УДК 621.3.016.2:621.311.1

БАЛАНС СОСТАВЛЯЮЩИХ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Родькин Д.И., д.т.н., проф.
Кременчугский государственный политехнический университет им. М. Остроградского
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20, каф. САУЭ
E-mail: saue@polytech.poltava.ua

Робота присвячується теоретичному введенню понять канонічних та неканонічних рівнянь миттєвої потужності полігармонічних сигналів, що дозволило сформувати рівняння балансу потужності на всіх гармоніках спектру добутку рядів, що представляють напругу і струм. Теорія показує необґрунтованість використання понять миттєвої потужності при оцінюванні неактивних складових потужності джерела живлення і навантаження.
Ключові слова: миттєва потужність, ряди Фур'є, гармоніки, канонічні і неканонічні складові потужності.

The work is devoted to a theoretical substantiation of introduction of concepts of the initial and not initial equations of instant capacity polyharmonic of signals, that has allowed to generate the equations of balance of capacity on all harmonics of a spectrum of product of lines representing a voltage and a current. The theory shows groundlessness of use of concepts of instant capacity at a rating of inactive making capacity of the power supply and loading.
Keywords: instantaneous potency, Fourier serieses, harmonicses, canonical and uncanonical component potencies.

Введение. Сложные периодические сигналы напряжения и тока при анализе энергетических процессов аппроксимируются гармоническими рядами Фурье. В случае линейных устройств такой подход позволяет воспользоваться принципом суперпозиции, предполагающим независимость действия каждой из составляющих на уровне гармоник напряжения и тока. Произведение таких сигналов позволяет получить соответствующий периодический сигнал мгновенной мощности [1].

Наличие суперпозиционного принципа позволяет составить уравнения электрического равновесия для каждой из гармоник, которые могут служить основой для составления комплекса идентификационных уравнений при решении специфических задач электротехники и электромеханики. Дополнением к уравнениям электрического равновесия часто служит уравнение баланса активной мощности. Качество таких уравнений идентификации, как правило, недостаточно для получения параметров с большой точностью. По существу, такой подход не позволяет использовать преимущество полигармонических сигналов, заключающееся в том, что составляющие мгновенной мощности, определяемые из произведения $U(t)\cdot I(t)$, в комплексе зависят от всех гармоник тока (напряжения). Эта взаимозависимость существенна в том, что позволяет получить достаточное число независимых идентификационных уравнений [2, 3, 4].

Число таких уравнений существенно выше, чем сигналов напряжения и тока по следующим причинам:

- составляющих мощности существенно больше, чем составляющих в опорных сигналах напряжения (тока) благодаря тому, что между опорными сигналами имеется операция умножения;

- каждая из составляющих мгновенной мощности включает в себя три компоненты – постоянную составляющую, синусную и косинусные составляющие.

Цель работы. Определение механизма формирования составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов напряжения и тока, который однозначен как для линейных, так и для нелинейных систем, так как в основе лежит общее свойство мгновенной мощности электрических сигналов.

Материал и результаты исследования. При анализе энергопроцессов в устройствах и системах с полигармоническими сигналами чаще всего пользуются понятиями эффективных значений напряжения и тока, а также полной мощности, равной произведению эффективного напряжения и тока. Ряд авторов указывали в свое время на необоснованность такого подхода. Рассматриваемый вопрос имеет достаточно большое практическое и теоретическое значение. С этой целью рассмотрим выражение для полной мощности, полагая известным гармонический состав как тока, так и напряжения [1, 5]:

$$I(t)=\sqrt{2}\sum_{m=1}^{m=M}\dot{I}_m(t);$$
$$U(t)=\sqrt{2}\sum_{n=1}^{n=N}\dot{U}_n(t);\qquad(1)$$

где $I_m(t)=I_m\cos(m\Omega t-\varphi_m)$; $U_n(t)=U_n\sin(n\Omega t-\varphi_n)$; φ_m, φ_n - фазовые углы; m, n - порядок гармонических напряжения и тока.

