

УДК 621.65:004.183

## ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОСТАВЛЯЮЩИХ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ

**М. В. Загирняк, Д. И. Родькин, Т. В. Коренькова**

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

Уточнен подход к декомпозиции мгновенной мощности полигармонических сигналов на базе анализа процессов частотного преобразования ортогональных составляющих напряжения и тока. Показано, что порядок гармоник мощности определяется суммой и разностью частот гармонических составляющих исходных сигналов. Отмечено значение процессов энергопреобразования первого и второго рода при формировании составляющих мгновенной мощности несинусоидальных сигналов. Предложен математический аппарат и диаграммы формирования канонических, неканонических и псевдоканонических компонент мгновенной мощности при различном гармоническом составе напряжения и тока. Доказан эффект усиления знакопеременной составляющей мощности ввиду совпадения частот канонических и псевдоканонических компонент. Предложены показатели энергопроцессов на базе эффективных значений мгновенной мощности и ее компонент. Показано, что на энергетический режим влияют не только амплитудные значения гармоник напряжения или тока, но и комбинация частот, формирующих спектр гармонических составляющих исходных сигналов.

**Ключевые слова:** процессы энергопреобразования, энергетический режим, мгновенная мощность, полигармонический сигнал, эффективная мощность, показатели энергопроцессов.

## ОЦІНКА ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СКЛАДОВИХ МИТТЕВОЇ ПОТУЖНОСТІ

**М. В. Загірняк, Д. Й. Родькін, Т. В. Коренькова**

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

Уточнено підхід до декомпозиції миттєвої потужності полігармонічних сигналів на базі аналізу процесів частотного перетворення ортогональних складових напруги й струму. Показано, що порядок гармонік потужності визначається сумою й різницею частот гармонічних складових вихідних сигналів. Відзначено значення процесів енергоперетворення першого й другого роду при формуванні складових миттєвої потужності несинусоїдальних сигналів. Запропоновано математичний апарат і діаграми формування канонічних, неканонічних і псевдоканонічних компонент миттєвої потужності при різному гармонічному складі напруги й струму. Доведено ефект посилення знакозмінної складової потужності через збіг частот канонічних і псевдоканонічних компонент. Запропоновано показники енергопроцесів на базі ефективних значень миттєвої потужності й її компонент. Показано, що на енергетичний режим впливають не лише амплітудні значення гармонік напруги або струму, але й комбінація частот, що формують спектр гармонічних складових вихідних сигналів.

**Ключові слова:** процеси енергоперетворення, енергетичний режим, миттєва потужність, полігармонічний сигнал, ефективна потужність, показники енергопроцесів.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В связи с интенсивным развитием и внедрением преобразовательной техники, приводящей к искажению формы кривых напряжения и тока, актуальными стали вопросы определения мощности и показателей оценки энергоэффективности систем с несинусоидальными процессами. Для решения такого рода задач в теории энергопроцессов существуют различные методы определения мощности и ее составляющих на базе интегральных оценок мощности, различных методов эквивалентизации, гармонического анализа формы кривых напряжения и тока и т.д. [1–5].

До сих пор для определения энергетической эффективности систем переменного тока широко применяются понятия полной (кажущейся) мощности, ее активной и реактивной составляющих [1–3], которые относятся к категории расчетных интегральных величин, представляющих собой усредненные за период колебаний мощности значения. Однако использование этих величин обосновано при анализе энергопроцессов только в системах с синусоидальными сигналами. Распространение такого подхода на несинусоидальные процессы, как правило, не раскрывает физическую сущность явлений и приводит к неоднозначным результатам. Известные

способы эквивалентизации [2, 3], приводящие несинусоидальную (нелинейную) систему к эквивалентной синусоидальной (линейной), не являются универсальными и применимы только при незначительных отклонениях формы кривых напряжения и тока от синусоидальной.

Системы с несинусоидальными напряжением и током характеризуются сложными энергообменными процессами между источником и потребителем, накопителями разного рода, которые различаются как по частоте колебаний мощности и ее амплитуде, так и по направлению составляющих потоков энергии. Исследования показали, что в системах с несинусоидальными сигналами даже в случае наиболее элементарного потребителя (активного сопротивления) спектр образуемых гармоник мощности значительно шире спектра гармоник исходных сигналов напряжения и тока [5, 6]. При работе системы на сложный потребитель, представляющий собой активный потребитель с индуктивным и (или) емкостным накопителем, процессы энергопреобразования еще более усложняются: кроме внешнего (между источником и потребителем) происходит внутренний энергообмен (между накопителями, накопителями и активным сопротивлением).

С учетом сказанного, энергетические процессы в системе с несинусоидальными сигналами целесообразно оценивать по кривой мгновенной мощности, что позволяет определять целый ряд составляющих мощности и их соотношения при любой форме кривых напряжения и тока [6–10]. Анализ показал, что теория мгновенной мощности достаточно широко используется в задачах компенсации реактивной мощности [7, 11–14], подавления высших гармоник тока, потребляемого преобразовательной системой из сети [11, 14], диагностики, мониторинга и оценки технического состояния электромеханических преобразователей [15, 16].

В связи с этим создание единой теоретической базы для получения составляющих мгновенной мощности, однозначно характеризующих процессы энергопреобразования в сложных системах, и формирование показателей энергопроцессов, основанных на оценках составляющих мгновенной мощности, является важнейшей научно-теоретической и научно-практической задачей. Здесь следует отметить, что принципы и механизмы получения составляющих мгновенной мощности должны быть едиными, независимо от физической природы исходных сигналов. Теория мгновенной мощности должна быть применима не только к электрическим объектам, но и к иным системам (механическим, гидравлическим и т.п.) при любой форме изменения анализируемых сигналов (гармонических и полигармонических, периодических и непериодических, одночастотных и разночастотных). При этом математической базой развития теории мгновенной мощности являются методы гармонического анализа составляющих мгновенной мощности.

Целью работы является систематизация подходов к декомпозиции мгновенной мощности полигармонических сигналов и определение показателей процессов энергопреобразования на базе среднеквадратичных оценок составляющих мгновенной мощности.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.**  
*Теоретические основы формирования составляющих мгновенной мощности.*

Пусть некоторая условная электрическая цепь (рис. 1) включает элементарный источник питания  $U_1, U_2, \dots, U_n$  и потребитель, представленный экви-

валентной нагрузкой  $R_e$ . От каждого из источников соответствующей круговой частоты  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$  проходит электрический ток, равный:  $I_1 = \frac{U_1}{R_e}$ ,

$I_2 = \frac{U_2}{R_e}, \dots, I_m = \frac{U_m}{R_e}$ . Предложенная совокупность

схем (рис. 1) может быть заменена обобщенной электрической цепью (рис. 2) с полигармоническим источником питания  $u(t) = \sum_{n=1}^N U_n(t)$  и несинусои-

дальным током  $i(t) = \sum_{m=1}^M I_m(t)$ , протекающим в нагрузочном контуре.

Используя известные методы математического анализа, напряжение  $u(t)$  и ток  $i(t)$ , представляющие собой полигармонические сигналы с периодом  $T$  и соответствующим фазовым сдвигом, могут быть аппроксимированы тригонометрическими рядами вида

$$u(t) = \sum_{n=1}^N U_n \cos(\Omega_n t - \varphi_n) = \sum_{n=1}^N U_{na} \cos(\Omega_n t) + \sum_{n=1}^N U_{nb} \sin(\Omega_n t); \tag{1}$$

$$i(t) = \sum_{m=1}^M I_m \cos(\Omega_m t - \psi_m) = \sum_{m=1}^M I_{ma} \cos(\Omega_m t) + \sum_{m=1}^M I_{mb} \sin(\Omega_m t). \tag{2}$$

В выражениях (1), (2)  $n, m$  – номера гармоник напряжения и тока, соответственно;  $N, M$  – число гармонических составляющих напряжения и тока;  $\varphi, \psi$  – фазовые углы сигналов напряжения и тока, соответственно;  $\Omega_n, \Omega_m$  – круговые частоты изменения сигналов напряжения и тока, соответственно;  $U_{na} = U_n \cos \varphi_n$ ;  $U_{nb} = U_n \sin \varphi_n$  – ортогональные косинусная и синусная составляющие сигнала напряжения;  $I_{ma} = I_m \cos \psi_m$ ;  $I_{mb} = I_m \sin \psi_m$  – ортогональные косинусная и синусная составляющие сигнала тока.

