях в определенной мере не сформулировано или, в лучшем случае, размыто. Компоненты, описывающие энергопроцесс, – активная и реактивная составляющие мощности, коэффициенты нелинейных искажений напряжения и тока – не в полной мере характеризуют как процесс, так и влияние его на потребителя, а также на структуру хозрасчетного механизма в тех случаях, когда энергопроцесс происходит с несинусоидальными напряжениями и токами.

Очевидно, что оценка вопросов, связанных с влиянием составляющих мощности на режимы работы потребителей, представляет собой интерес и особенности, прежде всего, из-за конструкции и характеристик конкретного механизма. Это одна сторона исследуемого явления.

С другой стороны, очевидно, что исследования,

касающиеся поднятой проблемы, должны в конечном своем результате иметь однозначные оценки и выводы, на основе которых может быть решен вопрос определения формулы цены за потребление электрической энергии. При этом результат должен учитывать активную и реактивную составляющие мощности, а также компоненты знакопеременных составляющих мощности, что, по существу, как это показано выше, не могло быть учтено посредством мощности искажения в силу несоответствия существующей теории энергетических процессов закону сохранения.

ВЫВОДЫ. Как показал анализ, исследование энергетических процессов в цепях с несинусоидальными напряжениями и токами по-прежнему остается актуальным ввиду непосредственной связи этих процессов с финансово-экономическими аспектами деятельности субъектов, обеспечивающих генерацию, транспортировку, распределение и потребление электрической энергии:

- при анализе энергетических процессов в сетях с гармоническими напряжения и тока предпочтение следует отдавать подходам, базирующимся на временном представлении как зависимостей, формирующих интегральные показатели мощности, так и мгновенной мощности в виде произведения напряжения и тока;

- при анализе следует различать следующие сочетания форм сигналов, образующих мощность:

- несинусоидальные напряжения и ток;
- синусоидальное напряжение и несинусоидальный ток;
- несинусоидальное напряжение и синусоидальный ток,

при этом только в первом из перечисленных случаев возможен анализ энергопроцессов в полном объеме. Анализ энергопроцессов по тому или иному варианту сочетаний состава напряжения и тока зависит от уровней гармоник;

- в зависимости от характера нагрузки, в частности, при наличии нелинейных элементов гармонический состав напряжения и тока может не совпадать; при анализе энергопроцессов количественный состав гармоник тока и напряжения может быть разным;

- мгновенная мощность электрических сигналов в форме произведений мгновенных значений напряжения и тока имеет гармонический состав, включающий сумму и разность частот гармоник исходных сигналов, причем частотный спектр гармоник мощности выше как по уровню частот, так и по плотности заполнения частотной области;

- зависимость знакопеременных составляющих момента электромеханических преобразователей от соответствующих компонент мощности позволяет сделать вывод о необходимости анализа энергетических процессов в частотной области, прежде всего мгновенной мощности. Это вызвано тем, что воздействие на электромеханическую систему в форме знакопеременного момента вызывает усилия и моменты как в двигателе, так и кинематических пере-

дачах в форме резонанса при совпадении частоты воздействия с частотой собственных колебаний конструкции. Это является аргументом в пользу необходимости оценки энергетических показателей не только в форме показателей качества электроэнергии, но и, что не менее важно, в форме показателей качества преобразования энергии;

– установлено, что два варианта оценки показателей энергетических процессов в виде произведения рядов, описывающих напряжение и ток, а также при непосредственном измерении сигнала мгновенной мощности с последующим гармоническим анализом ее равноценны, однако во втором варианте отсутствует возможность качественно оценить характер частотных преобразований в структуре входящих в процесс производства гармоник напряжения и тока. При этом важнейший параметр, характеризующий энергетический процесс, – эффективная мощность – в первом и во втором вариантах измерения имеют одно и то же значение;