Эффективные значения напряжения, тока, мощности [6, 7]:

$$I_э=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T\left(\sum_{m=1}^{m=M}\dot{I}_m(t)\right)^2dt}=\sqrt{I_1^2+I_2^2+...+I_m^2};$$

$$U_э=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T\left(\sum_{n=1}^{n=N}\dot{U}_n(t)\right)^2dt}=\sqrt{U_1^2+U_2^2+...+U_n^2};$$

$$S = U_э \cdot I_э = \sqrt{\left(I_1^2 + I_2^2 + ... + I_m^2\right)\left(U_1^2 + U_2^2 + ... + U_n^2\right)} =$$

$$= \sqrt{\sum_{\substack{m,n=1 \\ m=n}}^{m,n=M} U_n^2 \cdot I_m^2 + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^{m,n=M} U_n^2 \cdot I_m^2} \quad . \qquad (2)$$

Произведение $U_m \cdot I_n$ при $m = n$ означают полную мощность двух сигналов. По имеющимся представлениям [1, 5]:

$$\left. U_m \cdot I_n \right|_{m=n} = \sqrt{P_0^2 + Q^2}. \qquad (3)$$

Следовательно, последняя зависимость для полной мощности S будет:

$$S = \sqrt{\sum_{k=2}^{2M} P_{0k}^2 + \sum_{k=2}^{k=2M} Q_k^2 + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^{m,n=M} U_n^2 \cdot I_m^2}, \qquad (4)$$

где $k = 2m = 2n$.

При этом принято считать, что последняя составляющая в подкоренном выражении равна квадрату мощности искажения T . В соответствии с этим выражение для полной мощности:

$$S = \sqrt{P_{0\Sigma}^2 + Q_\Sigma^2 + T^2}, \qquad (5)$$

где $P_{0\Sigma}^2 = \sum_{k=2}^{2M} P_{0k}^2$; $Q_\Sigma^2 = \sum_{k=2}^{k=2M} Q_k^2$.

В соответствии с законом сохранения, активная мощность полигармонических сигналов:

$$P_{0\Sigma} = P_{01} + P_{02} + ... + P_{0m} \qquad (6)$$

В выражении (2) активная мощность равна:

$$\sum P_{0k}^2 = P_{01}^2 + P_{02}^2 + ... + P_{0m}^2.$$

Отсюда следует, что по параметру активной мощности:

$$\sum P_{0k} \neq P_{0\Sigma}. \qquad (7)$$

Соответствующий результат может быть получен для реактивной мощности, которую следует определить, например, для индуктивности:

$$Q_L = \frac{d}{dt}\left(L \cdot \frac{I(t)}{2}\right)^2.$$

При известных выражениях для напряжения и тока выражение для мощности будет иметь вид:

$$P(t) = U(t) \cdot I(t).$$

В случае известного гармонического состава составляющих легко определить гармонический состав мгновенной мощности.

Таблица 1 – Таблица гармоник мощности

N/n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
ν_{m_i}	-	1	-	-	-	5	-	7	-	-	-	11	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ν_{m_u}	-	1	-	-	-	5	-	7	-	-	-	11	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ν_{P_k}	0	-	2	-	4	-	6	-	8	-	10	-	12	-	14	-	16	-	18	-	20	-	22	-	24	-	26
$\nu_{P_{kc}}$	0	-	2	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	22	-	-	-	26
$\nu_{P_{ks}}$	-	-	2	-	4	-	6	-	8	-	10	-	12	-	14	-	16	-	18	-	20	-	-	-	-	-	-
$\nu_{P_{kq}}$	-	-	-	-	4	-	6	-	8	-	-	-	12	-	14	-	16	-	18	-	20	-	-	-	-	-	-

Из приведенной таблицы видно: при умножении друг на друга напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$, имеющих каждый из сигналов только по пять компонент (гармоник $\nu_{mi}\{1; 5; 7; 11; 13\}$; $\nu_{nu}\{1; 5; 7; 11; 13\}$), общее число компонент мощностей существенно больше - 14 шт. Это – четные гармоники от нуля до 26. Сам этот факт имеет достаточно весомое значение. Так, если для практических целей составить уравнения для идентификации параметров некоторой схемы, воспользовавшись заданным числом гармоник тока, то количество уравнений в нашем случае будет равно 5; если же составить уравнения по параметрам энергетического режима (гармоникам мощности), то число уравнений для идентификации будет 14 – т. е. почти в три раза больше. Это, несомненно, является положительным аспектом при выборе рациональных параметров идентификации.

