

УДК 621.65:004.183

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

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

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: saue@polytech.poltava.ua

Рассмотрен механизм формирования составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов с позиции теории множеств. Предложен математический аппарат для определения канонических, неканонических и псевдоканонических компонент мгновенной мощности. Доказан эффект усиления знакопеременной составляющей мощности ввиду совпадения частот канонических и псевдоканонических компонент. Показана возможность расширения комплекса оценок энергопроцессов в пространстве мгновенной мощности.

Ключевые слова: мгновенная мощность, полигармонический сигнал, эффективная мощность, показатели энергопроцессов.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ МИТТЄВОЇ ПОТУЖНОСТІ ПОЛІГАРМОНІЙНИХ СИГНАЛІВ

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

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: saue@polytech.poltava.ua

Розглянуто механізм формування складових миттєвої потужності полігармонійних сигналів з позиції теорії множин. Запропоновано математичний апарат для визначення канонічних, неканонічних та псевдоканонічних компонент миттєвої потужності. Доведено ефект підсилення знаковмінної складової потужності через співпадіння частот канонічних і псевдоканонічних компонент. Відзначено можливість розширення комплексу оцінок енергопроцесів у просторі миттєвої потужності.

Ключові слова: миттєва потужність, полігармонійний сигнал, ефективна потужність, показники енергопроцесів.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Необходимость экономного использования энергии, снижения непроизводительных затрат мощности обуславливает актуальность развития подходов к анализу процессов передачи, преобразования и потребления (генерирования) электрической энергии в электромеханических комплексах (ЭМК).

Анализ показал, что вопросам исследования энергетических процессов в ЭМК посвящено большое количество работ [1–13]. Однако обширность рассматриваемых исследований не привела к потере интереса к данной проблематике: в большей степени затронуты вопросы расчета электрических цепей при синусоидальных токах; учета электроэнергии; компенсации реактивной мощности; активно развиваются математические подходы по интерпретации мощности и энергии в цепях несинусоидального переменного тока, созданию показателей оценки энергетической эффективности процессов преобразования электрической энергии (рис. 1).

Полученные результаты невозможно было получить без создания основополагающего фундамента теории анализа энергопроцессов – метода мгновенной мощности, который получил практическое использование в таких принципиально важных направлениях:

создание технических устройств и систем для улучшения показателей энергопотребления одиночных и групповых потребителей на базе управляемых фильтров и компенсаторов некачественностей энергопроцессов [1–8];

разработка устройств и систем для идентификации параметров электрооборудования с использованием уравнений энергетического баланса гармонических составляющих мгновенной мощности [9, 10];

задачи диагностики, мониторинга и оценки технического состояния электрических двигателей [11].



Рисунок 1 – Направления исследований по проблематике оценки энергопроцессов в ЭМК

Следует при этом подчеркнуть, что вне поля зрения применения метода мгновенной мощности остаются вопросы анализа энергопроцессов в ЭМК, которые характеризуются различной физической природой рассматриваемых сигналов, их формой, периодичностью, наличием нелинейных элементов, накопительных устройств и т.д.; определения энергетических показателей процессов энергопреобразования соответствующими аппара-

тами и машинами, создания нового или коррекции существующего механизма финансового взаимодействия энергоснабжающей сети и потребителей.

При этом очевидно, что те возможности, которые открылись с созданием теории мгновенной мощности и которые в известной степени уже реализованы при создании устройств управления энергетическими режимами [12, 13] и идентификации параметров оборудования, должны быть в полной мере реализованы в создании измерительных устройств, методологии формирования хозрасчетных механизмов, создания базы для использования в народном хозяйстве как понятий, так и оборудования для оценки качества преобразования энергии. Другими словами – приспособление ранее сформированных подходов к вышеперечисленным задачам не позволяет в полной мере использовать мощный потенциал теории мгновенной мощности для решения задач энергоэффективного использования электроэнергии в разных сферах народного хозяйства.

Именно по этой причине исследование вопроса получения показателей энергопроцессов с использованием теоретической базы мгновенной мощности представляется не только актуальной, но и важной теоретической и практической задачей, определенным вкладом в общий теоретический аппарат – теорию мгновенной мощности.

Целью работы является формирование единой теоретической базы для получения составляющих мгновенной мощности и ее оценок, расширение показателей энергопроцессов путем гармонического анализа составляющих мгновенной мощности.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В соответствии с известными математическими положениями для некоторой условной электрической цепи, включающей источник питания и потребитель, сигналы напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$, аппроксимированные тригонометрическими рядами, можно рассматривать как некоторые множества вида:

$$\sum_{n=1}^N u_n(t) = \{U_n\}; \quad \sum_{m=1}^M i_m(t) = \{I_m\}. \quad (1)$$

Так как $u_n(t)$ и $i_m(t)$ – гармонические сигналы с периодом T и соответствующим фазовым сдвигом, то каждую из составляющих можно представить в виде ортогональных компонент $U_n = U_{na} + U_{nb}$; $I_m = I_{ma} + I_{mb}$, причем индексом «а» обозначаются косинусные компоненты векторов напряжения U_n и тока I_m , а индексом «b» – синусные. Тогда ранее приведенные зависимости для $u_n(t)$ и $i_m(t)$ можно представить в форме сумм – косинусных и синусных подмножеств:

$$\sum_{n=1}^{n=\infty} u_n(t) = \{U_{na}\} + \{U_{nb}\}; \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{m=\infty} i_m(t) = \{I_{ma}\} + \{I_{mb}\}. \quad (3)$$

С полученными подмножествами, как и с множествами в целом, можно выполнять стандартные

операции:

ранжирования по амплитуде, частоте, фазовому сдвигу и др;

определения среднего значения компонент на заданном интервале разложения или анализа;

определения среднеквадратичного значения отдельно взятого параметра или их совокупности;

определения среднего значения модуля того или иного параметра;

определения максимума функции – совокупность ранжированных компонент.