– разделение произведения рядов, описывающих напряжение и ток на производство одночастотных и разночастотных гармоник сигналов, позволяет однозначно определить составляющие реактивной мощности гармоник и исключить при этом из анализа возможность разных форм оценки реактивной мощности, упростить толкование феномена реактивной мощности как такового. При этом реактивная мощность определяется как одна из квадратурных составляющих произведения одночастотных гармоник напряжения и тока с соответствующим фазовым сдвигом;

– компоненты разночастотных произведений, совпадающие по частоте с компонентами одночастотных произведений, определяют несбалансированность результатов по определению знакопеременных составляющих мгновенной мощности и, в частности, реактивной мощности гармоник. Несбалансированность вызвана совпадением некоторых частот составляющих произведения гармоник напряжения и тока одинаковых частот с частотами произведения гармоник напряжения и тока разных частот;

– исследования показали ошибочность оценки некачественности преобразования энергии в форме мощности искажения как произведения действующих значений гармоник напряжения и тока разных частот. Это позволило показать ошибочность использования при оценке энергопроцессов понятия полной, или кажущейся, мощности как не отвечающего закону сохранения. Использование этого понятия оправдано только при незначительных коэффициентах искажения напряжения и тока. Уровни упомянутых коэффициентов зависят от конкретных задач и должны определяться в соответствии с поставленной задачей;

– разделение составляющих мгновенной мощности на канонические (произведения одночастотных компонент напряжения и тока), неканонические (произведение разночастотных компонент) и псев-

доканонические – компоненты произведений разночастотных гармоник с частотами произведений одночастотных составляющих – позволяет определить результирующее энергетическое воздействие при оценке показателей энергетического процесса с несинусоидальными напряжениями и токами и реализовать целесообразную концепцию финансового взаимодействия как с энергоснабжающей организацией, так и с внутрицеховыми взаимосвязующими мощными потребителями при реализации конкретной хозяйственной деятельности;

– в основе подходов при определении показателей энергетических процессов находятся сложные зависимости, формализующие этот процесс. В основе аналитических подходов должен находиться теоретический базис мгновенной мощности, как адекватно отображающий физику явлений процесса преобразования энергии. Наиболее важной оценкой энергетического процесса является качество преобразования энергии в форме отношения среднего значения активной мощности к эффективному значению мгновенной мощности;

– дальнейшее развитие исследований должно вестись в направлении обобщения полученных результатов на разные варианты многофазных цепей, уточнение подходов к формированию цены и, в частности, определения составляющей ее за мешающее энергетическое влияние. Особого внимания заслуживают вопросы разработки алгоритмов и программного обеспечения для определения составляющих мгновенной мощности и показателей энергетического процесса, создания методического обеспечения к тренажерным комплексам для исследования энергетического процесса в цепях с несинусоидальными напряжениями и токами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родькин Д.И. О необходимости разделения понятий качества потребления и преобразования энергии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2 (19). – С. 143–148.
2. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – 2004. – Вип. 15. – С. 10–18.
3. Родькин Д.И. Актуальные вопросы теории и практики энергоресурсосберегающих электромеханических систем // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – Вип. 3/2008 (50), част. 1. – С. 8–17.
4. Крогерис А.Ф., Рашевиц К.К., Трейманис Э.Ц., Шинка Я.К. Мощность переменного тока. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.
5. Родькин Д.И. Формула цены за использованную электроэнергию в сетях с периодическими напряжением и током // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний наукововиробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2014.

– Вип. 3/2014 (27). – С. 78–91.

6. ГОСТ 13109-97, Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, межгосударственный совет по стандартам, метрология и сертификация. – Минск, 1999. – 30 с.

7. Денисюк С.П., Кравцов В.О. Оценка точности измерения составляющих электроэнергии в системах с преобразователями энергии. Техническая электродинамика. Тем. выпуск. – 2008. – Част. 8. – С. 62–66.

8. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. – New York: Wiley, 2007. – 379 p.

9. Родькин Д.И. Декомпозиция составляющих мощности полигармонических сигналов // Электротехника. – 2003. – Вып. 6. – С. 34–37.