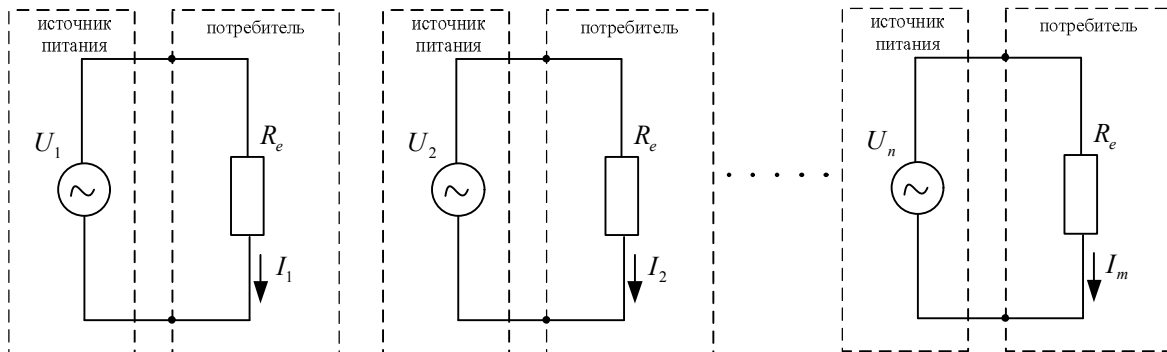


Рисунок 1 – Схемы включения элементарных источников питания на общую нагрузку

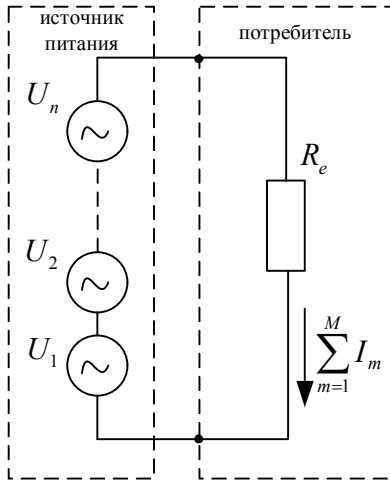


Рисунок 2 – Схема включения источника полигармонического питания на общую нагрузку

Механизм формирования ортогональных составляющих сигналов напряжения и тока отражает векторная диаграмма, приведенная на рис. 3.

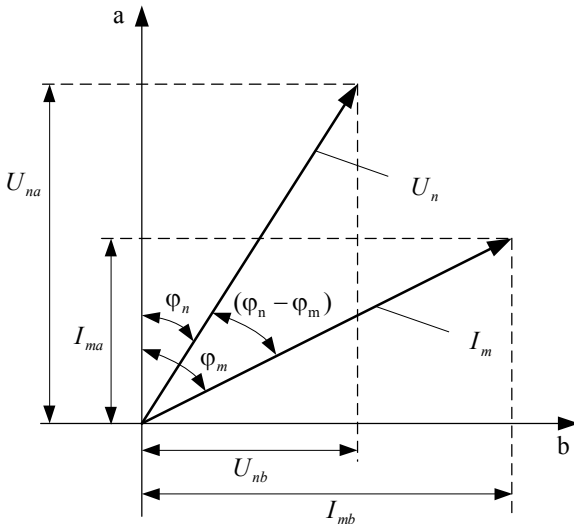


Рисунок 3 – Векторная диаграмма сигналов напряжения и тока

Параметром, наиболее полно характеризующим режим энергопотребления любого устройства или системы, является мощность, получаемая как произведение временных зависимостей напряжения и тока:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= u(t)i(t) = \\
 &= \sum_{n=1}^N U_n \cos(\Omega_n t - \varphi_n) \sum_{m=1}^M I_m \cos(\Omega_m t - \psi_m) = \\
 &= \left( \sum_{n=1}^N U_{na} \cos(\Omega_n t) + \sum_{n=1}^N U_{nb} \sin(\Omega_n t) \right) \times \\
 &\times \left( \sum_{m=1}^M I_{ma} \cos(\Omega_m t) + \sum_{m=1}^M I_{mb} \sin(\Omega_m t) \right). \quad (3)
 \end{aligned}$$

Выполнив преобразования, получим:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \frac{\sum_{n=1}^N U_{na} \sum_{m=1}^M I_{ma}}{2} [\cos((\Omega_n - \Omega_m)t) + \cos((\Omega_n + \Omega_m)t)] + \\
 &+ \frac{\sum_{n=1}^N U_{na} \sum_{m=1}^M I_{mb}}{2} [\sin((\Omega_n - \Omega_m)t) + \sin((\Omega_n + \Omega_m)t)] + \\
 &+ \frac{\sum_{n=1}^N U_{nb} \sum_{m=1}^M I_{ma}}{2} [\sin((\Omega_n - \Omega_m)t) + \sin((\Omega_n + \Omega_m)t)] + \\
 &+ \frac{\sum_{n=1}^N U_{nb} \sum_{m=1}^M I_{mb}}{2} [\cos((\Omega_n - \Omega_m)t) - \cos((\Omega_n + \Omega_m)t)]; \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \left( \frac{\sum_{n=1}^N U_{na} \sum_{m=1}^M I_{ma}}{2} + \frac{\sum_{n=1}^N U_{nb} \sum_{m=1}^M I_{mb}}{2} \right) \cos((\Omega_n - \Omega_m)t) + \\
 &+ \left( \frac{\sum_{n=1}^N U_{na} \sum_{m=1}^M I_{ma}}{2} - \frac{\sum_{n=1}^N U_{nb} \sum_{m=1}^M I_{mb}}{2} \right) \cos((\Omega_n + \Omega_m)t) + \\
 &+ \left( \frac{\sum_{n=1}^N U_{nb} \sum_{m=1}^M I_{ma}}{2} - \frac{\sum_{n=1}^N U_{na} \sum_{m=1}^M I_{mb}}{2} \right) \sin((\Omega_n - \Omega_m)t) + \\
 &+ \left( \frac{\sum_{n=1}^N U_{na} \sum_{m=1}^M I_{mb}}{2} + \frac{\sum_{n=1}^N U_{nb} \sum_{m=1}^M I_{ma}}{2} \right) \sin((\Omega_n + \Omega_m)t). \quad (5)
 \end{aligned}$$

Из выражения (5) видно, что компоненты мгновенной мощности формируются в результате достаточно сложных процессов частотного преобразования ортогональных составляющих исходных сигналов напряжения и тока. При этом спектр функции мгновенной мощности содержит гармоники, порядок которых определяется как разностью  $(\Omega_n - \Omega_m)$ , так и суммой  $(\Omega_n + \Omega_m)$  порядков гармоник напряжения и тока, т.е.  $\Omega_k = |\Omega_n \pm \Omega_m|$ .

Дальнейший анализ обуславливает необходимость введения ряда понятий [17]:

«одноименные» компоненты – предусматривают произведение только косинусных  $\sum_{n=1}^N U_{na} \sum_{m=1}^M I_{ma}$  или

только синусных  $\sum_{n=1}^N U_{nb} \sum_{m=1}^M I_{mb}$  составляющих напряжения и тока;

«разноименные» компоненты – произведение косинусных и синусных  $(\sum_{n=1}^N U_{na} \sum_{m=1}^M I_{mb}$  или

$\sum_{n=1}^N U_{nb} \sum_{m=1}^M I_{ma})$  составляющих исходных сигналов;

«одночастотные» компоненты мощности – составляющие, которые образованы сигналами напряжения и тока одного порядка или частоты ( $n = m$ ); в

теории обработки сигналов их принято называть каноническими гармониками;

«разночастотные» компоненты – составляющие, которые образованы исходными сигналами разных порядков ( $n \neq m$ ); такие сигналы именуют неканоническими гармониками.

С учетом сказанного, сигнал мгновенной мощности можно представить в виде:

$$p(t) = \sum_{k=1}^K P_{k0} + \sum_{k=1}^K P_{ka} \cos(\Omega_k t) + \sum_{k=1}^K P_{kb} \sin(\Omega_k t), \quad (6)$$

где  $\sum_{k=1}^K P_{k0}$  – суммарная постоянная составляющая

мгновенной мощности;  $\sum_{k=1}^K P_{ka}$  – суммарная коси-

нусная составляющая мгновенной мощности;

$\sum_{k=1}^K P_{kb}$  – суммарная синусная составляющая мгно-

венной мощности;  $\Omega_k$  – круговая частота k-ой гар-

моники мощности ( $\Omega_k = |\Omega_n \pm \Omega_m|$ ); K – число гар-

монических составляющих сигнала мощности.

При этом косинусные компоненты мгновенной мощности в выражении (6) образуются из произведения только одноименных (косинусных или синусных) составляющих напряжения и тока; синусные – путем произведения разноименных (косинусных и синусных или наоборот) ортогональных компонент исходных сигналов.

Дальнейший процесс анализа порядка гармонических составляющих мгновенной мощности представляется не менее важным и сводится к формированию компонент мощности при совпадении частот  $m = n$  напряжения и тока и при его отсутствии  $m \neq n$ .

