

УДК 621.314(075.8)

### ФОРМУЛА ЦЕНЫ ЗА ИСПОЛЬЗОВАННУЮ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В СЕТЯХ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЕМ И ТОКОМ

**Д. И. Родькин**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

В ряде работ автора указаны направления развития теоретических и практических вопросов, касающихся мгновенной мощности электрических сигналов, отмечено отсутствие исследований, затрагивающих особенности энергоучета при полигармонических напряжении и токе. Энергоучетные и энергорасчетные аспекты в указанных условиях существенно отличаются от тех, которые имеют место при синусоидальных сигналах. Установлено, что цена за электроэнергию должна формироваться с учетом всего комплекса энергетических показателей энергопроцесса – составляющих мощности, определяемых тем или иным путем. В зависимости от теоретической базы, закладываемой в математический аппарат, на основании которого определяется плата за электроэнергию, должна реализовываться та или иная концепция – формула цены за электроэнергию. В такой постановке вопрос ставится впервые. Исследованы некорректность определения ценовой компоненты существующими подходами не только для полигармонических, но и для синусоидальных сигналов, т.к. формула цены при двухставочном тарифе базируется на понятии полной, или кажущейся, мощности. Показано, что с использованием математических концепций мгновенной мощности предполагаемая формула цены может учитывать все ее компоненты – активную мощность гармоник, реактивную мощность гармоник в сумме и покомпонентно, знакопеременную активную мощность гармоник, дополнительную мощность частотных преобразований в составе канонических составляющих, знакопеременные составляющие частотных преобразований неканонического порядка.

**Ключевые слова:** формула цены, потребляемая электроэнергия, энергопроцессы, эффективная мощность.

### ФОРМУЛА ЦІНИ ЗА ВИКОРИСТАНУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ В МЕРЕЖАХ ІЗ ПЕРІОДИЧНИМИ НАПРУГОЮ ТА СТРУМОМ

**Д. Й. Родькін**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

У низці робіт автора вказано напрями розвитку теоретичних і практичних питань, які стосуються миттєвої потужності електричних сигналів, відмічено відсутність досліджень щодо особливостей енергообліку при полігармонічних напрузі та струмі. Енергооблікові й енергорозрахункові аспекти у вказаних умовах суттєво відрізняються від тих, які мають місце при синусоїдальних сигналах. Встановлено, що ціна за електроенергію повинна формуватися з урахуванням усього комплексу енергетичних показників енергопроцесу – складових потужності, що визначаються тим чи іншим шляхом. Залежно від теоретичної бази, що закладається в математичний апарат, на основі якого визначається плата за електроенергію, повинна реалізовуватися та чи інша концепція – формула ціни за електроенергію. У такій постановці питання ставиться вперше. Досліджено некоректність визначення цінної компоненти існуючими підходами не тільки для полігармонічних сигналів, але й для синусоїдальних, оскільки формула ціни при двоставковому тарифі базується на понятті повної, або удаваної, потужності. Показано, що з використанням математичних концепцій миттєвої потужності очікувана формула ціни може враховувати всі її компоненти – активну потужність гармонік, реактивну потужність гармонік у сумі й покомпонентно, знакозмінну активну потужність гармонік, додаткову потужність частотних перетворень у складі канонічних складових, знакозмінні складові частотних перетворень неканонічного порядку.

**Ключові слова:** формула ціни, споживана електроенергія, енергопроцеси, ефективна потужність.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В настоящее время в стоимость электроэнергии включаются лишь отдельные компоненты энергопроцесса – активная и обменная (реактивная) мощность. Нелинейные искажения и вызываемая ими мощность высших гармоник в тарифах не учитываются, а на режим энергопотребления устанавливаются нормативы в виде допустимых показателей.

Потребители промышленного, бытового секторов и др., преобразовывающие при своей работе электрическую энергию в другие виды, вносят из-за своих физических свойств нелинейные искажения токов и напряжения. С целью технического и математического обоснования этих процессов введено понятие качества преобразования энергии, отличающееся от

качества электроэнергии вообще тем, что оценивает влияние искажающих факторов по показателям потребляемой мощности – постоянного ее значения и знакопеременных составляющих [1–3].

Отсутствие нормативов на искажающие компоненты входного тока отдельных потребителей ставит предприятия в положение, при котором они только косвенно заинтересованы в улучшении качественных характеристик энергопроцессов путем установки пассивных или активных фильтров, компенсаторов реактивной мощности и др. [4–6].

Существующий подход не стимулирует потребителя к повышению качества преобразования энергии. Это объясняется во многом существующим математическим аппаратом, не позволяющим учитывать все

составляющие энергопроцессов. Возможность по-компонентного учета характеристик энергопроцесса любой сложности появляется при использовании теоретической базы мгновенной мощности.

Целью данной работы является обоснование целесообразности нового подхода к вопросу ценообразования за потребляемую электрическую энергию при наличии нелинейных искажений в напряжении и токе для учета влияния на энергопроцесс переменных составляющих мгновенной мощности.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Термин «формула цены» стал обыденным после начала интенсивного использования газа во всех странах мира. Возник вопрос о цене на газ. Была сформулирована цена на основании так называемой тепловой эквивалентности единицы газовой субстанции и единицы объема нефти. Особенности этого вопроса в настоящее время существенно обострились в связи с тем, что затрагивают экономические интересы целого ряда стран мира. Механизм, как указано выше, держится на зависимости, определенной научными и техническими работниками нефтегазовой промышленности, и функционируют несмотря на ряд очевидных недостатков, заложенных в самом начале возникшей проблемы. Некоторое сходство наблюдается при тарификации платежей за использованную электрическую энергию.

В чем-то по своей сложности, а порой и неопределенности складывается непростая картина формирования ценовой политики при использовании электроэнергетики. Подходы в данном направлении неоднозначны и не могут быть однозначными в связи с тем, что до настоящего времени фактически не создана общая теория энергопроцессов, в особенности в тех направлениях, где затрагиваются вопросы оценки качественных характеристик процесса преобразования энергии [6–8]. Как показывает анализ, в отдельных случаях в основе концепций, затрагивающих формализацию картины энергопроцессов, положены не совсем корректные представления, затрагивающие весьма чувствительные аспекты измерения параметров электроэнергетики, ее учета и т.д.

Косвенно этими, а также другими специфическими вопросами можно объяснить неослабевающий интерес к тарифной политике.

Ценовой сектор использования электроэнергии затрагивает деятельность трех субъектов хозяйственной деятельности – генерирующей, распределительной системы и потребителя. Если не касаться стоимости электроэнергии в периоды ограничений (утренний и вечерний максимумы) и избытка мощностей (в ночное время), то действуют устанавливаемые правила одно- или двухставочного тарифа.

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

Количественные показатели потребляемой мощности оцениваются счетчиками электрической энергии, определяющими количество энергии, пере-

шедшей от энергосистемы к потребителю.

Несмотря на большое количество модификаций учетных систем, просматривается тенденция к повышению уровня их интеллектуализации, точности и расширения функциональных возможностей, однако в их математическую базу закладываются те представления об энергопроцессах, которые сложились в 20–30-е годы прошлого столетия.

Технический прогресс в области преобразования энергии, средств управления преобразовательными устройствами, приборостроения и, прежде всего, измерительной техники создали хорошую базу 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 направления в этом отношении сформулированы в работах [9–13]. 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 параметров электрооборудования по характеристикам энергетических режимов и др., существенного внимания использованию теории мгновенной мощности в задачах энергоучета до настоящего времени не уделялось.

Правилom, представляющим направление развития и совершенствования систем учета, должна быть вполне очевидная необходимость учета всех составляющих мощности – параметров энергетического режима [3].