Таким образом, результатом указанных операций, как и других возможных, не включенных в упомянутый перечень, являются показатели или оценки – среднеквадратичные или эффективные значения тока или напряжения, на основании которых определяются иные, вызванные практическими потребностями оценки или показатели. Например, коэффициент искажения тока как отношение действующего значения высших гармоник анализируемого сигнала к действующему (эффективному) значению первой гармоники тока и др.

Параметром, характеризующим наиболее полно режим энергопотребления устройства или системы, является мощность, получаемая как произведение временных зависимостей напряжения и тока $p(t) = u(t)i(t)$ или в форме произведения аппроксимирующих рядов:

$$\sum_{k=0}^K p_k(t) = \sum_{n=1}^N u_n(t) \sum_{m=1}^M i_m(t). \quad (4)$$

Опираясь на понятия множества, мощность представляется как произведение множеств $\{U_n\}$ и $\{I_m\}$ и является вновь образованным множеством:

$$\begin{aligned} \{P_k\} &= \{U_n\} \{I_m\} = \\ &= (\{U_{na}\} + \{U_{nb}\}) \times (\{I_{ma}\} + \{I_{mb}\}) = \\ &= \{U_{na}\} \times \{I_{ma}\} + \{U_{nb}\} \times \{I_{mb}\} + \\ &+ \{U_{na}\} \times \{I_{mb}\} + \{U_{nb}\} \times \{I_{ma}\} = \\ &= \{P_{ka}\} + \{P_{kb}\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из приведенных в (5) подмножеств – произведений компонент $\{U_n\}$ и $\{I_m\}$, образованы два подмножества мощности:

$$\{P_{ka}\} = \{U_{na}\} \times \{I_{ma}\} + \{U_{nb}\} \times \{I_{mb}\}; \quad (6)$$

$$\{P_{kb}\} = \{U_{na}\} \times \{I_{mb}\} + \{U_{nb}\} \times \{I_{ma}\}, \quad (7)$$

которые сформированы на понятиях «имени» того или иного подмножества с учетом другого, не менее важного понятия «порядка». Понятие «одноименные» компоненты означает произведение только косинусных или только синусных подмножеств; понятие «разноименных» компонент означает произведение косинусных и синусных составляющих. Таким образом, подмножество $\{P_{ka}\}$ образовано из произведений одноименных компонент напряжения и тока, а подмножество $\{P_{kb}\}$ – разноименных.

Под понятием «порядка» компоненты следует понимать частоту компоненты или частоту гармонической составляющей: m – частоту гармоники

тока, n – частоту гармоніки напруги. Порядок гармонік потужності, як следует из теорії перетворення сигналів при двох вихідних компонентах (складаючих), визначається простою залежністю $k = m \pm n$, причому при $m = n$ $k_1 = 2m = 2n$ или $k_2 = 0$ (останнє означає, що сигнал має постійну складаючу). При наявності нелінійностей в силовому контурі ЕМК процес перетворення енергії суттєво складніше, ніж в лінійних системах, що призводить до збільшення порядку гармонічних миттєвості потужності.

Другий ознак, на основі якого можна класифікувати компоненти, представляється не менш важливим, ніж попередній, і зводиться до введення підмножин, для яких $m = n$, а також тих, для яких $m \neq n$. Гармоніки потужності при $m = n$ будуть мати порядок $k_1 = 2m = 2n$ и $k_2 = 0$. Їх прийнято називати канонічними гармоніками. При $m \neq n$ формуються гармоніки потужності порядку $k_1 = m + n$, $k_2 = m - n$ и їх іменують неканонічними. Аналізуючи даний питання, логічно зробити висновок, що потужності подібного роду принципово відличні одне від одного. Сказане необхідно врахувати для коректної оцінки енергопроцесів.

Механізм формування канонічних и неканонічних гармонік потужності відображає блок-схема, наведена на рис. 2, відповідна, наприклад, електричній ланці з L, R – навантаженням, живимою від джерела полігармонічного напруги U_1, \dots, U_n . В цьому випадку канонічний компонент потужності визначається добутком напруги и струму одного джерела, а неканонічні складаючі – добутком напруги одного джерела на струм іншого.

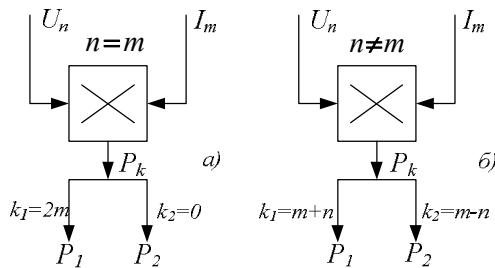


Рисунок 2 – Схема формування гармонік миттєвості потужності

Розглядаючи неканонічні компоненти окремо з позиції протікання енергопроцесів, можна відзначити, що вони характеризують обмінні процеси між об'єктами енергоперетворення и, в першу чергу, – між джерелами різної частоти. Нехай маємо дві компоненти напруги U_{n1} и струму I_{m2} , причому порядок (частота) компонентів заздалегідь не рівні одне одному. Тоді, якщо U_{n1} – напруга першого джерела, а I_{m2} – струм від другого джерела з частотою m_2 и напругою U_{n2} , причому $m_2 = n_2$, то добутком напруги

U_{n1} на струм I_{m2} по суті представляє енергообмінний процес між двома джерелами з напругами U_{n1} и U_{n2} .