Механизм формирования канонических (при  $n = m$ ) и неканонических (при  $n \neq m$ ) компонент мгновенной мощности полигармонических сигналов отражает схема, приведенная на рис. 4. Гармоники мощности, образуемые при перемножении одночастотных ( $m = n$ ) компонент напряжения и тока и называемые в дальнейшем каноническими, имеют порядок  $k'_c = 2m = 2n$  и  $k''_c = 0$ . При перемножении разночастотных ( $m \neq n$ ) составляющих формируются неканонические гармоники мощности порядка  $k'_s = m + n$  и  $k''_s = m - n$ . Составляющие мощности, канонические и неканонические, принципиально отличны друг от друга, что необходимо учитывать для правильной оценки энергопроцессов.

Применительно к системе с полигармоническим источником питания (рис. 2) канонические компоненты мощности  $P_{(1+1)}, P_{(1-1)}, P_{(2+2)}, P_{(2-2)}, \dots, P_{(m+n)}, P_{(m-n)}$  (рис. 4) определяются произведением  $U_1 I_1, U_2 I_2, \dots, U_n I_m$  (где  $n = m$ ) напряжения и тока источника одной частоты, а неканонические составляющие

$P_{(2+1)}, P_{(2-1)}, \dots, P_{(m+1)}, P_{(m-1)}, P_{(n+1)}, P_{(n-1)}, \dots, P_{(n+m)}, P_{(n-m)}$  – произведением  $U_1 I_2, U_2 I_1, \dots, U_n I_m$  (где  $n \neq m$ ) напряжения одного источника на ток другого. Рассматривая канонические и неканонические компоненты мощности с позиции теории энергопроцессов, следует отметить, что первые характеризуют процессы энергопреобразования между источником и потребителем, а вторые – энергообменные процессы между источниками разной частоты. При этом получаемый спектр гармоник мгновенной мощности оказывается гораздо шире спектра гармоник исходных сигналов и зависит от того, какие комбинации гармоник представлены в спектрах напряжения и тока. Анализ показал, что фактическое число гармоник мощности не менее, чем вдвое, больше числа гармоник напряжения и тока. Сказанное обусловлено влиянием источников разной частоты на энергообменные процессы в системе, что проявляется усилением переменных составляющих мгновенной мощности.

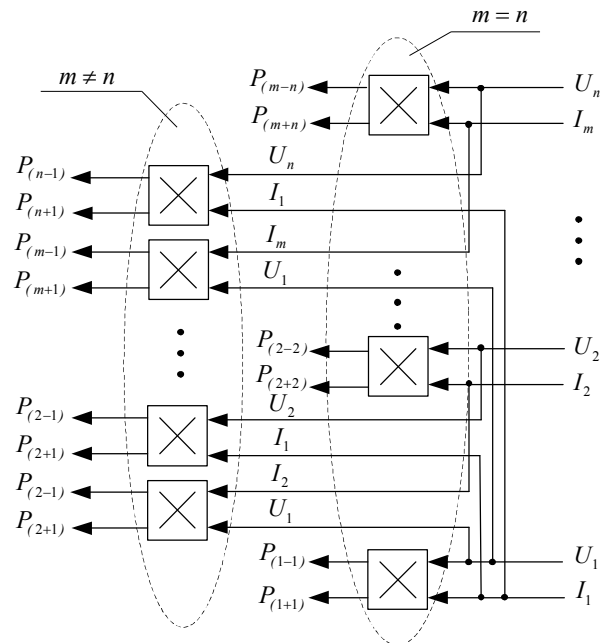


Рисунок 4 – Схема формирования составляющих мгновенной мощности в системе с полигармоническими сигналами

Таким образом, мгновенная мощность состоит из пяти компонент:

$$p(t) = \sum_{k=1}^K P_{k0} + \sum_{k=1}^K P_{kac}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kas}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbc}(t) + \sum_{k=1}^k P_{kbs}(t), \quad (7)$$

где  $\sum_{k=1}^K P_{k0}$  – суммарная постоянная составляющая

мгновенной мощности;  $\sum_{k=1}^K P_{kac}(t)$  – суммарная коси-

нусная составляющая мгновенной мощности кано-

нического порядка;  $\sum_{k=1}^K P_{kas}(t)$  – суммарная косинусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка;  $\sum_{k=1}^K P_{kbc}(t)$  – суммарная синусная составляющая мгновенной мощности канонического порядка;  $\sum_{k=1}^K P_{kbs}(t)$  – суммарная синусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка.

Из дальнейшего анализа следует, что при определенном гармоническом составе напряжения и тока возможны такие сочетания частот компонент мгновенной мощности, когда соблюдается равенство  $k'_c = k'_s$  или  $k''_c = k''_s$ . Тогда результирующие зависимости косинусной  $P_{kas\Sigma} = P_{kas} + P_{kaq}$  и синусной  $P_{kbs\Sigma} = P_{kbs} + P_{kbq}$  составляющих мгновенной мощности неканонического порядка могут включать две компоненты:

косинусную  $P_{kas}$  и синусную  $P_{kbs}$  составляющие неканонических гармоник мощности, порядок которых совпадает с определенными частотами канонических составляющих гармоник мощности (называемые в дальнейшем псевдоканоническими);

косинусную  $P_{kaq}$  и синусную  $P_{kbq}$  составляющие мгновенной мощности неканонического порядка (при отсутствии совпадения частот канонических и неканонических гармоник мощности).

Полученный результат означает, что некоторые компоненты мгновенной мощности из подмножества канонических и неканонических составляющих складываются арифметически, образуя суммарную косинусную  $P_{kas\Sigma} = P_{kas} + P_{kaq}$  и синусную  $P_{kbs\Sigma} = P_{kbs} + P_{kbq}$  компоненты канонического порядка, где  $P_{kas}$  и  $P_{kbs}$  – обменные составляющие мощности, отражающие энергетическое влияние разночастотных преобразований на процесс формирования мощности в результате произведения одночастотных компонент напряжения и тока. Отмеченное выше заслуживает особого внимания при решении таких задач, где требуется создание уравнений баланса гармонических мгновенной мощности (указанные суммы должны входить в качестве отдельных слагаемых в уравнения баланса).

Тогда, с учетом особенностей гармонического анализа мгновенной мощности, приведенного выше, в теории формирования составляющих мгновенной мощности следует различать процессы энергопреобразования первого и второго рода.

Процессы энергопреобразования первого рода заключаются в появлении канонических и неканонических компонент мгновенной мощности в результате одно- и разночастотных преобразований гармонических составляющих сигналов напряжения и тока. При этом получаемый спектр гармоник

мощности значительно шире спектров гармоник исходных функций напряжения и тока. Канонические составляющие мощности характеризуют процессы внешнего энергообмена между источником одной частоты и потребителем; неканонические гармоники – внутренние энергообменные процессы между реактивными элементами или источниками питания разной частоты.

Процессы энергопреобразования второго рода характеризуются сложными потоками внутреннего энергообмена, обусловленными энергетическим влиянием разночастотных преобразований компонент напряжения и тока на одночастотные. Сказанное приводит к усилению отдельных гармоник мощности канонического порядка в результате суммирования псевдоканонических и канонических гармоник мощности.

Диаграммы формирования гармонических составляющих мгновенной мощности, отражающие процессы энергопреобразования первого и второго рода, приведены на рис. 5–7.

Окончательно зависимость мгновенной мощности во временной области имеет вид:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{kac}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbc}(t) + \\
 &+ \sum_{k=1}^K P_{kas\Sigma}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbs\Sigma}(t) = \\
 &= \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{kac}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbc}(t) + \\
 &+ \left( \sum_{k=1}^K P_{kas}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kaq}(t) \right) + \left( \sum_{k=1}^K P_{kbs}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbq}(t) \right) = \\
 &= \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \left( \sum_{k=1}^K P_{kac}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kas}(t) \right) + \\
 &+ \left( \sum_{k=1}^K P_{kbc}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbs}(t) \right) + \sum_{k=1}^K P_{kaq}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbq}(t) = \\
 &= \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{kac\Sigma}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbc\Sigma}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kaq}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbq}(t).
 \end{aligned} \tag{8}$$

Систематизация подходов к декомпозиции мгновенной мощности отражена в табл. 1.

Следует отметить, что полученный теоретический результат приведен для исследования энергетических режимов в однофазной системе с полигармоническими сигналами напряжения и тока. Такой случай вполне реален, однако в практических задачах существенную роль имеют многофазные источники электропитания, где, например, применительно к трехфазной нагрузке, мгновенная мощность должна определяться в форме суммы мгновенных мощностей отдельно взятых фаз с учетом временного сдвига между соответствующими составляющими мощности. Окончательно процессы энергопреобразования в многофазной системе базируются на получении суммарных постоянной и знакопеременных (косинусной и синусной) составляющих, которые являются базовым материалом для последующей оценки параметров энергорежима.