При определении параметров энергопроцессов за основу берется система аксиоматических положений:

- анализируются непосредственно сигналы, характеризующие энергопроцесс, – в нашем случае зависимость мощности во времени;

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

- теоретические вопросы энергопроцессов могут использоваться и при анализе энергопроцессов физических объектов с иными, чем в электрических цепях, процессами 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 не применяются [14–16]. При анализе сигналов мгновенной мощности неизбежно требуется оценка составляющих, в разной степени определяющих 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 и 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 имеет свою цену, предположительно, с учетом всех компонент, входящих в качестве составляющих 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 за использованную энергию. 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 мере расширения использования достаточно эффективного осветительного оборудования, которое, наряду с высокой светоотдачей, имеет неудовлетворительные характеристики в части сдвига первой гармоники тока относительного напряжения, искажения кривой потребляемого из сети тока и др. В результате исследований энергетических режимов потребителей с преимущественно осветительной нагрузкой обнаружены уровни гармоник тока сети до 15–35 % от действующего значения первой гармоники при угле сдвига тока относительно напряжения до  $\pi/3$ .

Следует сказать при этом, что существующие нормы не ограничивают коэффициент искажения тока потребителя. 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 установленного противоречия этой базы закону сохранения;

- стоимость аппаратуры для измерения параметров энергетического режима, очевидно, будет выше в случае использования расчетного механизма с другой, отличной от существующей, математической базой. Это превышение стоимости может быть существенным, с одной стороны, вызовет необхо-

димость усложнения расчетных механизмов, хотя, несомненно, делает их более прозрачными.

С учетом сказанного выше понятно, что фундаментом для создания расчетного за электроэнергию механизма должны быть понятные, формализованно оцененные показатели с вполне очевидными факторами, негативно влияющими в целом на энергопроцесс. В качестве примера рассмотрим существующее в литературе понятие мощности искажения [1, 3], равное произведению эффективных значений разностотных компонент гармоник напряжения и тока. Если оценка влияния может быть оценена процентным содержанием указанных компонент, то очевидно, что равноценны составляющие мощности, например,  $P_1 = U_5 I_7$ ;  $P_2 = U_3 I_{11}$  и т.д., если равноценен удельный вес  $P_1$  и  $P_2$ . В то же время ясно, что влияние разностотных гармоник мощности на оборудование и энергетику совершенно неодинаково, поэтому оправданно знание не весовой функции мощности искажения, а каждой из составляющих мощности, которая определяет энергопроцессы в целом.

Наиболее точно отображает энергопроцессы в цепях с периодическими сигналами мгновенная мощность, равная произведению временных зависимостей напряжения и тока [3, 16, 17]:

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

Метод мгновенной мощности в плане рассматриваемого вопроса включает комплекс оценок, в том числе среднее и эффективное значения мощности:

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \sum_{k=0}^{k=\infty} P_{k0}; \quad (2)$$

$$P_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}. \quad (3)$$

Уравнение (1) в полной мере описывает временную зависимость мощности на интервале усреднения. Как следует из (2), (3), мгновенная мощность

включает активную мощность  $P_0 = \sum_{k=0}^{k=\infty} P_{k0}$  в форме

суммы активных мощностей одноименных гармоник напряжения и тока:

$$\sum_{k=0}^{k=\infty} P_{k0} = \sum_{k=0} U_n I_m \cos \varphi_{m,n},$$

а также знакопеременные синусные и косинусные составляющие – косинусные  $P_{ka}$  и синусные  $P_{kb}$ :

$$P_{ka}(t) = U_n I_m \cos k\Omega t; \quad P_{kb}(t) = U_n I_m \sin k\Omega t.$$

Между эффективным значением мощности  $P(t)$  и  $P_0$  существует следующая зависимость [15, 17]:

$$P_3 = \sqrt{P_0^2 + \frac{1}{2} \sum P_{ka}^2 + \frac{1}{2} \sum P_{kb}^2}. \quad (4)$$

По существу  $P_3$  – среднеквадратическое значе-

ние мощности на интервале повторяемости процессов, что в корне отличает эффективную мощность  $P_3$  от полной мощности  $S$ , равной произведению эффективных значений напряжения и тока. Как будет показано ниже, отличие между  $P_3$  и  $S$  не только в математической интерпретации этих величин, но – и это главное – понятие полной мощности, приемлемое для анализа процессов с гармоническими сигналами, оказывается неприемлемым при анализе полигармонических сигналов ввиду несоответствия его закону сохранения [19].

Произведение эффективных значений напряжения  $U_3$  и тока  $I_3$  обычно именуют полной мощностью, а иногда – кажущейся мощностью. По

формальным признакам полная мощность является произведением эффективных значений или, другими словами, оценок (среднеквадратичных значений анализируемых величин) временных зависимостей напряжения и тока, однако формализованных признаков или оценок мощности по существу не имеет.

Оценки той или иной временной зависимости мощности могут быть получены на основании анализа имеющегося или получаемого на основании экспериментальных данных выражения.

Затрагиваемые вопросы анализа энергопроцессов достаточно полно рассмотрены рядом авторов, а направления развития методов анализа энергетических режимов и, в особенности, научного и практического применения получаемых результатов ясны из приведенной классификации (рис. 1).

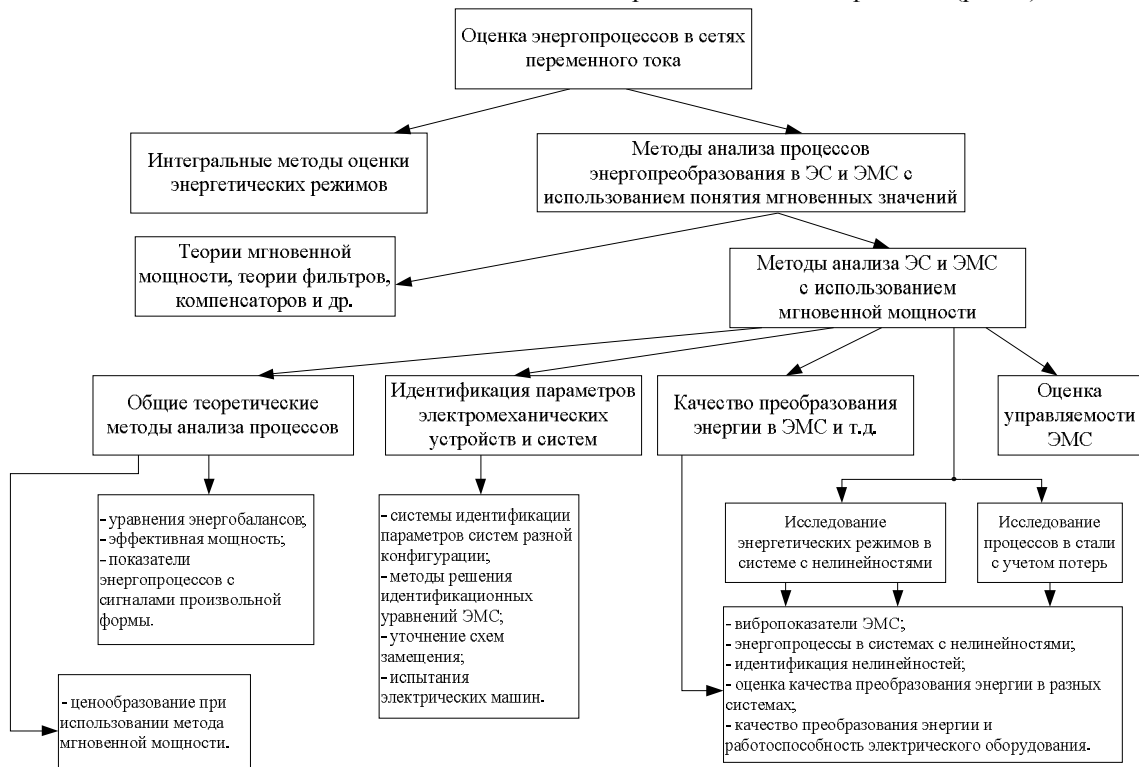


Рисунок 1 – Классификация направлений исследований с использованием мгновенной мощности

Очевидным развитием является стремление расширить положения мгновенной мощности на одну из центральных проблем электрификационного процесса – проблему адекватной ценовой политики, выступающей в форме обоснования тарифов на электроэнергию и ее составляющие. Особенно важными представляются вопросы учета негативных последствий, вызванных нелинейными искажениями напряжения и тока.