В подальшому, при аналізі енергопроцесів індексом « s » позначаються неканонічні складаючі, а « c » – канонічні. Тоді частоти канонічних складаючих потужності рівні $k_{1c} = 2m = 2n$, $k_{2c} = 0$; частоти неканонічних складаючих – $k_{1s} = m + n$; $k_{2s} = m - n$. Зрозуміло, що при достатньо великій кількості гармонік струму и напруги можливі такі комбінації частот при визначенні миттєвості потужності, коли виконується рівність $k_{1c} = k_{2s}$. Сказане означає, що деякі компоненти миттєвості потужності з підмножин канонічних и неканонічних складаючих складаються арифметично, утворюючи загальну сумарну компоненту, що особливо важливо при розв'язанні таких завдань, де потрібне створення рівнянь балансу гармонічних миттєвості потужності. Цей достатньо переконливий висновок не вирішує проблеми в цілому, але створює нові завдання при аналізі енергопроцесів.

Складаючі потужності канонічні и неканонічні можна и необхідно аналізувати як окремі складаючі потужності, визначаючі, несомненно, характеристики енергопроцесу якісного и кількісного характеру. Важливістю затрагиваних питань є в тому, що вони тісно пов'язані не тільки з теоретичними аспектами теорії миттєвості потужності, але и з питаннями оцінки плати за електроенергію, апаратного и програмного забезпечення при визначенні енергетичних показників на базі миттєвості потужності.

З урахуванням механізму формування канонічних и неканонічних складаючих, загальне вираження для миттєвості потужності має вигляд:

$$\{P_k\} = \{P_{k0}\} + \{P_{kac}\} + \{P_{kbc}\} + \{P_{kas}\} + \{P_{kbs}\}. \quad (8)$$

Раніше було відзначено, що для отримання оцінок енергопроцесів принципово є чітке термінологічне визначення складаючих миттєвості потужності.

В відповідності до сказаного, в табл. 1 відображен механізм формування канонічних и неканонічних складаючих миттєвості потужності, утворених множенням відповідних гармонік напруги и струму. З таблиці видно, що при визначених значеннях m и n можливі рівності: $K_{ac} = K_{as}$, $K_{bc} = K_{bs}$.

Отсюди слідує два важливі положення. Перше заключається в тому, що в тому випадку, якщо компоненти гармонік потужності визначаються шляхом гармонічного аналізу залежності $p(t)$ в формі

$$P_{ka} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cos(k\Omega t) dt \quad \text{и} \quad P_{kb} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \sin(k\Omega t) dt,$$

то через збіг визначених частот канонічної и неканонічної складаючих (в нашому випадку – 2, 6, 10, 14) залежності P_{ka} и P_{kb} іменно

для этих частот будут состоять из сумм: $P_{ka\Sigma} = P_{kac} + P_{kas}$ и $P_{kb\Sigma} = P_{kbc} + P_{kbs}$. Тогда при создании систем уравнений баланса гармоник указанные суммы должны входить в качестве отдельных слагаемых и в этом случае косинусная и синусная составляющие канонических гармоник мощности равны соответственно $P_{kac\Sigma}$ и $P_{kbc\Sigma}$ и включают,

как показано выше, компоненту соответственно косинусной канонической составляющей P_{kac} и обменную компоненту неканонической составляющей P_{kas} (для синусной составляющей $P_{kbc\Sigma}$ – соответственно P_{kbc} и P_{kbs}).

Таблица 1 – Формирование гармоник мгновенной мощности

| Порядок гармоник U, I, P | Номера гармонических составляющих | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K_{ac}, K_{bc} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K_{as}, K_{bs} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Другой, более важный вывод состоит в том, что с помощью той же операции интегрирования, о которой говорилось ранее, невозможно определить через $P_{kb\Sigma}$ синусную составляющую мощности канонического порядка P_{kbc} , с которой связывают параметр, характеризующий энергетический режим – реактивную мощность той или иной частоты – мощность канонического порядка (гармоник тока и напряжения одной и той же частоты). Этот вывод важен, поскольку параметр синусной составляющей мощности часто отождествляется с реактивной – обменной мощностью между источником и потребителем. Исходя из этого ясно, что определение синусных компонент мгновенной мощности как компонент реактивных составляющих из произведения мгновенных значений напряжения и тока недопустимо. Следовательно, должны быть задействованы иные механизмы определения указанных параметров.

Из приведенного выше следует, что путем анализа гармонического состава мощности имеются возможности расширения информационного материала в отношении тех или иных показателей энергетического режима. Определенной иллюстрацией к сказанному являются два примера энергетического режима источника питания, которые характерны тем, что как напряжение, так и ток содержат по две гармоники: в первом случае режим формируется первой и третьей гармониками, а во втором – первой и пятой. В обоих случаях: $U_1, U_3, U_5, I_1, I_3, I_5$ – действующие значения гармоник напряжения и тока соответственно; $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5$ – фазовые углы сдвига гармоник напряжения относительно оси времени; ψ_1, ψ_3, ψ_5 – фазовые углы сдвига тока. В табл. 2 приведен математический аппарат, отражающий особенности формирования ортогональных составляющих мгновенной мощности при различном гармоническом составе исходных сигналов напряжения и тока. Формальный анализ выражений для амплитуд гармонических мощности показывает, что в

первом случае P_{2a} и P_{2b} 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 подтверждает «переход» компонент, образованных неканоническими гармониками ($m \neq n$), в ансамбль составляющих канонического порядка (коэффициенты, образованные произведением U и I со значениями $m=3$ и $n=1$ ($m \neq n$) в разряд составляющих канонического порядка ($m=n=1$). Очевидно, что при одинаковых значениях составляющих напряжения и тока для двух случаев ($m=3$ и $m=5$) действующие значения, например, тока равны $\sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2}$. Следовательно, $S_{1,3} = S_{1,5}$, т.е. имеем равные значения полной или кажущейся мощности устройства или системы для двух различных энергетических режимов.