Дополнительные преимущества можно выявить при анализе уровней сигналов напряжения и тока. В таблице 2 приведены относительные значения гармоник напряжения и тока, в долях от соответствующих значений первых гармонических.

Таблица 2 – Относительные значения гармоник напряжения и тока в долях от соответствующих значений первых гармоник

N / n	1	5	7	11	13
$\frac{I_m}{I_1}$	1,0	0,3	0,25	0,2	0,15
$\frac{U_n}{U_1}$	1,0	0.,5	0,2	0,17	0,14

Полная мощность десятой гармоники:

$$P_{10c} = U_5 \cdot I_5 = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,25 = 0,0375;$$

$$P_{10s} = I_{11} \cdot U_1 + I_1 \cdot U_{11} = 0,5(1,0 \cdot 0,2 + 1,0 \cdot 0,17) = 0,185.$$

Первая составляющая P_{10c} - каноническая составляющая мощности, полученная умножением напряжения U_5 и тока I_5 с одинаковыми частотами $m_i = n_u = 5$; вторая составляющая получена путем умножения соответствующих компонент с разными частотами $m_i = 11$ и $n_u = 1$, а также $m_i = 1$ и $n_u = 11$. Во всех случаях порядок гармоник мощности будет один, $k = 10$. Сравнение результатов приведенного примера показывает, что уровень гармоник мощности неканонического порядка может существенно превышать соответствующую величину составляющей канонического порядка. Таким образом, очевидно, что компоненты гармоник неканонического порядка могут быть существенны и ими нельзя пренебрегать, пользуясь необоснованным приемом выделения мощности искажения с последующим исключением ее из анализа. Этот прием хорошо известен из литературы и он сводится к составлению соответствующих уравнений баланса мощности в соответствии с выделенными гармониками напряжения и тока независимо от остальных.

Это замечание принципиально важно – анализ энергопроцессов для гармоник напряжения и тока независимо от других означает игнорирование известного положения теоретической электротехники: в линейных системах справедлив принцип суперпозиции для напряжений и токов; для мощности принцип суперпозиции несправедлив в виду того, что функция мощности является нелинейной функцией, для которой принцип суперпозиции не действителен. По существу это означает обоснованную недопустимость использования при анализе энергетических процессов принципа суперпозиции для мощности.

Механизм формирования составляющих мощности полигармонических сигналов уясним из схемы, приведенной на рис. 2.

С учетом аппроксимационных зависимостей для напряжения $U(t) = \sqrt{2}\sum_{n=1}^{n=N} \dot{U}_n$ и тока $I(t) = \sqrt{2}\sum_{m=1}^{m=M} \dot{I}_m$, где $\dot{U}_n, \dot{I}_m$ - амплитудные значения соответствующих гармоник напряжения и тока, получается выражение для мощности:

$$P(t) = U(t)\cdot I(t) = 2\cdot \sum_{m=1}^{m=M} \dot{I}_m \sum_{n=1}^{n=N} \dot{U}_n =$$

$$= \sum_{m=1;n=m;}^{m=M;M_i=N_u;} \dot{I}_m \cdot \sum_{n=1}^{n=N} \dot{U}_n + \sum_{m=1;n\neq m}^{m=M} \dot{I}_m \cdot \sum_{n-1}^{n=N} \dot{U}_n =$$

$$= P_1(t) + P_2(t).$$

Первая составляющая включает в произведения $\dot{I}_m \cdot \dot{U}_n$ только те, частоты которых одинаковы. По существу эта операция производится всякий раз, когда определяется активная и реактивная мощность через традиционный параметр полной (кажущейся) мощности S. Вторая часть мгновенной мощности $P_2(t)$ включает произведения $\dot{U}_n \cdot \dot{I}_m$, которые отвечают условию $m \neq n$. По существу – это составляющие мощности, которые формируют так называемую мощность искажения T, которая, как отмечает ряд авторов, не несет никакой смысловой нагрузки. Этот парадокс (мощность есть, а смысла нет) связан несомненно с тем, что смысловая составляющая этой компоненты просто не раскрыта исследователями. Дальше будет показано, что раскрытие физических механизмов, заложенных в формальное математическое действие, при умножении гармонических функций даст совершенно неожиданный результат, имеющий несомненное значение в теоретическом и практическом плане.