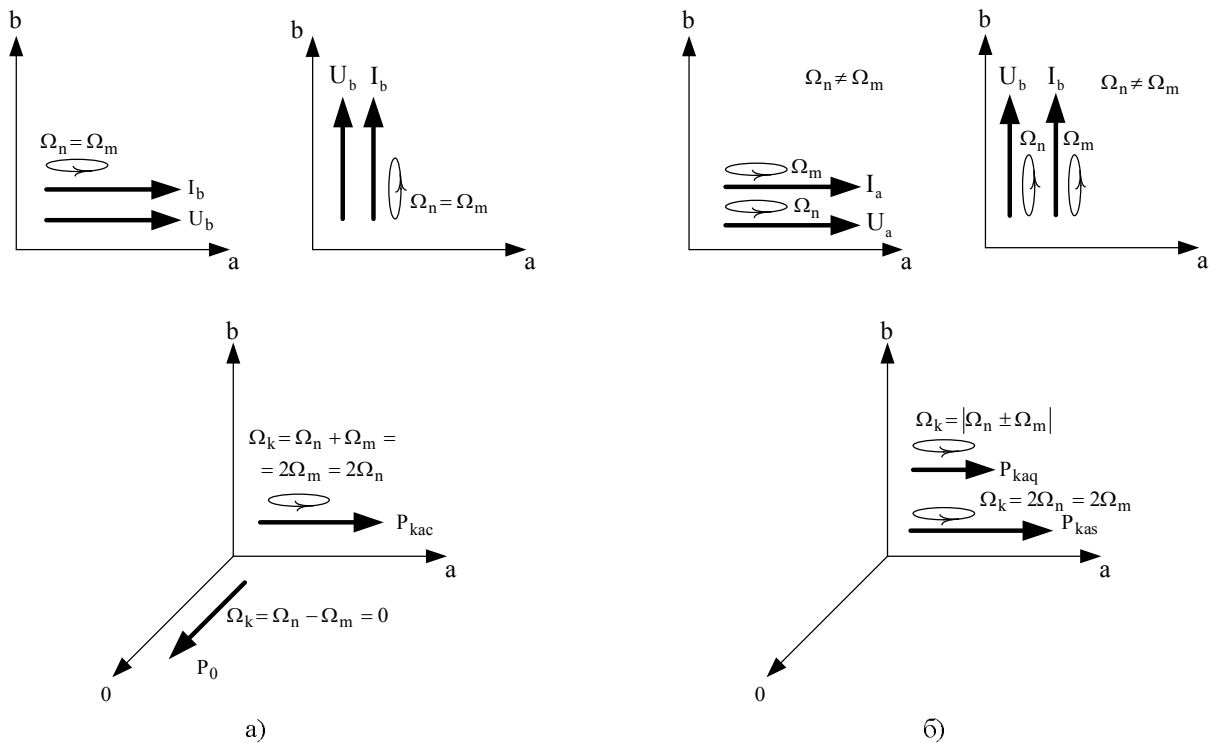


Рисунок 5 – Диаграммы формирования составляющих мгновенной мощности в результате частотных преобразований одноименных компонент напряжения и тока: одночастотных (а) и разночастотных (б)

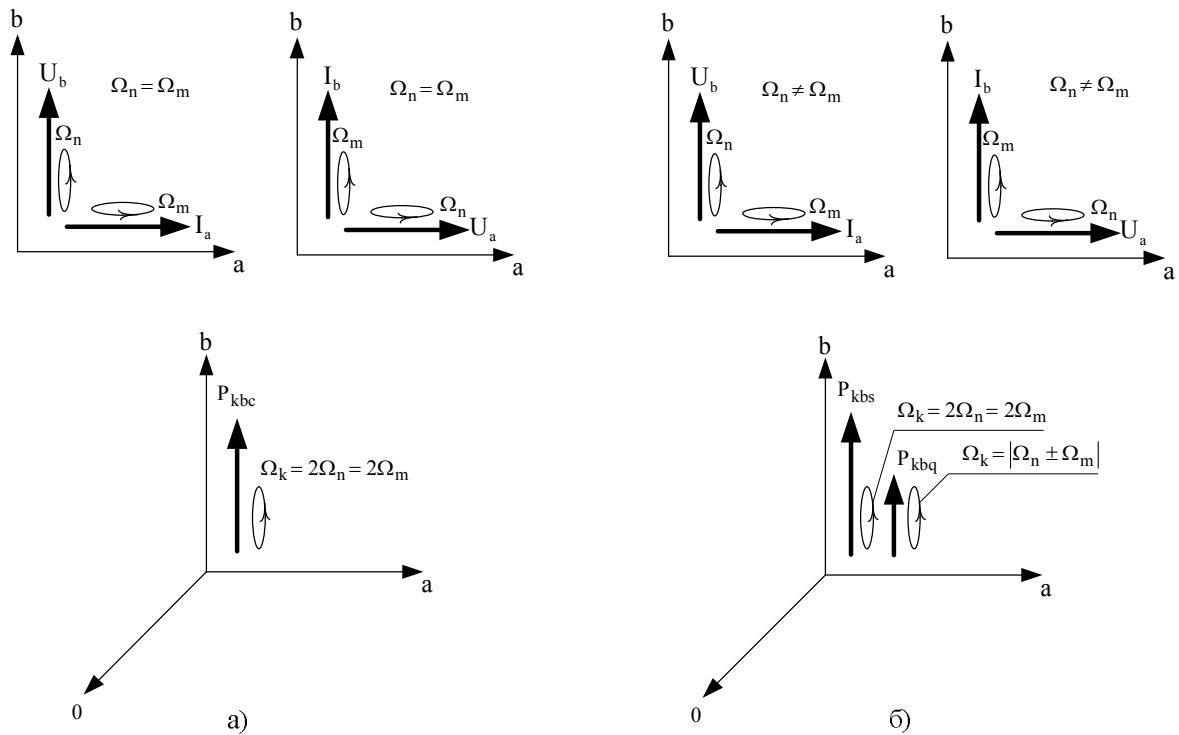


Рисунок 6 – Диаграммы формирования составляющих мгновенной мощности в результате частотных преобразований разноименных компонент напряжения и тока: одночастотных (а) и разночастотных (б)

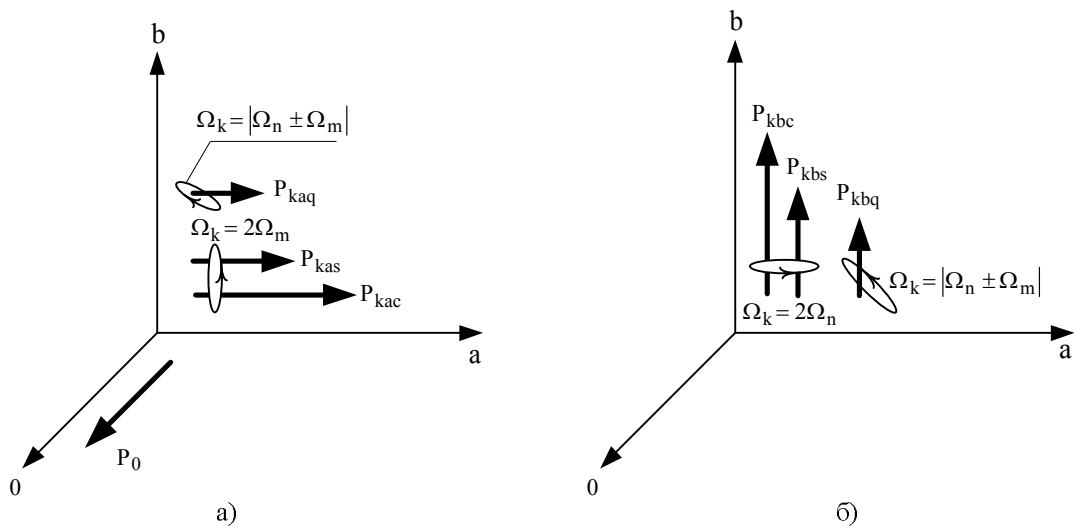


Рисунок 7 – Диаграммы формирования гармонических составляющих мгновенной мощности: косинусных (а); синусных (б)

Таблица 1 – Характеристика составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов

Наименование компоненты мгновенной мощности	Признаки, ограничения	Характеристика составляющих мощности
Постоянная составляющая мгновенной мощности	$n = m$ $k'_c = n - m = 0$	Активная мощность, рассеиваемая потребителем: $P_{k0\Sigma} = 0,5 \sum_1^{N,M} (U_{na} I_{ma} + U_{nb} I_{mb})$
<i>Канонические гармоники мощности</i>		
Знакопеременная косинусная составляющая мгновенной мощности канонического порядка	$n = m$ $k''_c = n + m = 2m = 2n$	Переменная составляющая активной мощности – обменная мощность между источником и потребителем (интегральное ее значение равно нулю): $P_{kac} = 0,5 \sum_1^{N,M} (U_{na} I_{ma} - U_{nb} I_{mb})$
Знакопеременная синусная составляющая мгновенной мощности канонического порядка		Реактивная мощность – обменная мощность между источником и потребителем (интегральное ее значение равно нулю): $P_{kbc} = 0,5 \sum_1^{N,M} (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma})$
<i>Неканонические гармоники мощности</i>		
Суммарная косинусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка	$n \neq m$ $k'_s = n + m$	Обменная мощность между источниками с разными частотами: $P_{kas\Sigma} = 0,5 \sum_1^{N,M} (U_{na} I_{ma} - U_{nb} I_{mb})$
Суммарная синусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка	$k''_s = m - n$	Обменная мощность между источниками с разными частотами: $P_{kbs\Sigma} = 0,5 \sum_1^{N,M} (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma})$
Знакопеременная косинусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка	$n \neq m$ $k'_s = n + m$	Обменная мощность между источниками с разными частотами: $P_{kaq} = 0,5 \sum_1^{N,M} (U_{na} I_{ma} - U_{nb} I_{mb})$
Знакопеременная синусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка	$k''_s = m - n$ $k'_s; k''_s \neq 2m$	Обменная мощность между источниками с разными частотами: $P_{kbq} = 0,5 \sum_1^{N,M} (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma})$

Продолжение таблицы 1

Наименование компоненты мгновенной мощности	Признаки, ограничения	Характеристика составляющих мощности
Псевдоканоническая косинусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка	$k_c'' = k_s'$ или $k_c'' = k_s''$	Обменная мощность энергетического влияния процессов разночастотного преобразования на одночастотные: $P_{kas} = P_{kas\Sigma} - P_{kaq}$
Псевдоканоническая синусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка		Обменная мощность энергетического влияния процессов разночастотного преобразования на одночастотные: $P_{kbs} = P_{kbs\Sigma} - P_{kbq}$
<i>Результирующие канонические составляющие мгновенной мощности</i>		
Суммарная косинусная составляющая мгновенной мощности канонического порядка	$k_c'' = 2m = 2n$ $k_c'' = k_s'$ или $k_c'' = k_s''$	$P_{kac\Sigma} = P_{kac} + P_{kas}$
Суммарная синусная составляющая мгновенной мощности канонического порядка		$P_{kbc\Sigma} = P_{kbc} + P_{kbs}$
Уравнение баланса гармонических составляющих мгновенной мощности:		
$p(t) = \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{kac}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kas\Sigma}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbc}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbs\Sigma}(t) =$ $= \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{kac}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kas}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbc}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbs}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kaq}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbq}(t) =$ $= \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{kac\Sigma}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbc\Sigma}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kaq}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbq}(t)$		

Формирование показателей энергопроцессов на базе оценок мгновенной мощности и ее составляющих.

Выполненный выше анализ позволил получить комплекс оценок энергорежимов в пространстве мгновенной мощности, являющийся более обширным и информативным по сравнению с существующими интегральными оценками энергопроцессов.

Основной мерой мгновенной мощности является ее эффективное значение, поэтому показатели энергопроцессов должны определяться на базе среднеквадратичных оценок мгновенной мощности, а также компонент, образующих мощность, а именно:

постоянной составляющей мощности

$$P_{e k0\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma}^2 dt} = \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma};$$

косинусной составляющей канонического порядка

$$P_{e kac} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^K P_{kac}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kac}^2};$$

синусной составляющей канонического порядка

$$P_{e kbc} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^K P_{kbc}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbc}^2};$$

псевдоканонической косинусной составляющей неканонического порядка

$$P_{e kas} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^K P_{kas}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kas}^2};$$

псевдоканонической синусной составляющей неканонического порядка

$$P_{e kbs} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^K P_{kbs}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbs}^2};$$

результирующей косинусной составляющей канонического порядка

$$P_{e kac\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^K P_{kac\Sigma}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kac\Sigma}^2};$$

результирующей синусной составляющей канонического порядка

$$P_{e kbc\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^K P_{kbc\Sigma}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbc\Sigma}^2} \text{ и т.п.};$$

сигнала мгновенной мощности, включающего все составляющие, приведенные в (8):

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} =$$

$$= \sqrt{\sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kac\Sigma}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbc\Sigma}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kaq}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbq}^2} \quad (9)$$

Показатели энергопроцессов в системе с полигармоническими сигналами, полученные на базе оценок составляющих мгновенной мощности, сведены в табл. 2.



Таблица 2 – Показатели процессов энергопреобразования

Наименование показателя	Аналитическое выражение
<i>Показатели энергопроцессов на базе оценок отдельных составляющих мгновенной мощности</i>	
Коэффициент энергообменных процессов по косинусной составляющей мгновенной мощности канонического порядка	$k_1 = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kac}^2}}{P_e}$
Коэффициент энергообменных процессов по синусной составляющей мгновенной мощности канонического порядка	$k_2 = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbc}^2}}{P_e}$
Коэффициент энергообменных процессов по косинусной составляющей мгновенной мощности неканонического порядка	$k_3 = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kaq}^2}}{P_e}$
Коэффициент энергообменных процессов по синусной составляющей мгновенной мощности неканонического порядка	$k_4 = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbq}^2}}{P_e}$
Коэффициент энергетического влияния разночастотных преобразований по косинусной псевдоканонической составляющей мгновенной мощности неканонического порядка	$k_5 = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kas}^2}}{P_e}$
Коэффициент энергетического влияния разночастотных преобразований по синусной псевдоканонической составляющей мгновенной мощности неканонического порядка	$k_6 = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbs}^2}}{P_e}$
Коэффициент усиления k-ой гармоники косинусной составляющей мощности канонического порядка	$k_7 = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_{kac}(t) + P_{kas}(t))^2 dt}}{P_{ekac}} = \frac{\sqrt{0,5 P_{kac\Sigma}^2}}{P_{ekac}}$
Коэффициент усиления k-ой гармоники синусной составляющей мощности канонического порядка	$k_8 = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_{kbc}(t) + P_{kbs}(t))^2 dt}}{P_{ekbc}} = \frac{\sqrt{0,5 P_{kbc\Sigma}^2}}{P_{ekbc}}$
<i>Результующие показатели энергопроцессов</i>	
Коэффициент эффективности использования потребляемой мощности	$k_9 = \frac{P_{ek0\Sigma}}{P_e}$
Результующий коэффициент энергетического влияния разночастотных преобразований по псевдоканоническим составляющим мгновенной мощности неканонического порядка	$k_{10} = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kas}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbs}^2}}{P_e}$
Результующий коэффициент энергообменных процессов по косинусной составляющей мгновенной мощности канонического порядка	$k_{11} = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kac}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kas}^2}}{P_e}$
Результующий коэффициент энергообменных процессов по синусной составляющей мгновенной мощности канонического порядка	$k_{12} = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbc}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbs}^2}}{P_e}$
Результующий коэффициент использования активной мощности	$k_{13} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kac\Sigma}^2}}{P_e}$
Коэффициент использования реактивной мощности	$k_{14} = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbc\Sigma}^2}}{P_e}$

Продолжение таблицы 2

Наименование показателя	Аналитическое выражение
Результирующий коэффициент энергопреобразования по косинусной составляющей мгновенной мощности	$k_{15} = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kac}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kas}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kaq}^2}}{P_e}$
Результирующий коэффициент энергопреобразования по синусной составляющей мгновенной мощности	$k_{16} = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbc}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbs}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbq}^2}}{P_e}$
Результирующий коэффициент энергообменных процессов (коэффициент усиления переменной составляющей мгновенной мощности)	$k_{17} = \frac{\sqrt{0,5 \sum_{k=1}^K P_{kac\Sigma}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbc\Sigma}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kaq}^2 + 0,5 \sum_{k=1}^K P_{kbq}^2}}{P_e}$

*Определение составляющих мгновенной мощности и ее оценок при различном гармоническом составе исходных сигналов.*

Рассмотрим энергетический режим в системе с источником питания, где напряжение и ток содержат по две гармоники: в первом случае режим формируется первой и третьей гармониками, а во втором – первой и пятой (табл. 3).