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. Отсюда следует необходимость развития формализованных подходов к формированию новых показателей энергопроцессов, позволяющих оценить не только уровень гармонических тока и напряжения, но и их порядок.

Таблица 2 – Математический аппарат формирования составляющих мгновенной мощности

| Исходные сигналы напряжения и тока | |
|---|--|
| $u(t) = U_1 \cos(\Omega t - \varphi_1) + U_3 \cos(3\Omega t - \varphi_3);$ $i(t) = I_1 \cos(\Omega t - \psi_1) + I_3 \cos(3\Omega t - \psi_3);$ | $u(t) = U_1 \cos(\Omega t - \varphi_1) + U_5 \cos(5\Omega t - \varphi_5);$ $i(t) = I_1 \cos(\Omega t - \psi_1) + I_5 \cos(5\Omega t - \psi_5);$ |
| Ортогональные составляющие сигналов напряжения и тока | |
| $U_{1a} = U_1 \cos \varphi_1;$ $U_{1b} = U_1 \sin \varphi_1; U_{3a} = U_3 \cos \varphi_3; U_{3b} = U_3 \sin \varphi_3;$ $I_{1a} = I_1 \cos \psi_1; I_{1b} = I_1 \sin \psi_1;$ $I_{3a} = I_3 \cos \psi_3; I_{3b} = I_3 \sin \psi_3;$ | $U_{1a} = U_1 \cos \varphi_1; U_{1b} = U_1 \sin \varphi_1; U_{5a} = U_5 \cos \varphi_5;$ $U_{5b} = U_5 \sin \varphi_5; I_{1a} = I_1 \cos \psi_1; I_{1b} = I_1 \sin \psi_1;$ $I_{5a} = I_5 \cos \psi_5; I_{5b} = I_5 \sin \psi_5;$ |
| Мгновенная мощность | |
| $p(t) = u(t)i(t) =$ $= (U_{1a} \cos(\Omega t) + U_{1b} \sin(\Omega t) + U_{3a} \cos(3\Omega t) + U_{3b} \sin(3\Omega t)) \times$ $\times (I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + I_{3a} \cos(3\Omega t) + I_{3b} \sin(3\Omega t)) =$ $= P_0 + P_{2a} \cos(2\Omega t) + P_{2b} \sin(2\Omega t) + P_{4a} \cos(4\Omega t) +$ $+ P_{4b} \sin(4\Omega t) + P_{6a} \cos(6\Omega t) + P_{6b} \sin(6\Omega t);$ | $p(t) = u(t)i(t) =$ $= (U_{1a} \cos(\Omega t) + U_{1b} \sin(\Omega t) + U_{5a} \cos(5\Omega t) + U_{5b} \sin(5\Omega t)) \times$ $\times (I_{1a} \cos(\Omega t) + I_{1b} \sin(\Omega t) + I_{5a} \cos(5\Omega t) + I_{5b} \sin(5\Omega t)) =$ $= P_0 + P_{2a} \cos(2\Omega t) + P_{2b} \sin(2\Omega t) + P_{4a} \cos(4\Omega t) +$ $+ P_{4b} \sin(4\Omega t) + P_{6a} \cos(6\Omega t) + P_{6b} \sin(6\Omega t) +$ $+ P_{10a} \cos(10\Omega t) + P_{10b} \sin(10\Omega t);$ |
| Ортогональные составляющие мгновенной мощности | |
| $P_0 = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{1b}I_{1b}}{2} + \frac{U_{3a}I_{3a}}{2} + \frac{U_{3b}I_{3b}}{2};$ $P_{2a} = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{1a}I_{3a}}{2} - \frac{U_{1b}I_{1b}}{2} + \frac{U_{1b}I_{3b}}{2} +$ $+ \frac{U_{3a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{3b}I_{1b}}{2};$ $P_{2b} = \frac{U_{a1}I_{b1}}{2} + \frac{U_{a1}I_{b3}}{2} + \frac{U_{b1}I_{a1}}{2} + \frac{U_{b1}I_{a3}}{2} +$ $+ \frac{U_{a3}I_{b1}}{2} + \frac{U_{b3}I_{a1}}{2};$ $P_{4a} = \frac{U_{1a}I_{3a}}{2} - \frac{U_{1b}I_{3b}}{2} + \frac{U_{3a}I_{1a}}{2} - \frac{U_{3b}I_{1b}}{2};$ $P_{4b} = \frac{U_{1a}I_{3b}}{2} + \frac{U_{1b}I_{3a}}{2} + \frac{U_{3a}I_{1b}}{2} + \frac{U_{3b}I_{1a}}{2};$ $P_{6a} = \frac{U_{3a}I_{3a}}{2} - \frac{U_{3b}I_{3b}}{2}; P_{6b} = \frac{U_{3a}I_{3b}}{2} + \frac{U_{3b}I_{3a}}{2}.$ | $P_0 = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{1b}I_{1b}}{2} + \frac{U_{5a}I_{5a}}{2} + \frac{U_{5b}I_{5b}}{2};$ $P_{2a} = \frac{U_{1a}I_{1a}}{2} - \frac{U_{1b}I_{1b}}{2}; P_{2b} = \frac{U_{a1}I_{b1}}{2} + \frac{U_{b1}I_{a1}}{2};$ $P_{4a} = \frac{U_{1a}I_{5a}}{2} + \frac{U_{5a}I_{1a}}{2} + \frac{U_{1b}I_{5b}}{2} + \frac{U_{5b}I_{1b}}{2};$ $P_{4b} = \frac{U_{1a}I_{5b}}{2} - \frac{U_{1b}I_{5a}}{2} - \frac{U_{5a}I_{1b}}{2} + \frac{U_{5b}I_{1a}}{2};$ $P_{6a} = \frac{U_{1a}I_{5a}}{2} + \frac{U_{5a}I_{1a}}{2} - \frac{U_{5b}I_{1b}}{2} - \frac{U_{1b}I_{5b}}{2};$ $P_{6b} = \frac{U_{1a}I_{5b}}{2} + \frac{U_{1b}I_{5a}}{2} + \frac{U_{5a}I_{1b}}{2} + \frac{U_{5b}I_{1a}}{2};$ $P_{10a} = \frac{U_{5a}I_{5a}}{2} - \frac{U_{5b}I_{5b}}{2}; P_{10b} = \frac{U_{5a}I_{5b}}{2} + \frac{U_{5b}I_{5a}}{2}.$ |