Попытка вводить тарифные элементы на мощность искажений, по существу, не дала результатов, тем более что базой для нее были формализованные представления полной мощности.

На рис. 2 представлена диаграмма значений тарифных ставок за использованную активную мощность, фрагменты которой частично или полностью

используются в практике хозрасчетных механизмов. При этом имеются различные уровни стоимости кВт часа активной мощности от времени суток: времени ограничения потребителя энергии в часы вечернего и утреннего максимумов, регламентированного тарифа, времени льготного режима с минимальной стоимостью тарифа в ночное время и др. При этом подобная тарификация в значительной мере связана со стремлением стабилизировать энергетическую нагрузку на генерирующие объекты, работающие максимально эффективно при мало меняющейся мощности во времени. Льготный тариф иногда устанавливается с целью увеличения минимальной загрузки генерирующих станций.

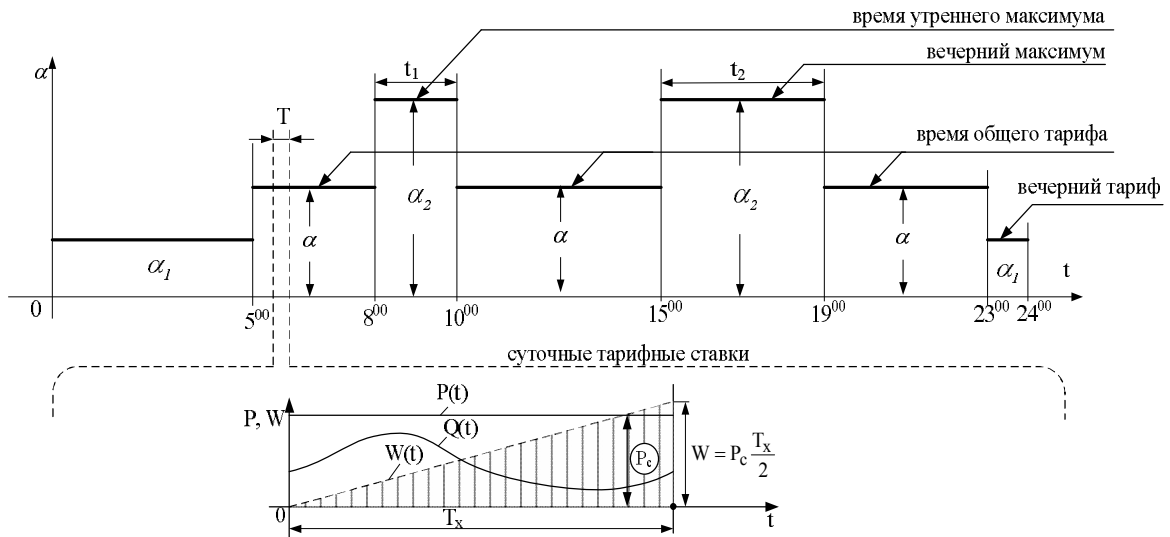


Рисунок 2 – Таблица возможных тарифных ставок за время суток

В основе тарифной ставки, как правило, находят-ся экономические аспекты, а также те формализованные представления, которые закладываются при формировании двухставочных и иных тарифов. Сформированные понятия – те или иные аспекты, отражающие уровень знаний, теорию энергетических процессов, например, те представления, которые вытекают из интегральных подходов к оценке параметров энергетических процессов. Здесь речь идет о составляющих полной, или кажущейся, мощности – активной мощности  $P$  и реактивной составляющей  $Q$  полной мощности, связанных известными зависимостями:

$$P = U_n I_m \cos \varphi; \quad Q = U_n I_m \sin \varphi; \\ S = U_n I_m; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – угол сдвига между напряжением и током;  $U_n, I_m$  – действующие значения напряжения и тока.

Из вышесказанного понятен смысл двухставочного тарифа (ставки тарифа за активную мощность  $\alpha$  и ставки за реактивную мощность  $\beta$ ) или одноставочного тарифа, при котором оплата осуществляется только за активную мощность.

В данном исследовании не касаемся уровней тарифа (обычного, максимального или льготного), а затрагиваем основополагающие решения, лежащие в основе принципов формирования двух- и многоставочных тарифов в понятиях учета тех составляющих мощности, которые входят в качестве фундамента в конкретную теорию энергопроцессов. С учетом отмеченного, на рис. 2 выделим лишь участок длительностью во времени  $T$ , на котором энергопроцесс сохраняет оговариваемые нами свойства процесса: неизменность частоты питающего напряжения, неизменные уровни действующих значений напряжения и тока и их синусоидальность.

Отмеченное выше связано и с более широким спектром вопросов тарификации, где кроме формализованного понятия некачественности в форме угла сдвига между напряжением и током могут присутствовать другие гармоники тока и напряжения, вызванные разными искажающими факторами и др.

Одноставочные тарифы на электроэнергию сформировались в тридцатые годы в основном в связи с бурной электрификацией, характеризующейся использованием бытового оборудования с линейными характеристиками, отсутствием проявления гармоник тока и т.п.

Энергия в сети переменного тока определяется известной зависимостью путем интегрирования на интервале  $T$ :

$$W_{\Sigma} = \int_0^T P(t) dt = \int_0^T U_n I_m \cos \varphi dt. \quad (6)$$

И при неизменном уровне  $P(t) = P_0 T$

$$W_{\Sigma} = T U_n I_m \cos \varphi. \quad (7)$$

Реактивная энергия, непосредственно связанная с реактивной мощностью:

$$W_Q = \int_0^T Q(t) dt = \int_0^T U_n I_m \sin \varphi dt; \quad (8)$$

$$W_Q = T U_n I_m \sin \varphi = T Q_0.$$

Здесь отметим, что мощность  $P_0$  – среднее значение мощности за период переменного напряжения;  $Q$  – значение реактивной мощности за период переменного напряжения, определяемой тем или иным путем анализа параметров энергопроцесса [20–24].

С учетом ранее отмеченного, для платы за пользование электроэнергией запишем выражение для двухставочного тарифа следующим образом:

$$C_{\Sigma} = \alpha P_0 T + \beta Q_0 T = T(\alpha S \cos \varphi + \beta S \sin \varphi). \quad (9)$$

В более удобной форме записи:

$$C_3 = TS(\alpha \cos \varphi + \beta \sin \varphi) \quad (10)$$

На рис. 3, b представлена діаграма складових потужностей гармонічних складових  $P$  і  $Q$ , формують повну потужність в відповідності з кутом  $\varphi$ .

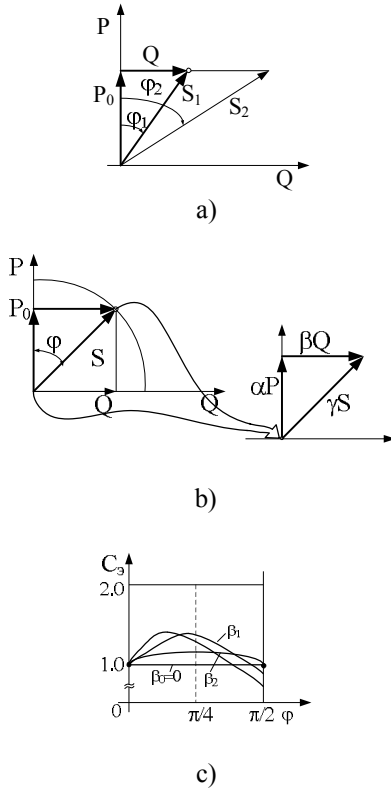


Рисунок 3 – Діаграми потужностей (a, b) і крива вартості електроенергії (c)

Формально параметри  $\alpha$  і  $\beta$  можуть бути якими угодно, в том числі і рівними друг другу. В кінцевому ітогу вони зависят від конкретних технічних характеристик енергоснабжаючої установки, хоча слідуеть відзначити, що зазвичай  $\alpha \gg \beta$  (рис. 3).