В обоих случаях:  $U_1; U_3; U_5; I_1; I_3; I_5$  – действующие значения гармоник напряжения и тока, соответственно;  $\phi_1; \phi_3; \phi_5$  – фазовые углы сдвига гармоник напряжения относительно оси времени;  $\psi_1; \psi_3; \psi_5$  – фазовые углы сдвига тока. При этом амплитудные значения гармоник напряжения и тока задаются такими, чтобы действующие значения тока  $\sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2}$  и напряжения  $\sqrt{U_1^2 + U_3^2} = \sqrt{U_1^2 + U_5^2}$  были равны. Следовательно, для двух различных энергетических режимов имеем равные значения полной или кажущейся мощности  $S_{1,3} = S_{1,5}$  устройства или системы.

Выше было отмечено значение процессов энергопреобразования первого и второго рода при формировании составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов. В табл. 3 приведен математический аппарат получения ортогональных составляющих мгновенной мощности при различном гармоническом составе напряжения и тока.

Порядок гармоник мощности при этом определяется суммой и разностью порядков составляющих напряжения и тока. Формальный анализ выражений для амплитуд гармонических мощности показывает, что в первом случае  $P_{2ac\Sigma}$  и  $P_{2bc\Sigma}$  содержат по шесть составляющих, определяемых первыми гармониками напряжения  $U_{1a}, U_{1b}$  и тока  $I_{1a}, I_{1b}$ , а также произведениями компонент первой и третьей гармоник напряжения  $U_{1a}, U_{1b}, U_{3a}, U_{3b}$  и тока  $I_{1a}, I_{1b}, I_{3a}, I_{3b}$ . Это со всей очевидностью подтвер-

ждает «переход» компонент, образованных неканоническими гармониками ( $m \neq n$ ), в ансамбль составляющих канонического порядка ( $m = n$ ).

В то же время из приведенных примеров видно, что параметры мгновенной мощности, в особенности порядок и амплитуды гармонических составляющих, различны. Это является объективным доказательством того, что составляющие мгновенной мощности более информативны, чем значения полной или кажущейся мощности. Равные значения полной мощности для двух приведенных выше примеров не означают равенства составляющих мгновенной мощности, в частности, косинусной и синусной составляющих второй гармоники мгновенной мощности. В той или иной мере сказанное характерно и для других составляющих.

На рис. 8 приведены кривые изменения мгновенных сигналов напряжения, тока, мощности и ее составляющих для двух рассматриваемых случаев с коэффициентами искажения синусоидальности кривой напряжения  $k_{u1} = 0,1$  и  $k_{u2} = 0,084$ , соответственно, где  $k_u = \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} / U_1$ .

Параметры системы, принимаемые для расчета:

$$\begin{aligned}
 &U_1 = 2,193 \text{ В}; \quad U_5 = 0,185 \text{ В}; \quad I_1 = 2,193 \text{ А}; \\
 &I_5 = 0,185 \text{ А}; \quad \phi_1 = 0^\circ; \quad \psi_1 = 15^\circ; \quad U_{1a} = 2,193 \text{ В}; \\
 &U_{1b} = 0 \text{ В}; \quad U_{5a} = 0,185 \text{ В}; \quad U_{5b} = 0 \text{ В}; \quad I_{1a} = 2,118 \text{ А}; \\
 &I_{1b} = 0,568 \text{ А}; \quad I_{5a} = 0,048 \text{ А}; \quad I_{5b} = 0,179 \text{ А}; \\
 &U_1 = 2,19 \text{ В}; \quad U_3 = 0,22 \text{ В}; \quad I_1 = 2,19 \text{ А}; \\
 &I_3 = 0,22 \text{ А}; \quad \phi_1 = 0^\circ; \quad \psi_1 = 15^\circ; \quad U_{1a} = 2,19 \text{ В}; \\
 &U_{1b} = 0 \text{ В}; \quad U_{3a} = 0,22 \text{ В}; \quad U_{3b} = 0 \text{ В}; \quad I_{1a} = 2,115 \text{ А}; \\
 &I_{1b} = 0,567 \text{ А}; \quad I_{3a} = 0,156 \text{ А}; \quad I_{3b} = 0,156 \text{ А}.
 \end{aligned}$$

Таблица 3 – Математический аппарат формирования составляющих мгновенной мощности

<i>Исходные сигналы напряжения и тока</i>	
$u(t) = U_1 \cos(\Omega t - \varphi_1) + U_3 \cos(3\Omega t - \varphi_3);$ $i(t) = I_1 \cos(\Omega t - \psi_1) + I_3 \cos(3\Omega t - \psi_3).$	$u(t) = U_1 \cos(\Omega t - \varphi_1) + U_5 \cos(5\Omega t - \varphi_5);$ $i(t) = I_1 \cos(\Omega t - \psi_1) + I_5 \cos(5\Omega t - \psi_5).$
<i>Ортогональные составляющие сигналов напряжения и тока</i>	
$U_{1a} = U_1 \cos \varphi_1; U_{1b} = U_1 \sin \varphi_1; U_{3a} = U_3 \cos \varphi_3;$ $U_{3b} = U_3 \sin \varphi_3; I_{1a} = I_1 \cos \psi_1; I_{1b} = I_1 \sin \psi_1;$ $I_{3a} = I_3 \cos \psi_3; I_{3b} = I_3 \sin \psi_3.$	$U_{1a} = U_1 \cos \varphi_1; U_{1b} = U_1 \sin \varphi_1; U_{5a} = U_5 \cos \varphi_5;$ $U_{5b} = U_5 \sin \varphi_5; I_{1a} = I_1 \cos \psi_1; I_{1b} = I_1 \sin \psi_1;$ $I_{5a} = I_5 \cos \psi_5; I_{5b} = I_5 \sin \psi_5.$
<i>Мгновенная мощность</i>	
$p(t) = u(t)i(t) =$ $= (U_{1a} \cos(\Omega t) + U_{1b} \sin(\Omega t) + U_{3a} \cos(3\Omega t) + U_{3b} \sin(3\Omega t)) \times$ $\times (I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + I_{3a} \cos(3\Omega t) + I_{3b} \sin(3\Omega t)) =$ $= P_0 + P_{2a} \cos(2\Omega t) + P_{2b} \sin(2\Omega t) + P_{4a} \cos(4\Omega t) +$ $+ P_{4b} \sin(4\Omega t) + P_{6a} \cos(6\Omega t) + P_{6b} \sin(6\Omega t).$	$p(t) = u(t)i(t) =$ $= [U_{1a} \cos(\Omega t) + U_{1b} \sin(\Omega t) + U_{5a} \cos(5\Omega t) + U_{5b} \sin(5\Omega t)] \times$ $\times [(I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + I_{5a} \cos(5\Omega t) + I_{5b} \sin(5\Omega t))] =$ $= P_0 + P_{2a} \cos(2\Omega t) + P_{2b} \sin(2\Omega t) + P_{4a} \cos(4\Omega t) +$ $+ P_{4b} \sin(4\Omega t) + P_{6a} \cos(6\Omega t) + P_{6b} \sin(6\Omega t) +$ $+ P_{10a} \cos(10\Omega t) + P_{10b} \sin(10\Omega t).$
<i>Ортогональные составляющие мгновенной мощности</i>	
$P_0 = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{1b}I_{1b}}{2} + \frac{U_{3a}I_{3a}}{2} + \frac{U_{3b}I_{3b}}{2};$ $P_{2ac} = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} - \frac{U_{1b}I_{1b}}{2};$ $P_{2as} = \frac{U_{1a}I_{3a}}{2} + \frac{U_{1b}I_{3b}}{2} + \frac{U_{3a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{3b}I_{1b}}{2};$ $P_{2ac\Sigma} = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{1a}I_{3a}}{2} - \frac{U_{1b}I_{1b}}{2} + \frac{U_{1b}I_{3b}}{2} +$ $+ \frac{U_{3a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{3b}I_{1b}}{2};$ $P_{2bc} = \frac{U_{a1}I_{b1}}{2} + \frac{U_{b1}I_{a1}}{2};$ $P_{2bs} = \frac{U_{b3}I_{a1}}{2} - \frac{U_{a3}I_{b1}}{2} - \frac{U_{b1}I_{a3}}{2} + \frac{U_{a1}I_{b3}}{2};$ $P_{2bc\Sigma} = \frac{U_{a1}I_{b1}}{2} + \frac{U_{a1}I_{b3}}{2} + \frac{U_{b1}I_{a1}}{2} - \frac{U_{b1}I_{a3}}{2} -$ $- \frac{U_{a3}I_{b1}}{2} + \frac{U_{b3}I_{a1}}{2};$ $P_{4aq} = \frac{U_{1a}I_{3a}}{2} - \frac{U_{1b}I_{3b}}{2} + \frac{U_{3a}I_{1a}}{2} - \frac{U_{3b}I_{1b}}{2};$ $P_{4bq} = \frac{U_{1a}I_{3b}}{2} + \frac{U_{1b}I_{3a}}{2} + \frac{U_{3a}I_{1b}}{2} + \frac{U_{3b}I_{1a}}{2};$ $P_{6ac} = \frac{U_{3a}I_{3a}}{2} - \frac{U_{3b}I_{3b}}{2}; P_{6bc} = \frac{U_{3a}I_{3b}}{2} + \frac{U_{3b}I_{3a}}{2}.$	$P_0 = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{1b}I_{1b}}{2} + \frac{U_{5a}I_{5a}}{2} + \frac{U_{5b}I_{5b}}{2};$ $P_{2ac} = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} - \frac{U_{1b}I_{1b}}{2}; P_{2bc} = \frac{U_{a1}I_{b1}}{2} + \frac{U_{b1}I_{a1}}{2};$ $P_{4aq} = \frac{U_{1a}I_{5a}}{2} + \frac{U_{5a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{1b}I_{5b}}{2} + \frac{U_{5b}I_{1b}}{2};$ $P_{4bq} = \frac{U_{1a}I_{5b}}{2} - \frac{U_{1b}I_{5a}}{2} - \frac{U_{5a}I_{1b}}{2} + \frac{U_{5b}I_{1a}}{2};$ $P_{6aq} = \frac{U_{1a}I_{5a}}{2} + \frac{U_{5a}I_{1a}}{2} - \frac{U_{5b}I_{1b}}{2} - \frac{U_{1b}I_{5b}}{2};$ $P_{6bq} = \frac{U_{1a}I_{5b}}{2} + \frac{U_{1b}I_{5a}}{2} + \frac{U_{5a}I_{1b}}{2} + \frac{U_{5b}I_{1a}}{2};$ $P_{10ac} = \frac{U_{5a}I_{5a}}{2} - \frac{U_{5b}I_{5b}}{2}; P_{10bc} = \frac{U_{5a}I_{5b}}{2} + \frac{U_{5b}I_{5a}}{2};$ $\sum_{k=1}^{10} P_{kac} = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} - \frac{U_{1b}I_{1b}}{2} + \frac{U_{5a}I_{5a}}{2} - \frac{U_{5b}I_{5b}}{2};$ $\sum_{k=1}^{10} P_{kbc} = \frac{U_{1a}I_{1b}}{2} + \frac{U_{1b}I_{1a}}{2} + \frac{U_{5a}I_{5b}}{2} + \frac{U_{5b}I_{5a}}{2};$ $\sum_{k=1}^{10} P_{kaq} = U_{1a}I_{5a} + U_{5a}I_{1a};$ $\sum_{k=1}^{10} P_{k bq} = U_{1a}I_{5b} + U_{5b}I_{1a}.$