Доказательством этого является известный факт разного влияния гармоник питающего напряжения на наиболее распространенные потребители – асинхронные двигатели. Показатели энергопроцесса, учитывающие высшие гармоники в напряжении и (или) в токе определяются соотношением $K_u = \sqrt{\sum_{n=1}^N U_n^2} / U_e$ – для коэффициента гармоник напряжения, $K_i = \sqrt{\sum_{m=1}^M I_m^2} / I_e$ – для коэффициента гармоник тока, где U_e, I_e – эффективные значения напряжения и тока. При равенстве коэффициентов искажения напряжения и тока в обоих примерах можно было бы судить о какой-то различности энергетических режимов. Выполненный ранее анализ со всей убедительностью подтверждает вывод, что на энергетический режим влияют не только значения коэффициентов искажения, но и непосредственно значения частот гармонических составляющих исходных сигналов напряжения и тока.

Подводя итог сказанному, подчеркнем такую деталь – определение параметров и показателей энергетического режима в значительной мере заключается в определении пяти компонент мгновенной мощности:

- постоянной составляющей мощности (активной мощности гармоник);
- косинусных составляющих мгновенной мощности канонического порядка;
- синусных составляющих мгновенной мощности канонического порядка;
- косинусных составляющих мгновенной мощности неканонического порядка;
- синусных составляющих мгновенной мощности неканонического порядка.

Все упомянутые составляющие могут быть получены из множеств компонент напряжения $\{U_{na}, U_{nb}\}$ и тока $\{I_{ma}, I_{mb}\}$, которые формируются путем анализа зависимостей $u(t)$ и $i(t)$ на заданном интервале с использованием теоретических положений аппарата Фурье. Было отмечено значение частотных преобразо-

ваний при умноженні компонент напруги і току с різними частотами. Порядок гармонік потужності при цьому визначається сумою і різницею порядків складових напруги і току $k_1 = m + n$; $k_2 = m - n$. Одна з складових зсувається в область високих частот, а друга – низьких: $k_1 > m$; $k_1 > n$; $k_2 < m$; $k_2 < n$. Ввиду того, що неканонічні складові миттєвої потужності носять ознаки обмінного енергетичного характеру, то частотні перетворення со всією очевидністю «деформують» частотний спектр потужності, роблячи його згладженим, т.е. «спокійним», або призводять до зростання змінних складових. Кожна з компонент характеризується своїми параметрами, в частині ефективним значенням, середнім, середнім по модулю і др. Ці значення визначаються з множин $\{U_{na}, U_{nb}\}$, $\{I_{ma}, I_{mb}\}$ в відповідності з алгоритмами, які створюються з урахуванням загальних теоретичних положень без урахування енергообмінних процесів – приведення одночастотних складових обмінного характеру, формують сумарні значення косинусних і синусних складових канонічного порядку $P_{ka\Sigma} = P_{kac} + P_{kas}$ і $P_{kb\Sigma} = P_{kbc} + P_{kbs}$.

З урахуванням сказаного залежність $\{P_k\}$ в формі множин можна записати так:

$$\{P_k\} = \{P_{k0}\} + \{P_{kac} + P_{kas}\} + \{P_{kbc} + P_{kbs}\} + \{P_{kaq}\} + \{P_{kbq}\}, \quad (9)$$

десь $P_{kaq} = P_{kas\Sigma} - P_{kas}$; $P_{kbq} = P_{kbs\Sigma} - P_{kbs}$.

Така форма запису нами запропонована в зв'язі з тим, що при енергообміні в результаті частотних перетворень з множин неканонічних компонент в множину канонічних переходить лише та частина компонент, частоти яких збігаються з частотами канонічних гармонік.

Отримане рівняння в часовій області відповідає залежності $p(t)$, яка в відповідності з особливостями формування гармонічних складових, описаними вище, має вигляд:

$$\begin{aligned} p(t) &= \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{kac}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbc}(t) + \\ &+ \left(\sum_{k=1}^K P_{kas}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kaq}(t) \right) + \left(\sum_{k=1}^K P_{kbs}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbq}(t) \right) = \\ &= \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \left(\sum_{k=1}^K P_{kac}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kas}(t) \right) + \\ &+ \left(\sum_{k=1}^K P_{kbc}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbs}(t) \right) + \sum_{k=1}^K P_{kaq}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbq}(t) = \\ &= \sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{ka\Sigma}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kb\Sigma}(t) + \\ &+ \sum_{k=1}^K P_{kaq}(t) + \sum_{k=1}^K P_{kbq}(t), \end{aligned} \quad (10)$$