С урахуванням того, що  $P$  і  $Q$  в квадраті образуют  $S$ , уместно задати питання стосовно того, правильно чи визначається плата за електроенергію в формі сумми (9) показувачів енергопроцеса, ніяк не значенням їх корня квадратного. Це питання непрямо пов'язане з іншим, більш важливим: правильно чи формула ціни в разі двохставочного тарифа і якою вона повинна бути при більш складних картинах енергопроцесів?

Енергопроцес характеризується показувачами, визначаєми при використанні інтегральних методів оцінки, активною потужністю, реактивною і повною:

$$S^2 = P^2 + Q^2.$$

В разі оплати електроенергії при використанні двохставочного тарифа використовуються два показувачі:

$$C_3 = T(\alpha P + \beta Q) = f(P, Q).$$

Третій показувач – повна потужність – не використовується при формуванні ціни, хоча приведена залежність однозначно визначає зв'язок між складовими потужностями. Це, несомненно, є недоліком існуючого підходу при визначенні ціни. Введемо показувачі  $\alpha, \beta, \lambda$  в вираження для повної потужності:

$$\gamma^2 S^2 = \alpha^2 P^2 + \beta^2 Q^2.$$

Пусть  $\alpha = \beta$  і кожен з цих коефіцієнтів визначає удільну вартість кВт·ч і кВАР·ч складових енергопроцеса. Тоді  $\gamma^2 S^2$  визначає суму квадратів компонент оплати при використанні електроенергії. Очевидно, що  $\gamma^2 S^2$  відповідає квадрату вартості електроенергії  $C_3$ . Цей підхід дозволило включити в вартість електроенергії всі три компоненти електричного режиму. Тоді

$$C_3^2 = T^2(\alpha^2 P^2 + \beta^2 Q^2), \text{ или } C_3 = T\sqrt{\alpha^2 P^2 + \beta^2 Q^2}.$$

При  $\alpha = \beta$  і постійному значенні  $S$  ( $UI = const$ ) плата за електроенергію буде мати одну і ту ж величину при зміні кута  $\varphi$  (рис. 3).

Аналізуючи отриманий результат, можна побачити, що  $C_3 = \gamma S$  в умовах прикладу не змінюється по величині при  $\varphi = var$ , в той час як  $C_3$  по двохставочному тарифу, маючи рівні значення  $C_{31} = \gamma P$  при  $\varphi = 0$  і  $C_{32} = \beta Q$  при  $\varphi = \pi/2$ , буде мати максимум при  $\varphi = \pi/4$ . Отриманий результат показує необґрунтованість сумми (10) як бази для формування розрахункової тарифної бази. Сказане справедливо для будь-яких відношень між  $\alpha$  і  $\beta$ , ілюстрацією чому будуть трикутник потужностей і трикутник тарифних ставок (рис. 3, b). При цьому, в залежності від  $\alpha$  і  $\beta$ , трикутник тарифних ставок деформується, зберігаючи енергетичну і фінансову адекватність при

$$\gamma = \frac{\alpha^2 P^2 + \beta^2 Q^2}{P^2 + Q^2}.$$

Основним результатом, отримуваним в ході аналізу, є те, що в математичну інтерпретацію формули ціни включені всі показувачі енергопроцеса, що відрізняється від тієї інтерпретації, яка характерна для існуючого тарифа. Показано, що залежність в формі сумми складових за активну і реактивну потужність не відповідає реальному розрахунковому механізму.

Відзначене є наочною ілюстрацією помилковості визначати  $C_3$  шляхом хоча і косвенного, але все ж суммування показувачів енергопроцеса ( $P$  і  $Q$ ). По формальним ознакам визначаєма операція з показувачами процесу повинна відповідати самому процесу. Це співвідношення записується аналогічно формулі ціни за електро-

енергию и зависимостям, характеризующим энерго-процесс. Это условие выглядит так:

$$\begin{aligned} C_{\Sigma} &= TS\sqrt{\alpha^2 \cos^2 \varphi + \beta^2 \sin^2 \varphi} = \\ &= \alpha TS \cos \varphi \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2} \operatorname{tg}^2 \varphi} = \\ &= C_{\Sigma P} \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2} \operatorname{tg}^2 \varphi}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $C_{\Sigma P} = \alpha TS \cos \varphi$  – плата за активную мощность по двухставочному тарифу.

Здесь выполнен анализ формулы цены для гармонических сигналов применительно к показателям энергопроцессов, получаемых на основании интегральных методов. Это, как указывалось, является настоящим состоянием затронутой проблемы. Следует отметить, что настоящий подход позволил получить достаточно значимые результаты, полученные учеными и научными работниками в предшествующие годы в вопросах развития проблемы энергоучета как в научном, так и техническом плане.

Полученный нами результат, несомненно, отличается от того, который получается при суммировании показателей энергопроцессов. Заслуживает, несомненно, внимания оценка той погрешности, которая вносится в результат энергоучета при использовании, по существу, ошибочной теоретической базы. Определенное оправдание этому факту в том, что техническое осуществление устройств энергоучета с использованием формулы цены на интегральных критериях, несомненно, проще, чем в нашем случае, из-за наличия в формуле цены операции умножения, деления и извлечения корня.

Следует особо отметить вопрос, затронутый выше, – о недопустимости операции сложения показателей с чисто познавательной позиции, когда на второй план уходят такие вопросы, как ошибка учета и сложности технической реализации.

Правильное, научно обоснованное толкование научных результатов в будущем может оказаться более плодотворным, чем вопросы и практические результаты, получаемые с учетом каждого возможного уточнения ранее сделанных теоретических выводов и практического применения оборудования, подвергшегося усовершенствованию.

Исходя из сказанного, определяем выражение для формулы цены, в каких бы теоретических оформлениях она не определялась: путем оценки значения корня квадратного из составляющих показателей энергопроцесса – значения активной составляющей мощности, реактивной компоненты, а также тех, которые определенным образом ответственны за влияние на упомянутый процесс высших гармонических, таких, как компонент мощности, так и самой анализируемой функции:

$$C_{\Sigma} = T \sqrt{\alpha^2 P^2 + \beta^2 Q^2 + \sum_{k=2}^{k=\infty} \gamma_n^2 P_k^2}, \quad (12)$$

где  $\gamma_n$  – коэффициент, учитывающий воздействие или влияние на энергопроцесс  $k$ -той составляющей мощности.

Показатель  $k$  определяется в соответствии с особенностями частотных преобразований составляющих мощности, исходя из произведения гармонических напряжения порядка  $n$  и тока порядка  $m$ , что достаточно полно изложено в [15, 16].

Здесь дополнительно подчеркнем, что зависимость означает лишь принципиальную сторону вопроса – необходимость определения стоимости затрат в форме среднеквадратического значения суммы компонент (составляющих) мощности с соответствующими коэффициентами, но не суммы упомянутых компонент.

Относительно возможности применения (9) к полигармоническим сигналам следует отметить то, что, во-первых, выражение вообще неприменимо к таким понятиям, как мощность искажения, по причинам, которые будут сформулированы ниже.

Отдельно, ввиду возможности получения значимых результатов, рассмотрим вопрос формулы цены с позиции положений мгновенной мощности [7, 12]. При мгновенных значениях напряжения  $U(t)$  и тока  $I(t)$ :

$$U(t) = \sqrt{2} U_n \cos \Omega t;$$

$$I(t) = \sqrt{2} I_m \cos(\Omega t - \varphi).$$

Выражение для мгновенной мощности будет:

$$\begin{aligned} P(t) &= U(t)I(t) = \\ &= U_n I_m (\cos \varphi + \cos \varphi \cos 2\Omega t + \sin \varphi \sin 2\Omega t) = \\ &= P_0 + P_a(t) + P_b(t), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $P_0 = U_n I_m \cos \varphi$ ;  $P_a(t) = U_n I_m \cos \varphi \cos 2\Omega t$ ;  $P_b(t) = U_n I_m \sin \varphi \sin 2\Omega t$ .