Показатели энергопроцессов, отражающие качественную и количественную оценки процессов энергопреобразования для рассматриваемых случаев, сведены в табл. 4. Анализ показал, что с ростом коэффициента искажения  $k_u$  синусоидальности

кривой напряжения растет эффективное значение мощности, снижается эффективность использования потребляемой мощности (коэффициент  $k_9$ ) за счет усиления переменной составляющей мгновенной мощности (коэффициент  $k_{17}$ ).

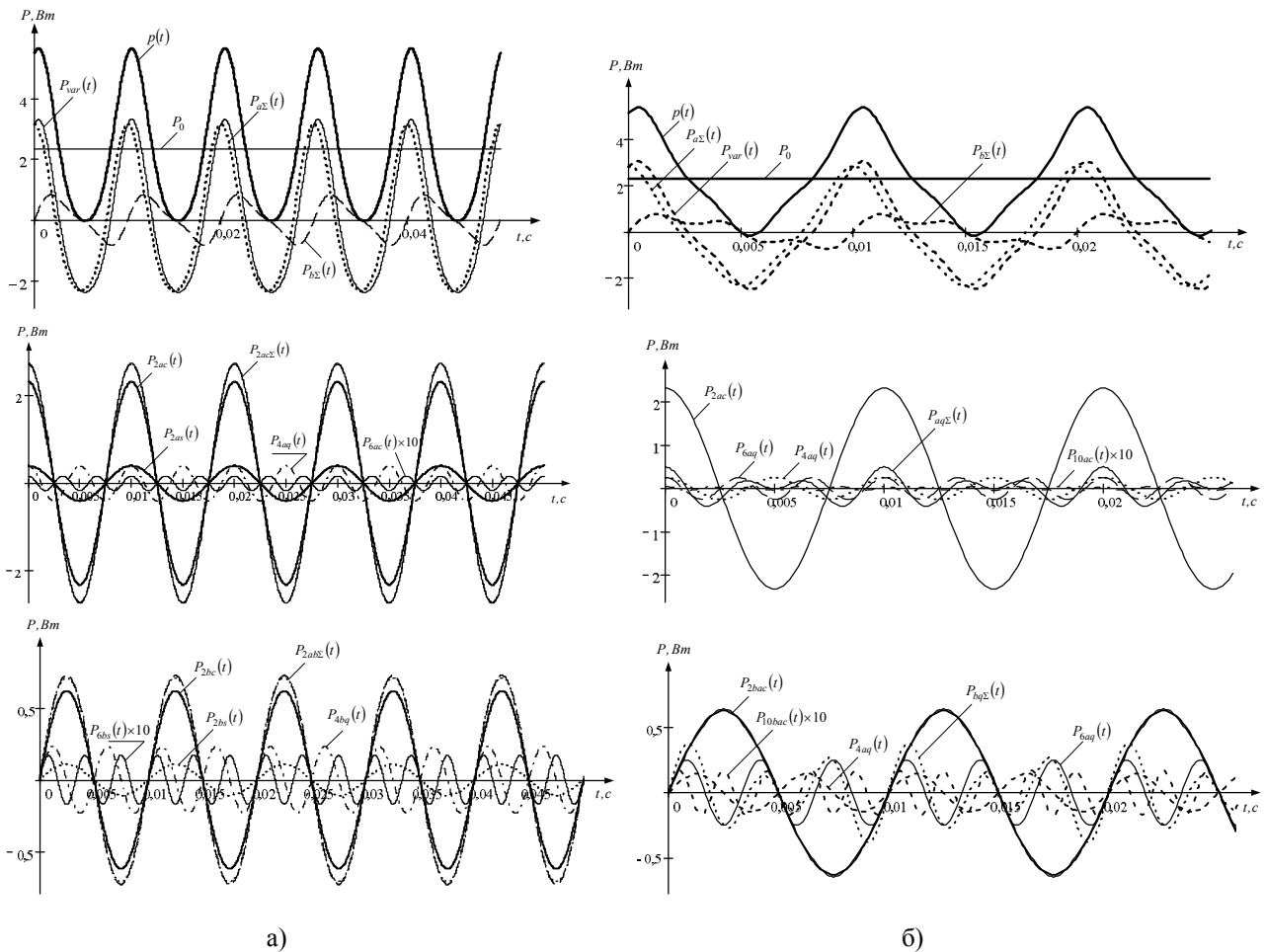


Рисунок 8 – Кривые изменения мгновенной мощности и ее составляющих при различном гармоническом составе исходных сигналов напряжения и тока:  $k_{u1} = 0,1$  (а) и  $k_{u2} = 0,084$  (б)

Таблица 4 – Значения показателей энергопроцессов

Коэффициент искажения	Значение коэффициента								
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$
$k_{u1} = 0,1$	0,531	0,142	0,092	0,053	0,092	0,024	1,174	1,17	0,756
$k_{u2} = 0,084$	0,566	0,152	0,085	0,167	0	0	1,0	1,0	0,802
Коэффициент искажения	Значение коэффициента								
	$k_{10}$	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{13}$	$k_{14}$	$k_{15}$	$k_{16}$	$k_{17}$	
$k_{u1} = 0,1$	0,095	0,623	0,167	0,98	0,167	0,63	0,175	0,65	
$k_{u2} = 0,084$	0	0,566	0,152	0,982	0,15	0,57	0,167	0,596	

В результате возникновения псевдоканонических составляющих мощности для энергорезима, где напряжение и ток задаются первой и третьей гармониками, проявляется энергетическое влияние обменных процессов разночастотного характера на одночастотные процессы энергопреобразования (коэффициенты  $k_5, k_6, k_{10}$ ). Это приводит к усилению соответствующих гармоник мощности канонического порядка (коэффициенты  $k_7, k_8$ ) и, соответственно, к росту результирующих коэффициентов  $k_{11}, k_{12}$ , отражающих интенсивность энергообменных процессов по косинусной и синусной составляющим мгновенной мощности канонического порядка.