10. Родькин Д.И., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническими напряжениями и токами // Электротехника. – 2004. – Вып. 6. – С. 37–42.

11. Власенко Р.В., Бялобржеский О.В. Анализ энергетических процессов в трехфазном силовом активном фильтре с использованием спектрального моделирования // Электротехника та електроенергетика. – 2014. – Вип. 1. – С. 12–18.

12. Зорин В.В. К вопросу об оплате за электрическую энергию // Техническая электродинамика. – 2004. – Вып. 1. – С. 68–72.

13. Сюсюкин А.И. К вопросу об уплате (надбав-

ках) за реактивную электрическую энергию // Промышленная энергетика. – 2001. – Вып. 9. – С. 53–55.

14. Осика Л.К. Оплата за реактивную электроэнергию – важная составляющая рыночных отношений в энергетике // Промышленная энергетика. – 2002. – Вып. 6.

15. 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.

16. 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.

17. Zagirnyak M.V., Korenkova T.V. Power estimation of electromechanical systems controllability // Proceedings of XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010. – Rome, Italy, 2010. – Paper RF-009458. IEEE Catalog Number CFP1090B-CDR, ISBN 978-1-4244-4175-4, Library of Congress Number 2009901651.

18. Zagirnyak M., Rodkin D., Korenkova T. Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability // Przegląd Elektrotechniczny, Electrical review. – 2011. – Iss. 12b. – PP. 208–212.

NUISANCE ENERGY INFLUENCE IN THE ELECTRIC CIRCUIT WITH A NON-SINUSOIDAL VOLTAGE AND CURRENT (FOR THE THEORY OF ENERGY PROCESSES NON-SINUSOIDAL SIGNALS)

A. Bialobrzhesky, A. Nikitina, D. Rodkin, S. Sergiienko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: bialobrzheski@ukr.net

Purpose. Energy processes Researchers in electrical circuits, alternating current indicates the invalidity of the use of the concept of total or apparent power in assessing the quality of the conversion of electrical energy and its impact on the financial side. When polyharmonic signals a significant effect of different frequency components of the power-that, to some extent, it is rated as distortion power. At the same time, however, with existing approaches, said power is not determined correctly, without complying with the law of conservation, so that it is not that the third component on which costs can be determined depending on the performance of poor energy conversion. **Methodology.** By performing analytical transformations works polyharmonic current and voltage signals, formulated an opinion on the structure of the resulting signal - instantaneous power. It focuses on the presence of the instantaneous power of the signal components resulting from the action of different frequency and single-frequency harmonic current and voltage. The proposed classification of these components. By applying the operations of integration and decomposition proved incorrectly power allocation distortions in the composition of the instantaneous power with the use of concepts and reactive power. As an example, some of the indicators proposed by the qualitative and quantitative evaluation of the distorting influence of the higher harmonic. **Results.** The basis of analytical approaches must is the theoretical basis of the instantaneous power, as the physics of the phenomena adequately reflects the energy conversion process. The most important process is the assessment of the energy quality of energy conversion in the form of ratio of the average value of the active power to the effective value of the instantaneous power. **Originality.** Separation of the product series describing the voltage and current at different frequencies, and the product of single-frequency harmonic signals allows one to identify uniquely-reactive components, the cardinality of harmonics and thus exclude from the analysis of the possibility of different forms of assessment reactive cardinality alia, to simplify the interpretation of the reactive power of the phenomenon itself. This reactive cardinality-ness is defined as one of the quadrature co-constitute the product of single-frequency voltage and current harmonics to the corresponding phase shift. **Practical value.** The development of research in this area is seen as a generalization of the results obtained in the different variants of multi-phase circuits, refining approaches to the formation of prices and, in particular, determine the component of its energy for the interfering influence. Special attention should be paid to the development of algorithms and software for determining the components of

the instantaneous power and energy parameters of the process, the creation of methodical support to the training complex for the study of the energy process in a non-sinusoidal voltage and current circuits.