Для решения этого вопроса примем во внимание следующее:

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{ma} + \dot{I}_{mв}; \quad \dot{U}_n = \dot{U}_{na} + \dot{U}_{nв},$$

где $\dot{I}_{ma}, \dot{U}_{na}$ - косинусные составляющие соответствующих векторов.

В соответствии со сказанным, условимся, что элемент $P_i = U_{na}\cdot I_{ma}$, входящий в общее выражение для мгновенной мощности означает умножение одноименных компонент напряжения и тока. При этом, если $m = n$, то имеем умножение одноименных одночастотных компонент; если $m \neq n$, то речь идет об умножении одноименных разночастотных компонент. В случае, если $P_j = U_{na}\cdot I_{mв}$ и $n = m$, то имеет место произведение разноименных одночастотных компонент; при $n \neq m$ - произведение разноименных разночастотных компонент.

Сделаем дополнительно несколько существенных замечаний:

- произведение двух гармонических функций с частотами m_i и n_u дает две гармонические функции с частотами $k_1 = m_i + n_u$ и $k_2 = m_i - n_u$;
- произведение одноименных компонент всегда дает только косинусные компоненты;
- произведение разноименных компонент всегда дает только синусные компоненты с частотами $k_1 = m_i + n_u$ и $k_2 = m_i - n_u$;
- постоянная составляющая в произведении двух гармонических функций имеет место при умножении одноименных одночастотных функций.

Дополнительно условимся именовать произведения компонент одночастотного характера каноническими составляющими мощности. Результирующие частоты при этом будут:

$$k_{1c} = 0 \text{ и } k_{2c} = 2m = 2n.$$

Составляющие мощности, получаемые в результате умножения разночастотных компонент именуем неканоническими. Частоты гармоник мощности при этом:

$$k_{1s} = m_i + n_u, \quad k_{2s} = m_i - n_u.$$

При этом учтем, что индекс «c» соответствует каноническим составляющим, а «s» – неканоническим.