Таким образом, полученный результат со всей убедительностью подтверждает вывод, что на энер-

гетический режим влияют не только значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения или тока, но и непосредственно значения частот гармонических составляющих исходных сигналов, комбинация которых формирует спектр гармоник мгновенной мощности.

**ВЫВОДЫ.** Доказано, что в основе формирования составляющих мгновенной мощности лежат процессы частотного преобразования и гармонического анализа ортогональных составляющих сигналов напряжения и тока. Порядок гармоник мощности определяется суммой и разностью порядков составляющих исходных сигналов. Получено, что энергетический спектр оказывается существенно шире спектра гармоник исходных сигналов, что связано с появлением канонических и неканонических

компонент мгновенной мощности. Показано, что процессы энергопреобразования характеризуются сложными потоками внутреннего энергообмена, обусловленными энергетическим влиянием разночастотных преобразований компонент напряжения и тока на одночастотные и приводящими к усилению отдельных гармоник мощности, росту результирующей переменной составляющей мгновенной мощности.

Выполненная систематизация подходов к декомпозиции мгновенной мощности при анализе однофазных несинусоидальных систем полностью применима к многофазным системам при гармонических, полигармонических, периодических и непериодических сигналах и любых интервалах разложения (на периоде переменного напряжения, на части периода, на произвольном промежутке и др.), а также не зависит от физической природы анализируемых сигналов.

Показатели энергопроцессов должны определяться на базе среднеквадратичных оценок мгновенной мощности и ее компонент, поэтому получаемый комплекс показателей энергорежимов является более обширным и информативным по сравнению с существующими интегральными оценками энергопроцессов.

Предложенные в работе показатели являются базовой платформой для анализа процессов энергопреобразования в электромеханических комплексах, где переменная во времени составляющая мощности характеризует непрерывный энергообменный процесс между источником и потребителем, технологическим механизмом и двигателем, и т.п. Очевидно, что переменная составляющая энергетического режима снижает эффективность процесса энергопреобразования, приводит к появлению высших гармонических в спектрах мощности и сопровождается ростом эффективных значений мощности.

Для качественной и количественной оценки изменения мощности во всех элементах силовой структуры электромеханического комплекса является целесообразным введение дополнительных коэффициентов, характеризующих пропускную способность энергетического канала электромеханической системы и ее энергетическую управляемость, которые полностью отражают влияние факторов, снижающих эффективность передачи, преобразования и потребления электрической энергии из-за наличия накопительных устройств, нелинейных электромагнитных и технологических процессов и т.п.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1975. – 320 с.
2. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.Е., Денисюк С.П. Баланс энергий в силовых цепях. – Киев: Наукова думка, 1992. – 312 с.
3. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. – Новосибирск: изд-во Новосибир. ун-та, 1990. – 220 с.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

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. Крөггерис А.Ф., Рашевиц К.К., Трейманис Э.Ц., Шинка Я.К. Мощность переменного тока. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.

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

8. 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 й практика» науково-виробничого журналу. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 30–36.

9. 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.

10. 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. – № 12b. – PP. 208–212.

11. Soares V., Verdelho P., Marques G.D. An instantaneous active and reactive current component method for active filters // IEEE Trans. Power Electronics. – 2000. – Iss. 15. – PP. 660–669.

12. Peng Z., Ott G.W., Adams D.J. Harmonics and reactive power compensation based on the Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase fourwire systems. // IEEE Trans. Power Electronics. – 1998. – Iss. 13. – № 6. – PP. 1174–1181.

13. Herrera R.S., Salmeryn P., Kim H. Application of instantaneous power theory to the problems of compensation with the help of active filters: various approaches, calculations and experimental result // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 2008. – Iss. 55. – № 1. – PP. 184–196.

14. Kim H.S., Blaabjeerg F., Bak-Jensen B., Choi L. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory // IEEE Trans. Power Electronics. – 2002. – Iss. 12. – № 5. – PP. 701–710.

15. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах // Проблемы автоматизованого электропривода. Теорія і практика. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 507–512.

16. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Развитие частотных методов оценки параметров двигателей переменного тока // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005. – № 3 (33), част. 2. – С. 43–47.

17. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, 2004. – Вип. 15. – С. 10–18.

## ESTIMATION ENERGY CONVERSION PROCESSES WITH USING INSTANTANEOUS POWER COMPONENTS

M. Zagirnyak, D. Rodkin, T. Korenkova

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

The approach to the decomposition of the instantaneous power of polyharmonic signals based on the analysis of the processes of frequency conversion orthogonal components of voltage and current has been refined. It has been shown that the order of the harmonics of power is the sum and difference frequencies of the harmonic components of the original signals. The importance of energy conversion processes of the first and second order in the formation of the components of instantaneous power of non-sinusoidal signals has been noted. A mathematical apparatus and diagrams of the canonical form, and the non-canonical pseudocanonical component of the instantaneous power at different harmonic content of voltage and current has been proposed. The amplification of the alternating component of the power due to the coincidence frequency of canonical and pseudocanonical component has been proved. The indicators of energy processes based on the effective values of the instantaneous power and its components has been proposed. It has been shown that the energy mode affects not only the amplitude values of voltage and current harmonics, but the combination of frequencies that form the harmonic spectrum of the original signal.

**Key words:** energy conversion processes, the power mode, the instantaneous power, polyharmonic signal, the effective power, energy processes indicators.

## REFERENCES

1. Majewski, O. (1975), *Energeticheskie pokazateli ventelnikh preobrazovateley* [Energy performance of the converter], Energiya, Moscow, Russia. (in Russian)
2. Tonkal, V., Novoseltsev, A. and Denisuk, S. (1992), *Balans energiy v silovikh tsepiakh* [The energy balance in the power circuits], Naukova dumka, Kiev, Ukraine. (in Russian)
3. Zinovev, G. (1990), *Priamie metody rascheta energeticheskikh pokazateley ventelnikh preobrazovateley* [Direct methods of calculating the converter energy indicators], Izdatelstvo Novosibirskogo universyteta, Novosibirsk, Russia. (in Russian)
4. Venikov, V. (1986), *Perekhodnie elektromekhanicheskie protsesy v elektricheskikh sistemakh* [Transient electromechanical processes in electrical systems], Visshaya shkola, Moscow, Russia. (in Russian)
5. Zhemerov, G. and Tugay, D. (2004), "Instantaneous and average active and reactive power in linear circuits with sinusoidal voltages", *Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*, Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskogo politekhnichnoho universytetu, pp. 153–160. (in Russian)
6. Krogeris, A. (1993), *Moshchnost peremennogo toka* [AC power], Institute of Physics and Power Engineering, Riga, Latvia. (in Russian)
7. Akagi, H., Watanabe, E., H. and Aredes M. (2007), *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley, New York.
8. Zagirnyak, M.V., Rod'kin, D.Y. and Korenkova, T.V. (2012), "The analysis of power conversion processes in electromechanical complexes", *Electromechanical and energy saving systems, tematicniy vipusk "Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*, KSPU, Vol. 4, no. 12, pp. 36–52. (in Russian)
9. 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.
10. 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.
11. Soares, V., Verdelho, P. and Marques, G.D. (2000), "An instantaneous active and reactive current component method for active filters", *IEEE Trans. Power Electronics*, no. 15, pp. 660–669.
12. Peng, Z., Ott, G.W. and Adams D.J. (1998), "Harmonics and reactive power compensation based on the Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase fourwire systems", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 13, no. 6, pp. 1174–1181.
13. Herrera, R.S., Salmeryn, P. and Kim, H. (2008), "Application of instantaneous power theory to the problems of compensation with the help of active filters: various approaches, calculations and experimental result", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, no. 1, pp. 184–196.
14. Kim, H.S., Blaabjeerg, F., Bak-Jensen, B. and Choi L. (2002), "Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 12, no 5, pp. 701–710.
15. Rodkin, D.I. and Romashihin, Y.V. (2007), "Capabilities and effectiveness of the method in the identification tasks of the energy diagnostics", *XIV International Scientific Conference. "The problem automated electric drive. Theory and practice"*, Zbirnyk naukovykh prats Dniprodzerzhynskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu, pp. 507–512. (in Russian)
16. Rodkin, D.I., Kalinov, A.P. and Romashihin, Y.V. (2005), "The development of methods for estimating the parameters of the frequency of AC motors", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 3, no. 33, pp. 43–47. (in Russian)
17. Rodkin, D.I. (2004), "Comments on the theory of polyharmonic signals of energy processes", *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskogo natsionalnogo tekhnichnoho universytetu*, Vol. 15, pp. 10–18. (in Russian)

Стаття надійшла 13.02.2013.