де:

$$P_{k0\Sigma} = 0,5 \sum_0^{N,M} (U_{na} I_{ma} + U_{nb} I_{mb}) - \text{постійна складова миттєвої потужності або активна потужність, характеризує потужність, розсіювану споживачем;}$$

$$P_{kac} = 0,5 \sum_0^{N,M} (U_{na} I_{ma} - U_{nb} I_{mb}) - \text{знакоперемінна косинусна складова миттєвої потужності канонічного порядку, характеризує обмінну потужність між джерелом і споживачем (причому інтегральне її значення рівно нулю);}$$

результуюче значення косинусної неканонічної складової миттєвої потужності;

$$P_{kbc} = 0,5 \sum_0^{N,M} (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma}) - \text{знакоперемінна синусна складова миттєвої потужності канонічного порядку;}$$

результуюче значення синусної неканонічної складової миттєвої потужності;

$$P_{kas\Sigma} = P_{kas} + P_{kaq} = 0,5 \sum_0^{N,M} (U_{na} I_{ma} + U_{nb} I_{mb}) - \text{результуюче значення косинусної неканонічної складової миттєвої потужності;}$$

результуюче значення синусної неканонічної складової миттєвої потужності;

$$P_{kbs\Sigma} = P_{kbs} + P_{kbq} = 0,5 \sum_0^{N,M} (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma}) - \text{результуюче значення синусної неканонічної складової миттєвої потужності;}$$

результуюче значення синусної неканонічної складової миттєвої потужності;

P_{kas} , P_{kbs} – псевдоканонічні, відповідно, косинусна і синусна складові неканонічних гармонік потужності порядку K ;

P_{kaq} – знакоперемінна косинусна складова миттєвої потужності неканонічного порядку, характеризує обмінну потужність між джерелом і споживачем з різними частотами (при відсутності збігів частот канонічних і неканонічних гармонік);

P_{kbq} – знакоперемінна синусна складова миттєвої потужності неканонічного порядку;

$P_{ka\Sigma} = P_{kac} + P_{kas}$ – результуюче значення косинусної канонічної складової миттєвої потужності;

$P_{kb\Sigma} = P_{kbc} + P_{kbs}$ – результуюче значення синусної канонічної складової миттєвої потужності.

Обобщенная схема формування складових миттєвої потужності приведена на рис. 3.

На основі положень теорії множин нижче наведені оцінки складових потужностей, входять в загальне значення миттєвої потужності: $P_{e k0\Sigma} = \sum P_{k0\Sigma}$ – ефективне значення постійної

складової потужності; $P_{e kac} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum P_{kac}^2}$ – ефективне значення косинусної складової канонічної компоненти; $P_{e kbc} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum P_{kbc}^2}$ – ефективне значення синусної складової канонічної компоненти і т.п.

Ефективне значення миттєвої потужності можна розглядати як її основну міру:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^K P_{k0\Sigma}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{ka\Sigma}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kb\Sigma}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kaq}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbq}^2}. \quad (11)$$

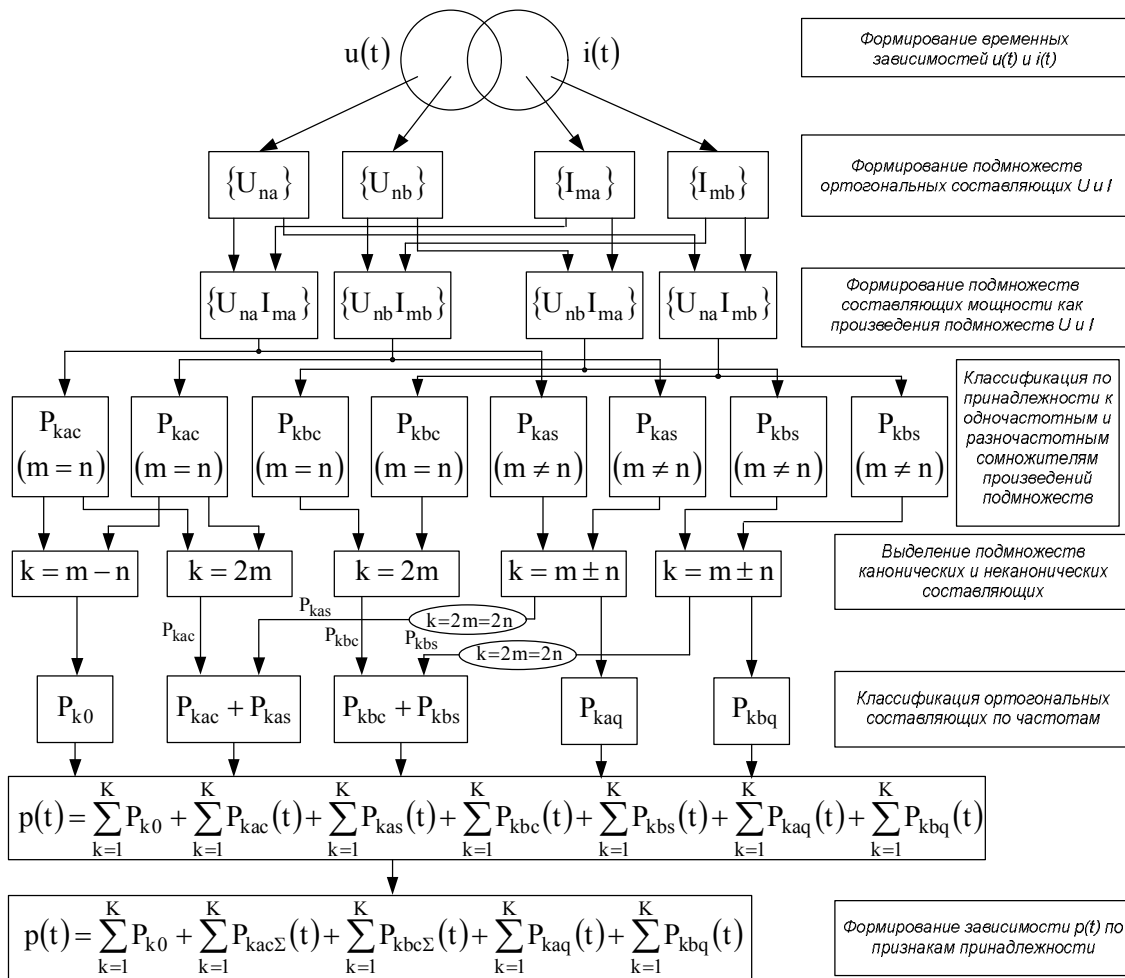


Рисунок 3 – Схема формирования составляющих мгновенной мощности

Иллюстрацией к сказанному являются временные зависимости формирования гармонических компонент мгновенной мощности и ее энергетический спектр, приведенные на рис. 4, для исходных сигналов напряжения и тока вида:

$$u(t) = U_1 \cos(\Omega t - \varphi_1) + U_3 \cos(3\Omega t - 3\varphi_1);$$

$$i(t) = I_1 \cos(\Omega t - \psi_1) + I_3 \cos(3\Omega t - 3\psi_1),$$

где $U_1 = 2$ В; $U_3 = 1,5$ В; $I_1 = 2$ А; $I_3 = 1,5$ А; $\varphi_1 = 0^\circ$; $\psi_1 = 15^\circ$.

Анализ полученных кривых показал, что мгновенная мощность в рассматриваемом случае включает следующую группу составляющих: постоянную компоненту P_0 , вторую $P_{2ac}(t)$, $P_{2bc}(t)$ и шестую $P_{6ac}(t)$, $P_{6bc}(t)$ канонические косинусные и синусные составляющие соответственно, вторую псевдоканоническую косинусную $P_{2as}(t)$ и синусную $P_{2bs}(t)$ компоненты, четвертую неканоническую косинусную $P_{4aq}(t)$ и синусную $P_{4bq}(t)$ составляющие.

Среднеквадратичные оценки полученных компонент мощности (диаграммы рис. 4) демонстрируют эффект «расползания» частот в энергетическом спектре мощности в сторону малых и больших частот. Очевидно, что при изменении коэффициента

искажения тока или напряжения этот эффект усиливается, что приводит к ухудшению режима энергопотребления.

Сказанное приводит к расширению возможного комплекса оценок энергопроцессов в пространстве мгновенной мощности, являющихся более содержательными ввиду большей информативности сигнала мгновенной мощности, характеризующего энергорежим.

ВЫВОДЫ. При создании общей теории и единых показателей энергопроцессов с использованием пространств мгновенных значений компонент, образующих мощность $p(t) = u(t)i(t)$, есть ряд положительных, заслуживающих, на наш взгляд, внимания:

элементы теории энергопроцессов должны быть применимы без ограничений при всех формах анализируемых сигналов (гармонических, полигармонических, периодических и непериодических, одночастотных и разночастотных, модулированных по амплитуде и частоте) и любых интервалах разложения (на периоде переменного напряжения, на части периода, на произвольном промежутке и др.);

принципы и особенности получения составляющих мгновенной мощности должны быть едиными независимо от физических особенностей сигналов (они должны быть применимы для электрических сетей, механических элементов, гидравлических

систем и т.п.);

в качестве математической базы создаваемой теории и показателей энергопроцессов могут быть использованы аппроксимирующие подходы на базе гармонического анализа, а также других, появившихся в последние годы методов анализа сигналов; показатели энергопроцессов должны опреде-

ляться на базе оценок мгновенной мощности, а также компонент, образующих мощность, поэтому получаемый комплекс оценок энергорежимов в пространстве мгновенной мощности априори следует считать более обширным и информативным по сравнению с существующими интегральными оценками энергопроцессов.