В отличие от интегрального метода оценки энергетических процессов, когда не определяется эффективное значение мощности, но определяется полная мощность  $S$  как произведение эффективных значений напряжения и тока  $S = U_{\Sigma} I_{\Sigma}$ , при использовании методов мгновенной мощности определяется эффективное значение ее как корень квадратный:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_0 + P_a(t) + P_b(t))^2 dt} = \\ &= \sqrt{P_0^2 + \frac{1}{2} P_a^2 + \frac{1}{2} P_b^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

На рис. 4 представлены диаграммы составляющих мощности  $P_0$ ;  $P_a$ ;  $P_b$ , иллюстрирующие энергопроцесс при прямом анализе сигнала  $P(t)$ . Характерно при этом, что  $P_0$ ,  $P_a$ ,  $P_b$  образуют пространственную фигуру – параллелепипед – с диагональю, равной эффективному значению мгновенной мощности.

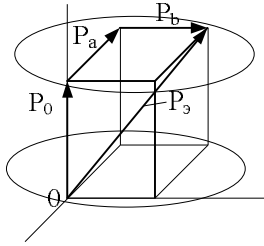


Рисунок 4 – Диаграммы мощностей с использованием понятия мгновенной мощности

При анализе энергопроцессов через мгновенную мощность в случае гармонических сигналов выражение для нее имеет вид:

$$P(t) = P_0(1 + \cos 2\Omega t + tg\varphi \sin 2\Omega t),$$

где  $P_0 = U_n I_m \cos \varphi$ ;  $tg\varphi = \sin \varphi / \cos \varphi$ .

Эффективное значение мощности получим путем интегрирования зависимости  $P(t)$ :

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} = S \cos \varphi \sqrt{\left(\frac{3}{2} + tg^2 \varphi \frac{1}{2}\right)}. \quad (15)$$

Формула цены вытекает из приведенного выражения для эффективной мощности:

$$C_{\text{Э}} = T S \cos \varphi \sqrt{(\alpha'^2 P^2 + \beta'^2 tg^2 \varphi)}. \quad (16)$$

Уравнение, как видно, практически идентично (11). В отличие от приведенных ранее уравнений, иными, естественно, будут значения коэффициентов  $\alpha'$  и  $\beta'$ . В этом случае

$$\alpha' = \alpha \sqrt{\frac{3}{2}}; \quad \beta' = \beta \frac{1}{2}.$$

Существенно сложнее выглядят энергопроцессы с несинусоидальными напряжением и током. Далее покажем недопустимость при анализе этих процессов полной, или кажущейся, мощности как обоснованной базы для получения как оценок процессов, так и определения возможности формулы цены. Полная мощность, согласно классическим представлениям, равна произведению эффективных значений напряжения и тока:

$$S = U_{\text{Э}} I_{\text{Э}},$$

которые, в свою очередь, определяются зависимостями

$$U_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_n(t))^2 dt} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}; \quad (17)$$

$$I_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_m(t))^2 dt} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_m^2}.$$

Выполнив очередные преобразования, выражения для  $S$  запишем таким образом:

$$S = \sqrt{\sum_{1(m=n)}^{m,n} (U_n^2 I_m^2 + U_2^2 I_2^2 + \dots + U_n^2 I_m^2) + \sum_{1,2(m \neq n)}^{m,n} (U_n^2 I_m^2)}. \quad (18)$$

Любое из слагаемых первой части выражения (12) можно представить в форме полной мощности для соответствующей гармоники

$$S_i^2 = U_{ni}^2 I_{mi}^2 = P_{0i}^2 + Q_i^2, \quad (19)$$

где  $P_{0i}$ ,  $Q_i$  – активная и реактивная мощность  $i$ -той

гармоники напряжения и тока.

С учетом этого замечания, зависимость для (17) будет иметь вид:

$$S = \sqrt{\sum_{1(m=n)}^{m,n} (P_{01}^2 + P_{02}^2 + \dots + P_{0n}^2) + \sum_1^{m,n} (Q_1^2 + Q_2^2 + \dots + Q_n^2) + \sum_{1,2(m \neq n)}^{m,n} (U_n^2 I_m^2)}. \quad (20)$$

Из полученного выражения следуют такие выводы:

- входящие в (17)–(20) выражения напряжения и тока  $U_n I_m$  – скалярные величины, полученные соответствующим образом при использовании операции интегрирования для определения эффективных значений из временных зависимостей напряжения и тока. Сказанное указывает на то, что на периоде питающего напряжения при существующем подходе к оценке энергопроцессов значения  $S$ ,  $Q$ ,  $P$  неизменны. Это противоречит известным положениям о том, что мгновенная мощность в указанном интервале является переменной величиной;

- активная мощность гармоник всегда суммируется арифметически, но не в форме суммы квадратов. Это положение не соответствует фундаментальным законам электротехники, что указывает на недопустимость использования (19) как противоречащего закону сохранения. Соответствующее можно сказать и о реактивной мощности;

- составляющая в (20) для  $m \neq n$  определяет так называемую мощность искажений, которая не дает представления о характере энергопроцесса. Напрямую она не может быть мерой некачественности энергопроцесса.

Приведенные выше доводы указывают на необходимость при определении формулы цены исходить из временных зависимостей – составляющих мощности. Такой подход требует уяснения некоторых особенностей формирования сигналов мгновенной мощности.

На рис. 5 представлены два возможных варианта определения параметров мгновенной мощности. Один из них (рис. 5) заключается в получении произведения  $U(t)I(t)$ , дальнейшего гармонического анализа с помощью блока  $\Phi(\omega)$ , определения составляющих мощности  $P_k(t)$ , определения эффективного значения мощности  $P_{\text{Э}}$ ; второй реализуется путем измерения тока и напряжения, разложения их в тригонометрический ряд и последующего покомпонентного умножения для получения составляющих мгновенной мощности  $P_k(t)$ . Конечным результатом являются в первом и втором случаях эффективное значение мгновенной мощности  $P_{\text{Э}}$ . Результаты в обоих случаях одинаковы, однако во втором случае имеется возможность выполнить анализ процесса формирования составляющих мгновенной мощности  $P_k(t)$ , что является важным ввиду того, что анализ частотных преобразований позволяет наиболее полно учесть все особенности процесса.



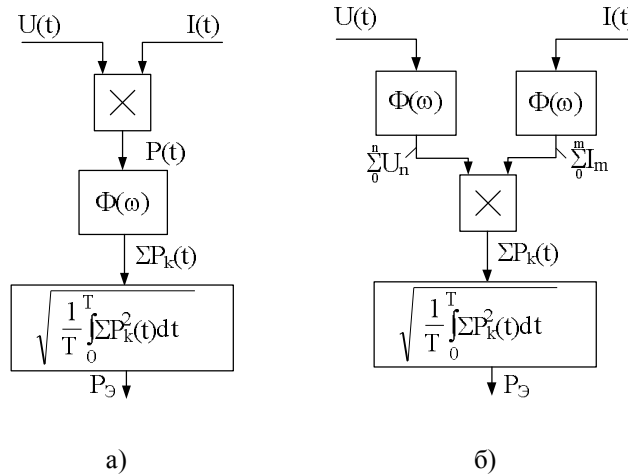


Рисунок 5 – Варианты измерения и оценки параметров мгновенной мощности: а) при непосредственном измерении мощности  $P(t)$ ; б) при раздельном определении гармоник напряжения и тока

Эти особенности при несинусоидальных токах и напряжениях достаточно сложны, что следует из общей зависимости для мгновенной мощности: активной, знакопеременной активной, обменной, или реактивной, дополнительной от частотных энергетических преобразований, образующих в совокупности канонические составляющие, или компоненты, а также неканонические компоненты в форме результата разночастотных преобразований [3, 7].