Key words: energy process, the energy impact, low-quality financial aspects of energy conversion.

REFERENCES

1. Rodkin, D.I. (2003), "About division necessity the concepts of consumption quality and energy conversion", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 2, no. 19, pp. 143–148. (in Russian)
2. Rodkin, D.I. (2004), "Comment on the theory of energy processes with poly harmonic signals", *Zbirnyk naukovih prats Kirovogradskogo natsionalnogo technicheskogo universitetu*, no. 15, pp. 10–18. (in Russian)
3. Rodkin, D.I. (2008), "Actual questions energy-saving theory and practice of electromechanical systems", *Visnyk KDPU*, Vol. 3, no. 50, part. 1, pp. 8–17. (in Russian)
4. Krogeris, A.F., Rashevits, K.K., Treymanis, E.Ts. and Shinka, Ya.K. (1993), "Alternating current Power", *Piga, Fiz.-energ. inst. Latv. AN*, 294 p. (in Russian)
5. Rodkin, D.I. (2014), "Justification the pricing formula for electricity in networks with nonsinusoidal voltage and current", *Electromehanichni i energozberigajuchi systemy*, Vol. 3, no. 27, pp. 78–91. (in Russian)
6. GOST 13109-97 (1999), "Power quality limits in public electrical systems, Interstate Council for Standards, Metrology and Certification", Minsk, 30 p. (in Russian)
7. Denisyuk, S.P. and Kravtsov, V.O. (2008), "Evaluation of accuracy of measurement of electricity in a power converter system", *Technicheskaya elektrodinamika*, Vol. 8, pp. 62–66. (in Russian)
8. Akagi, H., Watanabe, E.H. and Aredes, M. (2007), *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley, New York.
9. Rodkin, D.I. (2003), "Decomposition power components polyharmonic signals", *Elektrotehnika*, no. 6, pp. 34–37. (in Russian)
10. Rodkin, D.I., Byalobrzheskiy, A.V. and Lomonos, A.I. (2004), "Energy processes indicators in the circuit with harmonic voltages and currents", *Elektrotehnika*, no. 6, pp. 37–42. (in Russian)
11. Vlasenko, R.V. and Byalobrzheskiy, O.V. (2014), "Analysis of energy processes in the three-phase power active filter using spectral modeling", *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, no. 1, pp. 12–18. (in Ukrainian)
12. Zorin, V.V. (2004), "To the payment question for reactive power", *Technicheskaya elektrodinamika*, Vol. 1, pp. 68–72. (in Russian)
13. Siusiukin, A.I. (2001), "On the question of payment (allowances) for reactive energy", *Promyshlennaia energetika*, Vol. 9, pp. 53–55. (in Russian)
14. Osika, L.K. (2002), "Payment for reactive power is an important component of market relations in the energy", *Promyshlennaia energetika*, Vol. 6. (in Russian)
15. Zagirnyak, M., Rodkin, D., Chorni, A. and Korenkova, T. (2011), "Direction of development of the theory of instantaneous power and its application in problems of electrical engineering", *Intern. Scientific and Technical. conf. "Problemy avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika"*, pp. 347–354. (in Russian)
16. Zagirnyak, M., Rodkin, D. and Korenkova, T. (2013), "Assessment of energy processes conversion with the use of the instantaneous power components", *Electromehanichni i energozberigajuchi systemy*, Vol. 1, no. 21, pp. 8–21. (in Russian)
17. Zagirnyak, M.V. and Korenkova, T.V. (2010), "Power estimation of electromechanical systems controllability", *Proceedings of XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010, Rome, Italy, Paper RF-009458. IEEE Catalog Number CFP1090B-CDR, ISBN 978-1-4244-4175-4*, Library of Congress Number 2009901651.
18. Zagirnyak, M., Rodkin, D. and Korenkova, T. (2011), "Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability", *Przeglad Elektrotechniczny, Electrical review*, no 12b., pp. 208–212.

Стаття надійшла 22.05.2016.