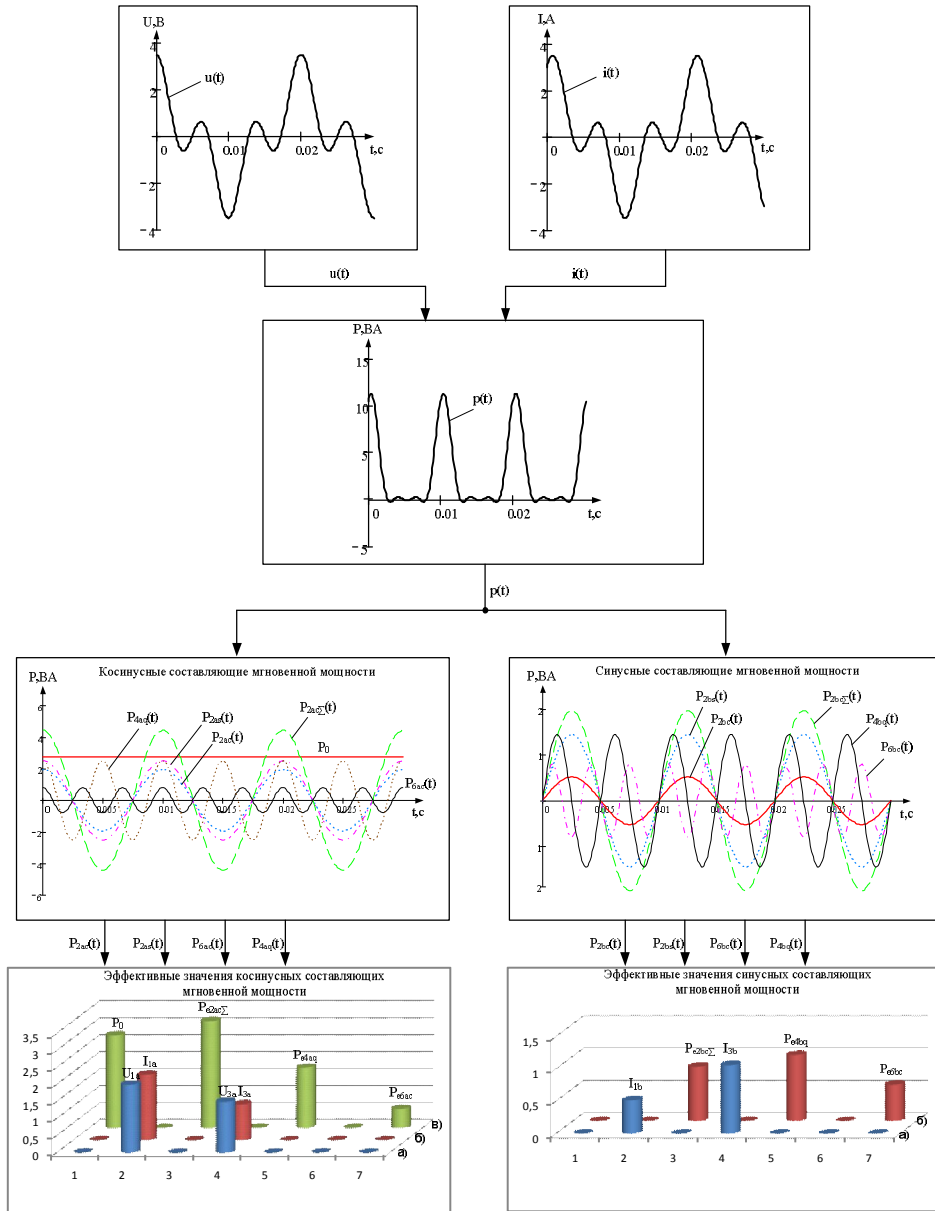


Рисунок 4 – Определение составляющих и энергетический спектр мгновенной мощности

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. – New York: Wiley, 2007. – PP. 41–217.

4. 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.
5. Kim H.S., Blaabjeerg F., Bak-Jensen B., Choi L. Instantaneous power compensation in thee-phase systems using p-q-r theoryю // IEEE Trans. Power Electronics. – 2002. – Iss. 12. – № 5. – PP. 701–710.
6. Крoгерис А.Ф., Рашевич К.К., Трейманис Э.Ц., Шинка Я.К. Мощность переменного тока. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.

7. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляционных преобразователей. – М.: Энергия, 1975. – 320 с.
8. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.Е., Денисюк С.П. Баланс энергий в силовых цепях. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с.
9. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах // Проблемы автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Днепро-дзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 507–512.
10. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Развитие частотных методов оценки параметров двигателей переменного тока // Вісник КДПУ. – Кременчук: Кременчуцький державний політехнічний університет, 2005. – № 3 (33), ч. 2. – С. 43–47.

11. Trzynadlowski A.M., Ritchie E. Comparative investigation of diagnostic media for induction motors: a case of rotor cage faults // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2000. – Iss. 47. – № 5. – PP. 1092–1099.

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

13. Zagirnyak M.V., Rod'kin D.I., Korenkova T.V. Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrica review)*. – 2011. – № 12b. – PP. 208–212.

PARTICULAR FEATURES OF FORMATION OF POLYHARMONIC SIGNALS INSTANTANEOUS POWER COMPONENTS

M. Zagirnyak, D. Rodkin, T. Korenkova

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

The mechanism of formation of polyharmonic signals instantaneous power components is considered from the set theory point of view. A mathematical apparatus for determination of canonic, non-canonic and pseudocanonic instantaneous power components is offered. The effect of strengthening of the power sign-changing component due to coincidence of canonic and pseudocanonic components frequencies is proved. The possibility of expansion of the complex of power processes estimation in instantaneous power space is demonstrated.

Key words: instantaneous power, polyharmonic signal, efficient power, power processes indices.

REFERENCES

1. 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.

2. 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.

3. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. – New York: Wiley, 2007. – PP. 41–217.

4. 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.

5. 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.

6. Krogeris A.F., Rashevits K.K., Treimanis E.Ts. Shinka Y.K. *AC power*. – Riga: Fiz energy. Inst Latviisk. Academy of Sciences, 1993. – 294 p. [in Russian]

7. Majewski O.A. *Energy performance of the converter*. – М.: Energiya, 1975. – 320. [in Russian]

8. Tonkal V.E., Novoseltsev A.E., Denisjuk S.P. *The energy balance in the power circuits*. – К.: Naukova dumka, 1992. – 312 p. [in Russian]

9. Rodkin D.I., Romashihin Y.V. The scope and efficiency of the method in Energodiagnostika identical tifikatsionnyh problems // *Problems automated electric. Theory and Practice*. – Dneprodzerzhinsk: DSTU, 2007. – PP. 507–512. [in Russian]

10. Rodkin D.I., Kalinov A.P., Romashihin Y.V. The development of methods to estimate the frequency-NCI parameters of AC motors // *News KDPU*. – Kremenchuk: KDPU, 2005. – № 3 (33), Part 2. – PP. 43–47. [in Russian]

11. Trzynadlowski A.M., Ritchie E. Comparative investigation of diagnostic media for induction motors: a case of rotor cage faults // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2000. – Iss. 47. – № 5. – PP. 1092–1099.

12. Rodkin D.I. Comment on the theory energoprotsesov with polyharmonic signals // *Collection of scientific works Kirovohrad National Technical University*. – 2004. – Iss. 15. – PP. 10–18. [in Russian]

13. Zagirnyak M.V., Rodkin D.I., Korenkova T.V. Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical review)*. – 2011. – № 12b. – PP. 208–212.

Стаття надійшла 20.08.2012.
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чорним О.П.