При этом в основу классификации составляющих положены известные положения: постоянная составляющая мгновенной мощности, или активная мощность, формируется только теми составляющими напряжения и тока, частоты которых одинаковы; реактивная, или обменная, составляющая мгновенной мощности формируется только из одночастотных компонент напряжения и тока, частоты которых одинаковы; реактивная составляющая мгновенной мощности формируется только при наличии

фазового сдвига между этими компонентами; знакопеременная активная мощность является результатом энергетического взаимодействия напряжения и тока одинаковых частот; дополнительной канонической компоненты от частотных преобразований напряжения и тока разных частот, арифметически складывающейся с компонентами знакопеременной активной и реактивной мощности, но не являющейся обменной мощностью; знакопеременных неканонических компонент, формируемых произведениями напряжения и тока разных частот.

На рис. 6 приведена диаграмма формирования составляющих мгновенной мощности в зависимости от относительных частот гармонических напряжения и тока  $m$  и  $n$ . По этому признаку выделены канонические составляющие ( $m = n$ ) и неканонические ( $m \neq n$ ). Первые из них создают активную мощность  $K = m - n = 0$ , и переменные синусные и косинусные – составляющие мощности, а вторые – знакопеременные неканонические.

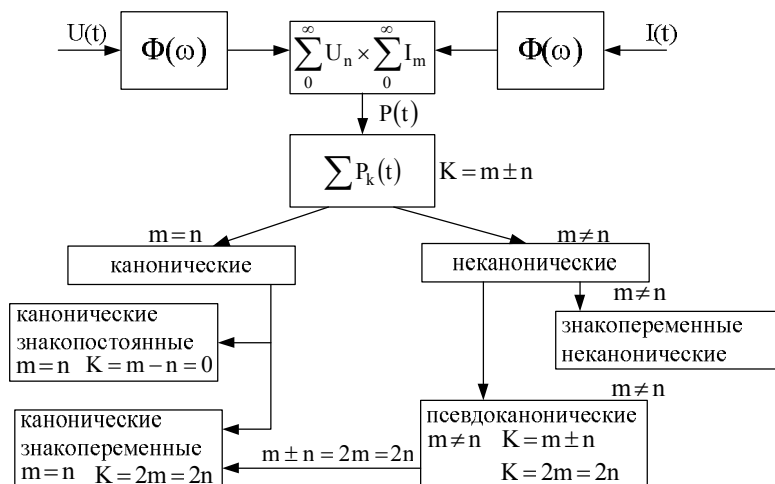


Рисунок 6 – Диаграмма формирования составляющих мгновенной мощности

Заслуживают внимания неканонические составляющие порядка  $K_1 = m + n$  и  $K_2 = m - n$ , которые при  $m \neq n$  образуют составляющие с частотами  $k_1$  и  $k_2$ , которые равны по частоте каноническим составляющим.

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 неканоническими составляющими. Это является причиной дополнительного вредного влияния знакопеременных составляющих мгновенной мощности на потребителя.

Таблица составляющих мгновенной мощности, приведенная для иллюстрации сказанного и рис. 7, показывает наличие следующих компонент:

$$P(t) = P_{k0\Sigma} + \Sigma P_{kac\Sigma}(t) + \Sigma P_{kbc\Sigma}(t) + \Sigma P_{kacs\Sigma}(t) + \Sigma P_{kbc\Sigma}(t) + \Sigma P_{kas\Sigma}(t) + \Sigma P_{kbs\Sigma}(t); \quad (21)$$

- нулевая составляющая мгновенной мощности (активная мощность) для всех гармоник;
- $P_{kac\Sigma}$  – суммарное значение косинусных канонических составляющих (индексы  $a$  и  $c$ );
- $P_{kbc\Sigma}$  – суммарное значение синусных составляющих;
- $P_{kacs\Sigma}$  – суммарное значение косинусных компонент неканонического порядка, сум-

мирующегося с канонической косинусной  $k$ -го порядка;

- $P_{kbc\Sigma}$  – суммарное значение синусных компонент неканонического порядка;
- $P_{kas\Sigma}$  – суммарное значение неканонических косинусных составляющих  $k$ -го порядка;
- $P_{kbs\Sigma}$  – суммарное значение неканонических синусных составляющих  $k$ -го порядка.

Общая картина формирования составляющих мощности представлена на диаграмме (рис. 7), где усеченные ряды напряжения  $U_n$  и тока  $I_m$  включают гармоники 1, 3, 5, 7...  $n$ . Произведения одноименных составляющих  $U_1I_1; U_3I_3; \dots U_nI_n$  соответствуют вертикальным линиям, и как результат – получение канонических составляющих  $P_{kc}$  мощности с частотами 0, 2; 0, 6; 0, 10; 0, 14... 0, 2 $n$ . Неканонические составляющие  $P_{ks}$  получены в результате умножения разночастотных компонент усеченных рядов  $U_nI_m$ , в результате чего частоты выходных сигналов равны, соответственно,  $K = m \pm n$ , чему соответствуют значения относительных частот 2, 4; 4, 10; 6, 8...(7+ $n$ ), ( $n$ -7). Штрихпунктирными линиями представлены составляющие, совпадающие псевдоканонические 2, 6, суммирующиеся с каноническими гармониками, образованными от произведений  $U_1I_1$  и  $U_3I_3$ . На диаграмме показана лишь часть тех возможных произведений, которые получаются в результате всех комбинаций – произведений  $U_nI_m$ .

Таблица 1 – Составляющие мгновенной мощности

Наименование составляющих мощности	Соотношение частот	Обозначение		Обозначение суммарных величин	
Канонические	$m = n$ ; $K = m - n$	$P_0$		$P_{0\Sigma}$	
Канонические знакопеременные	$m = n$ ; $K = 2m = 2n$	$P_{kac}$	$P_{kbc}$	$P_{kac\Sigma}$	$P_{kbc\Sigma}$
Псевдоканонические знакопеременные	$m \neq n$ ; $K = m \pm n$ ; $K = 2m = 2n$	$P_{kacs}$	$P_{kbcS}$	$P_{kacs\Sigma}$	$P_{kbcS\Sigma}$
Неканонические знакопеременные	$m \neq n$ ; $K = m \pm n$ ; $K \neq 2m \neq 2n$	$P_{kas}$	$P_{kbs}$	$P_{kas\Sigma}$	$P_{kbs\Sigma}$

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:

- 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  $U(t)$  и  $I(t)$ ;

- 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.

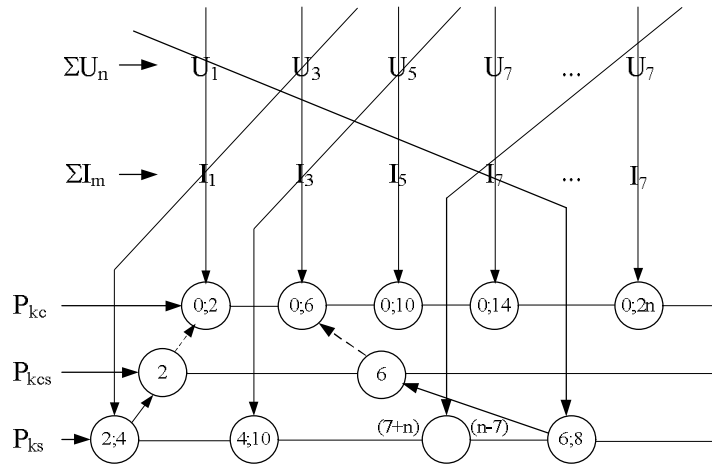


Рисунок 7 – Диаграмма взаимодействия напряжения и тока при формировании составляющих мгновенной мощности:  $P_{kc}$  – канонические составляющие;  $P_{ks}$  – неканонические составляющие;  $P_{kcs}$  – псевдоканонические составляющие

Рассмотрим несколько путей решения задачи:

– определяется формула цены с учетом активной и реактивной мощности гармоник напряжения и тока одинаковой частоты. При этом учитываются составляющие высокочастотных преобразований в форме дополнительных компонент мощности неканонического порядка;

– определяется формула цены с учетом указанной дополнительной составляющей к компонентам канонического порядка;

– определяется формула цены с учетом всех компонент, входящих в выражение мгновенной мощности.