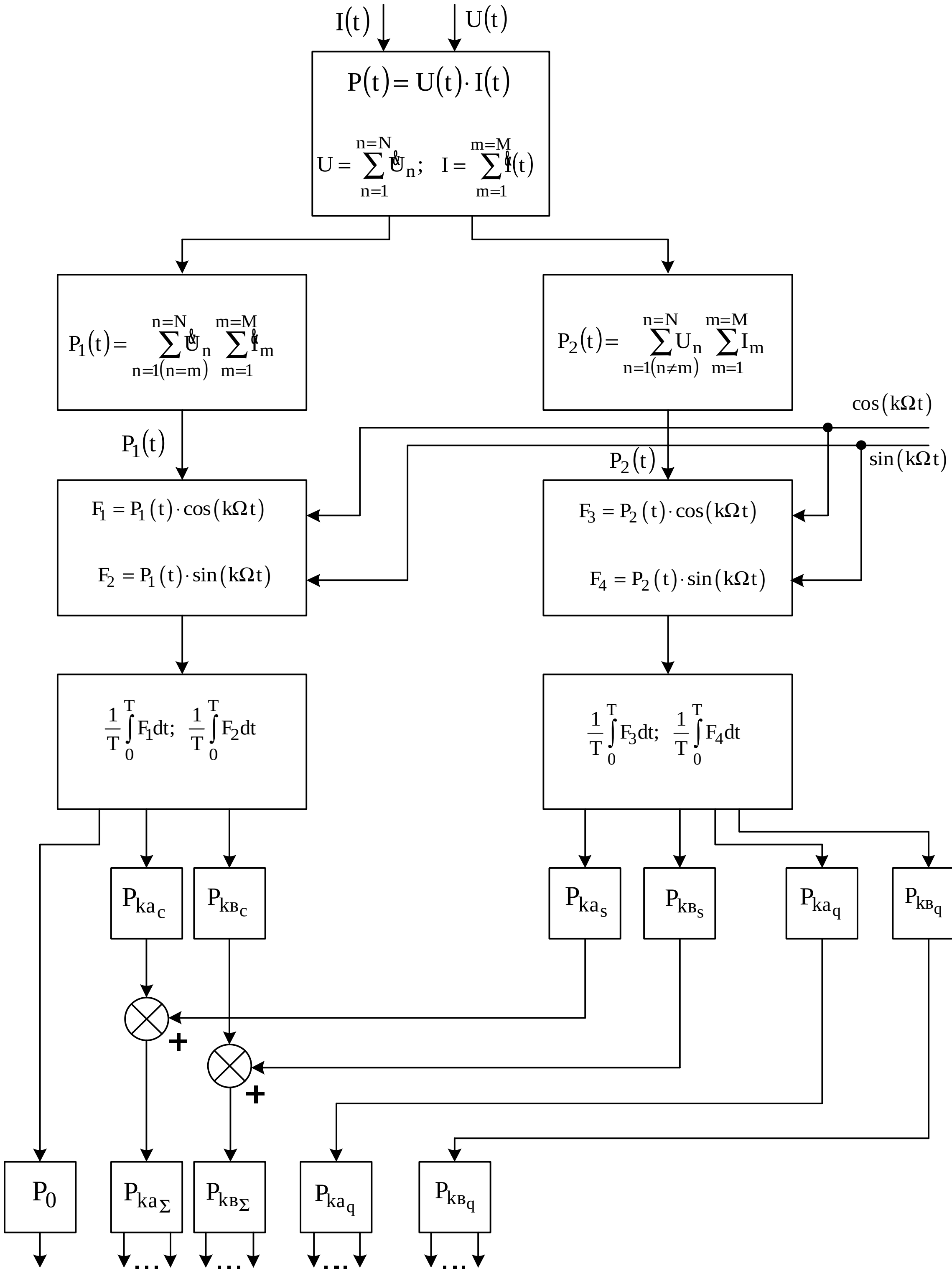

Рисунок 1 – Блок-схема формирования составляющих мощности

Анализ показывает, что по очевидным причинам частоты составляющих канонического порядка могут быть равны частотам составляющих неканонического порядка. Таким образом, имеют место зависимости:

$$k_c = 2m = 2n \text{ и } k_s = m + n$$

где равны $k_c = k_s$, а также $k_c' = 2m = 2n$ и $k_s = m - n$ соответствуют $k_c' = k_s'$.

Сказанное подтверждается таблицей частот компонент, полученной при формировании мощности сигналами напряжения и тока с относительными частотами $\nu_{m,n}\{1;\ 5;\ 7;\ 11;\ 13\}$. Частоты неканонических составляющих, которые совпадают с каноническими – $\nu_{p,k}\{2;\ 10;\ 14\}$. Эти составляющие, естественно переходят к каноническим, соответствующим образом изменяя их. Оставшиеся составляющие неканонического порядка с частотами ν_{pkq} функционируют независимо, участвуя в формировании всего ансамбля гармоник мгновенной мощности.

Сказанное косвенно подтверждает тот факт, что при полигармонических напряжениях недопустимо пользоваться только каноническими составляющими – с одной стороны, а с другой – составляющие гармоник канонического и неканонического порядка при равенстве их частот суммируются не геометрически, а арифметически.

Определение отдельно взятых гармоник мощности осуществляется путем синтезирования соответствующих зависимостей $P_1(t)$ и $P_2(t)$, рис.1.

При этом косинусные и синусные составляющие гармоник мощности канонического порядка получаются таким путем:

$$P_{ka_c} = \frac{1}{T}\int_0^T P_1(t)\cdot\cos(k\Omega t)\cdot dt;$$
$$P_{kв_c} = \frac{1}{T}\int_0^T P_1(t)\cdot\sin(k\Omega t)\cdot dt, \tag{8}$$

где $k = 0;\ 2;\ldots + 2M \mp 2N$.