Учет значительного числа компонент мгновенной мощности означает не что иное как переход к многоставочному тарифу, базирующемуся на учете всей гаммы особенностей энергетического процесса, причем характерно, что упомянутые особенности фактически могут быть привязаны к каждой частотной составляющей мгновенной мощности. При этом, в отличие от имеющегося в литературе понятия мощности искажения, в нашем случае в качестве компоненты платы за электроэнергию может быть включена составляющая, обусловленная особо негативным влиянием какой-то конкретной гармоники мгновенной мощности, причем необязательно канонического порядка.

Рассмотрим случай учета мощности гармоник лишь гармонического порядка. При этом можно рассматривать процесс, состоящий лишь из мгновенной мощности гармоник канонического порядка

$$P_{\Sigma}(t) = P_1(t) + \dots + P_i(t), \quad (22)$$

где  $P_i(t) = U_{mi} I_{ni} \cos \varphi_i (1 + \cos 2\Omega_i t + \operatorname{tg} \varphi_i \sin 2\Omega_i t)$ .

Обозначив  $U_{m1} I_{n1} \cos \varphi_1 = \alpha_1$  и

$U_{mi} I_{ni} \cos \varphi_i = \alpha_i$ , получим

$$P_{\Sigma}(t) = \alpha_1 + \dots + \alpha_i + \alpha_1 \cos 2\Omega_1 t + \dots + \alpha_i \cos 2\Omega_i t + \alpha_1 \sin 2\Omega_1 t \operatorname{tg} \varphi_1 + \dots + \alpha_i \sin 2\Omega_i t \operatorname{tg} \varphi_i. \quad (23)$$

При этом  $P_0 = \alpha_1 + \dots + \alpha_i$ .

Эффективное значение мощности при этом будет

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_{\Sigma}^2(t) dt} = P_0 \sqrt{1 + \frac{\alpha_1^2 + \dots + \alpha_i^2}{2P_0^2} + \frac{\alpha_1^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_1 + \dots + \alpha_i^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_i}{2P_0^2}}. \quad (24)$$

С учетом полученного выражения, формула цены приобретет вид:

$$C_{\text{Э}} = TP \times \sqrt{\alpha \left( 1 + \frac{\alpha_1^2 + \dots + \alpha_i^2}{2P_0^2} \right) + \beta \left( \frac{\alpha_1^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_1 + \dots + \alpha_i^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_i}{2P_0^2} \right)}. \quad (25)$$

Из полученных выражений вытекает известное положение о том, что активная мощность определяется арифметической суммой постоянных значений мощности отдельных взятых гармоник, переменные составляющие обменной мощности представляют собой совокупность гармоник мощности канонического порядка, причем амплитуда упомянутых гармоник пропорциональна тангенсу угла сдвига между одночастотными компонентами напряжения и тока; эффективное же значение реактивной мощности определяется из суммы квадратов составляющих:

$$Q_{\text{Э}} = \sqrt{\alpha_1^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_1 + \dots + \alpha_i^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_i} = \sqrt{Q_1^2 + \dots + Q_i^2}. \quad (26)$$

В случае, если необходим учет и дополнительных компоненты для канонических составляющих, выражение для суммарного значения  $P_{\Sigma}(t)$  будет

$$P_{\Sigma}(t) = \alpha_1 + \dots + \alpha_i + \alpha'_{ia} \cos 2\Omega_i t + \dots + \alpha'_{ia} \cos 2\Omega_i t + \alpha'_{ib} \sin 2\Omega_i t \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \dots + \alpha'_{ib} \sin 2\Omega_i t \cdot \operatorname{tg} \varphi_i, \quad (27)$$

где  $\alpha'_j = \frac{P_{kacsj}}{U_{mj} I_{nj} \cos \varphi_j} + 1$ ;  $\alpha'_i = \frac{P_{kacsi}}{U_{mi} I_{ni} \cos \varphi_i} + 1$ .

Дальнейшие преобразования приводят к результату, полученному ранее, с той разницей, что в выражениях вместо  $\alpha_j$  следует поставить выражение для  $\alpha'_{ia}$  и  $\alpha'_{ia}$ ,  $\alpha'_{ib}$  и  $\alpha'_{ib}$ , предварительно определив значения  $P_{kacs1} \dots P_{kacsi}$ ,  $P_{kbcsl} \dots P_{kbcsi}$  как разницу между составляющими мощности, определенными путем прямого измерения  $P(t)$  и составляющими, вычисленными через компоненты напряжения и тока.

Как следует из (22)–(25), при анализе учтены только три составляющие мгновенной мощности: активная, знакопеременные активные и реактивные составляющие. Более сложный анализ позволяет выделить те компоненты мгновенной мощности, которые образованы гармониками напряжения и тока разных частот. Этот вопрос ввиду специфики и сложности в данной работе не рассматривается, хотя можно отметить следующее важное обстоятельство. Знакопеременные составляющие мощности, являющиеся в значительной степени результатом частотных преобразований энергопроцесса, в большей мере характеризует качество преобразования энергии отдельными потребителями, чем общей цепи. Это обстоятельство заслуживает внимания и по той причине, что энергопроцесс в плоскости взаимодействия электрических сигналов, что рассмотрено выше, не является единственным в цепи многократно преобразования энергии, если упомянутую цепь рассматривать состоящей из статического преобразовательного устройства, электромеханического преобразователя, передаточного механизма, рабочей машины. Анализ этих процессов в совокупности позволяет несколько по-иному рассматривать ценовое содержание пользования электроэнергией. Экономия энергопроцессов при этом рассматривается как эффект суммарного плана, включающий энергетическую часть (плата за электроэнергию и ее снижение), а также технологическую в форме снижения затрат на ремонт электромеханического и технологического оборудования из-за повышения качества преобразования энергии. Этот вопрос при этом, видимо, в дальнейшем станет приоритетным.

**ВЫВОДЫ.** Наиболее точная оценка показателей энергопроцессов возможна только с использованием положений теории мгновенной мощности.

Объективная ценовая составляющая энергопроцесса может быть получена с учетом всех его компонент. Это положение подтверждает недостаточное обоснование формулы двухставочного тарифа.

Формула цены, учитывающая все компоненты мгновенной мощности, в сочетании с характеристиками производственных механизмов позволяет вы-

явить особо значимые некачественности процесса преобразования энергии и найти пути, устраняющие их.

#### 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. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентиляционных преобразователей. – Новосибирск: изд-во Новосиб. ун-та, 1990. – 220 с.
3. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами. Часть 2. Определение и использование показателей энергетических режимов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 106–115.
4. Родькин Д.И. Актуальные вопросы теории и практики энергоресурсосберегающих электромеханических систем // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – Вип. 3/2008 (50), част. 1. – С. 8–17.
5. 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.
6. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Тугай Д.В. Система составляющих полной мощности и энергетических коэффициентов на основе р-q-г теории мощности // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2004. – Част. 1. – С. 69–74.
7. Родькин Д.И., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническими напряжениями и токами // Электротехника. – 2004. – № 6. – С. 37–42.
8. Родькин Д.И. Энергосбережение – как закономерный этап электрификации народного хозяйства // Проблемы создания новых машин и технологий: научные труды КГПУ. – Вып. 1/2000 (8). – Кременчук: КГПУ, 2000. – С. 177–183.
9. Nabai Akira, Tanaka Toshihko. A New Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Iss. 11, № 3. – PP. 1238–1244.
10. Kim H.S., Akagi H. The Instantaneous Power Theory on the Rotating p-q-r Reference Frames // In Proc. IEEE / PEDS'99 Conf., Hong Kong, 1999, July. – PP. 422–427.
11. Kim H.S., Ogasawara S., Akagi H. The Theory of Instantaneous Power in Three-phase Four-wire Sys-

tems: A Comprehensive approach // In. Proc. IEEE/IAS'99 Annu. Meeting. Oct. 1999. – PP. 431–439.

12. Родькин Д.И. Декомпозиция составляющих мощности полигармонических сигналов // Электротехника. – 2003. – № 6. – С. 34–37.

13. Родькин Д.И. Оценка составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов // Электроинформ. Экоинформ. – Киев, 2003. – № 3. – С. 13–15.

14. Загирняк М.В., Родькин Д.И., Коренькова Т.В. Анализ процессов преобразования энергии в электромеханическом комплексе // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Кременчук, 2012. – Вип. 3/2012 (19) – С. 30–36.

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 електропривода. 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 // Электромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2013. – Вип. 1/2013 (21). – С. 8–21.

17. Калинов А.П., Лейко В.В., Родькин Д.И. Спектральный анализ мгновенной мощности в сети с полигармоническим напряжением и током // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – Кременчук: Кременчуцький державний політехнічний

університет, 2006. – Вип. 3/2006 (38), част. 2. – С. 59–72.

18. Родькин Д.И., Коренькова Т.В. Энергетический метод анализа управляемости электромеханических систем // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 2/2010 (10). – С. 8–16.

19. 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.

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

21. Сюсюкин А.И. К вопросу об уплате (надбавках) за реактивную электрическую энергию // Промышленная энергетика. – 2001. – Вып. 9. – С. 53–55.

22. Осика Л.К. Оплата за реактивную электроэнергию – важная составляющая рыночных отношений в энергетике // Промышленная энергетика. – 2002. – № 6. – С. 23–28.

23. Дерзский В.Г., Скиба В.Ф. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков, 2009. – № 6. – С. 31–34.

24. Владимиров Ю.В., Смилянский И.И. О методике расчетов оплаты за перетоки реактивной электроэнергии между энергетической организацией и потребителями // Энергетика и электрификация. – 2002. – № 11. – С. 17–21.

25. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы. – М.: Мир, 1988. – 336 с.

## THE PRICING FORMULA FOR ELECTRICITY IN NETWORKS WITH PERIODIC VOLTAGE AND CURRENT

**D. Rodkin**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: saue@kdu.edu.ua

Directions of theoretical and practical issues related to the instantaneous power of the electrical signals are in a number of works of the author. The lack of work involving especially energy accounting within the assessment of energy processes at polyharmonic voltages and currents have been noted. The accounting and calculation of energy in these conditions differ substantially from those that occur when the signals are sinusoidal. Found that electricity price should be formed taking into account the entire complex of energy processes indicators, i.e. with power components defined by one or another way. Depending on the theoretical base which is laying by a mathematical apparatus, which is determined on the basis for electricity payment, should be implemented some concept - the pricing formula for electricity. In this formulation the question becomes for the first time. In this research shows incorrect definition of price components of existing approaches, not only for polyharmonic signals, but also for sinusoidal, since pricing formula under two-part tariff is based on the concept of total or apparent power. It is shown that the proposed pricing formula can account for all of its components using the mathematical concepts of instantaneous power i.e. active and reactive harmonic power in the sum and separately by components, alternating active harmonic power, additional power of frequency transformation, consisting in the canonical components, alternating power of frequency transformation, consisting in the non-canonical components.

**Key words:** the pricing formula, electricity consumption, energy processes, the effective power.

### REFERENCES

1. Rodkin, D.Y. (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. Zinoviev, G.S. (1990), *Pryamyie metody rascheta energeticheskikh pokazateley* [Direct calculating methods of the rectifier converters energy performance], Publishing Novosibirsk University, Novosibirsk.

(in Russian)

3. Rodkin, D.Y. (2005), "Commentary on the energy processes theory with polyharmonic signals. Part 2. The definition and use of indicators of the energy modes", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 3, no. 32, pp. 106–115. (in Russian)

4. Rodkin, D.Y. (2008), "Actual questions energy-saving theory and practice of electromechanical systems", *Visnyk KDPU*, Vol. 3, no. 50, pp. 8–17. (in Russian)

5. Zhemerov, G.G. and Tugay, D.V. (2004), "Instantaneous and average active and reactive power in linear circuits with sinusoidal voltage", *Problems of automated electric. Theory and practice*, no. 43, pp. 153–160. (in Russian)

6. Zhemerov, G.G., Krylov, D.S. and Tugay, D.V. (2004), "System of components full power and energy coefficient based on p-q-r-power theory", *Technical Electrodynamics, Special Issue. Problems of modern electronics*, pp. 69–74. (in Russian)

7. Rodkin, D.J., Byalobrzheskiy, A.V. and Lomonos, A.I. (2004), "Energy processes indicators in the circuit with harmonic voltages and currents", *Electrotehnika*, no. 6, pp. 37–42. (in Russian)

8. Rodkin, D.Y. (2000), "Energy saving - as a natural stage of the national economy electrification", *Problems of creating new machines and technologies*, Vol. 1, no. 8, pp. 177–183. (in Russian)

9. Nabai, Akira and Tanaka, Toshihko (1996), "A New Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, no. 3, pp. 1238–1244.

10. Kim, H.S. and Akagi, H. (1999), "The Instantaneous Power Theory on the Rotating p-q-r Reference Frames", *In Proc. IEEE/PEDS'99 Conf*, pp. 422–427.

11. Kim, H.S., Ogasawara, S. and Akagi, H. (1999), "The Theory of Instantaneous Power in Three-phase Four-wire Systems: A Comprehensive approach", *In Proc. IEEE/IAS'99*, pp. 431–439.

12. Rodkin, D.Y. (2003), "Decomposition power components polyharmonic signals", *Electrotehnika*, no. 6, pp. 34–37. (in Russian)

13. Rodkin, D.Y. (2003), "Evaluation of the instantaneous power component polyharmonic signals", *Elektroinform. Ekoinform*, no. 3, pp. 13–15. (in Russian)

14. Zagirnyak, M., Rodkin, D. and Korenkova, T. "Analysis of energy conversion processes in electromechanical complex", *Electromechanichni i energozberigajuchi systemy. Special issue "Problems of*

*automated electric. Theory and practice*"», Vol. 3, no. 19, pp. 30–36. (in Russian)

15. Zagirnyak, M., Rodkin, D., Chorni, O. 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", *Electromechanichni i energozberigajuchi systemy*, Vol. 1, no. 21, pp. 8–21. (in Russian)

17. Kalinov, A.P., Leyko, V.V. and Rodkin, D.J. (2006), "Spectral instantaneous power analysis in the network with polyharmonic voltage and current", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 3, no. 38, pp. 59–72. (in Russian)

18. Rodkin, D. and Korenkova, T. (2010), "Energy analysis method of electromechanical systems control", *Electromechanichni i energozberigajuchi systemy*, Vol. 2, no. 10, pp. 8–16. (in Russian)

19. Rodkin, D. (2010), "On the inconsistency some theory of the energy processes to Telledzhen's theorem", *Problemy avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika*, Vol. 28, pp. 127–135. (in Russian)

20. Zorin, V.V. (2004), "To the payment question for reactive power", *Technicheskaya elektrodinamika*, Vol. 1, pp. 68–72. (in Russian)

21. Siusiukin, A.I. (2001), "On the question of payment (allowances) for reactive energy", *Promyshlennaya energetika*, Vol. 9, pp. 53–55. (in Russian)

22. Osika, L.K. (2002), "Payment for reactive power - an important component of market relations in the energy", *Promyshlennaia energetika*, Vol. 6. (in Russian)

23. Derskiy, V.G. and Skiba, V.F. (2009), "Activities Choice to reduce energy losses in distribution networks", *Energoberezhenie, energetika, energoaudit*, Vol. 6. (in Russian)

24. Vladimirov, Yu.V. and Smilyanskiy, I.I. (2002), "About the calculation methodology of payment for reactive power flows between energy companies and consumers", *Energetika i elektrifikatsiya*, Vol. 11. (in Russian)

25. Sibert, U.M. (1988), *Tsepi, signaly, sistemy* [Circuits, Signals, Systems], Mashinostroenie, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 11.08.2014.