При этом для $k = 0$ получается известное выражение:

$$P_{ko_\Sigma} = \frac{1}{T}\int_0^T \left(P_1(t) + P_2(t)\right) dt = \frac{1}{T}\int_0^T P_1(t)\cdot dt. \tag{9}$$

Значения переменных составляющих мощности неканонического порядка с частотами канонических гармоник мощности можно получить так:

$$P_{ka_s} = \frac{1}{T}\int_0^T P_2(t)\cos(k_c\Omega t)\cdot dt;$$
$$P_{kв_s} = \frac{1}{T}\int_0^T P_2(t)\sin(k_c\Omega t)\cdot dt\ . \tag{10}$$

Неканонические составляющие других (несовпадающих) частот определяется таким путем:

$$P_{ka_q} = \frac{1}{T}\int_0^T P_2(t)\cos\left(k_q\Omega t\right)\cdot dt;$$
$$P_{kв_q} = \frac{1}{T}\int_0^T P_2(t)\sin\left(k_q\Omega t\right)\cdot dt. \tag{11}$$

Общая зависимость для составляющих мгновенной мощности:

$$P(t) = P_{0\Sigma} + P_{ka_\Sigma} + P_{kв_\Sigma} + P_{ka_{q\Sigma}} + P_{kв_{q\Sigma}}, \tag{12}$$

где
$$P_{0\Sigma} = \sum_{k=2}^{k=2M} P_{0k};$$
$$P_{ka_\Sigma} = \sum_{k=2}^{k=2m}\left(P_{ka_c} + P_{ka_s}\right);$$
$$P_{kв_\Sigma} = \sum_{k=2}^{k=2m}\left(P_{kв_c} + P_{kв_s}\right);$$
$$P_{ka_{q\Sigma}} = \sum P_{ka_q};$$
$$P_{kв_{q\Sigma}} = \sum P_{kв_q}.$$

Выполненный анализ показывает, что составляющие мощности, формируясь из канонических и неканонических компонент, образуют единую систему, включающую постоянную составляющую в форме суммы составляющих активной мощности всех пар гармоник напряжения и тока одинаковых порядков, а также из ансамбля переменных составляющих мощности, образованных произведениями одночастотных и разночастотных компонент напряжения и тока. Общее число компонент мгновенной мощности зависит от числа гармоник напряжения и тока, образуя совокупность для $k = m_i \pm n_j$ исключая $m = n$ при $M > i > 1{,}0$ и $N > j > 1{,}0$.

Важный вывод, получаемый при этом, заключается в том, что гармоники k-го порядка подчиняются принципу суперпозиции, т.е. действуют независимо друг от друга. Это означает, что общеизвестное положение о том, что потребляемая мощность источника равна сумме потерь мощности во всех элементах электрической цепи

$$P_u = \sum_{r=1}^{r=x} \Delta P_r \tag{13}$$

может быть трансформировано в баланс мощностей всех гармоник

$$P_{0\Sigma} = \sum_{m=1}^{m=M(G_o)} P_{0k}\ , \tag{14}$$

а также переменных косинусных и синусных составляющих гармоник k-го порядка

$$P_{ka_\Sigma} = \sum_{j=1}^{j=Ga} P_{ka_j}; \tag{15}$$

$$P_{kв_\Sigma} = \sum_{j=1}^{j=Gв} P_{kв_j}. \tag{16}$$

В этом видится одна из модификаций закона сохранения энергии, представляемая в форме баланса мгновенных составляющих мощности соответствующего порядка источника и потребителей.

Соответствующие выражения могут быть получены для известных элементов, входящих в то или иное электротехническое устройство. Это позволяет составить уравнения баланса для практически любой схемы. Число уравнений энергетического баланса при этом в пределе может быть равно числу гармоник мгновенной мощности, включая постоянную составляющую [4].

Конкретизируем сказанное с помощью следующего примера. На рис. 2 представлена схема замещения фазы асинхронного двигателя, питающегося от источника полигармонического напряжения вида (1). Ток в статорной цепи при этом будет представлен зависимостью (2). Токи в силовых цепях двигателя равны соответственно [2]:

- ток роторного контура:

$$\sum_{m=1}^{m=M} I_{2m} = \sum_{m=1}^{m=M}\left(\dot{I}_{1ma} - \dot{I}_{\mu ma}\right) + \sum\left(\dot{I}_{1mв} - \dot{I}_{\mu mв}\right), \tag{17}$$

при $\sum_{m=1}^{m=M} \dot{I}_{1m} = \sum_{m=1}^{m=M} \dot{I}_{1ma} + \sum_{m=1}^{m=M} \dot{I}_{1mв};$

- ток намагничивания:

$$\sum_{m=1}^{m=M} \tilde{I}_{\mu m} = \sum_{m=1}^{m=M} \tilde{I}_{\mu ma} + \sum_{m=1}^{m=M} \tilde{I}_{\mu m в} . \qquad (18)$$

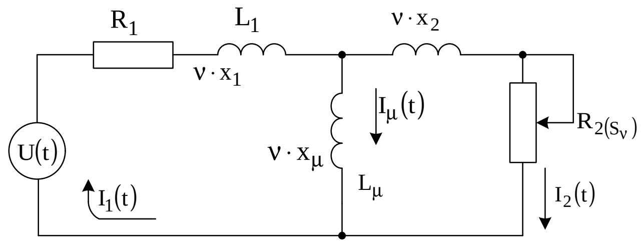

Рисунок 2 – Схема замещения фазы асинхронного двигателя

Параметры двигателя: индуктивное сопротивление рассеяния статора x_1 (частота f=50 Гц), индуктивное сопротивление ротора x_2; индуктивное сопротивление контура намагничивания x_μ; активное сопротивление роторной цепи $R_2(S_\nu)$; S_ν - относительное скольжение ротора при относительной частоте питания $n = \nu$.

В соответствии с положениями, вытекающими из теории Теленжена, можно записать такое уравнение баланса [9, 10]:

$$P_u(t) = P_{R_1}(t) + P_{L_1}(t) + P_{L_\mu}(t) + P_{L_2}(t) + P_{R_{2(Sv)}}(t), \qquad (19)$$

где

$$P_u(t) = \sum_{m,n=1}^{M=N(к=2m)} P_{кou} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кau} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв u};$$

$$P_{R_1}(t) = \sum_{к=2}^{к=2m} P_{кo R1} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa R_1} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв R_1};$$

$$P_{L_1}(t) = 0 + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa L_1} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв L_1};$$

$$P_{L_\mu}(t) = 0 + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa\mu} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв\mu};$$

$$P_{L_2}(t) = 0 + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa L_2} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв L_2};$$

$$P_{R_{2(Sv)}}(t) = \sum_{\substack{m,n=1 \\ к=2}}^{M,N} P_{кo R_2} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa R_2} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв R_2}.$$

Общее уравнение баланса мощностей, а также уравнения мгновенной мощности элементов схемы замещения позволяет составить систему уравнений баланса для каждой из гармоник, входящих в (19). Сущность уравнений системы заключается в том, что для каждой из гармоник составляющая мгновенной мощности источника равна сумме составляющих мгновенной мощности всех элементов схемы замещения. Это положение принципиально важно в следующем отношении. Каждое из уравнений системы связывает параметры схемы замещения с токами в отдельных элементах. В общем виде эта система уравнений выглядит следующим образом:

$$\sum_{к_o=2}^{к_o=2M} P_{к_o u\Sigma} = \sum_{к_o=2}^{к_o=2M} P_{к_o R_1} + \sum_{к_o=2}^{к_o=2M} P_{к_o R_2}; \qquad (20)$$

$$\sum_{к=2}^{к=2M} P_{к_{au}} = \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa R_1} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa L_1} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa L_2} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa\mu} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кa R_2}; \qquad (21)$$

$$\sum_{к=2}^{к=2M} P_{к_{вu}} = \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв R_1} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв L_1} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв L2} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв\mu} + \sum_{к=2}^{к=2M} P_{кв R_2}. \qquad (22)$$

Уравнение (20), входящее в систему, определяет сумму активных мощностей одноименных гармоник напряжения и тока анализируемого процесса при заданных значениях параметров M и N. При этом соблюдается баланс мощностей и для отдельно взятых пар гармоник напряжения и тока. Так, например, для первых гармоник:

$$P_{2ou} = P_{2oR_1} + P_{2oR_2}.$$

Суммирование по всем гармоникам и элементам схемы замещения позволяет получить активную мощность источника – суммарное значение нулевой гармоники.

Два других уравнения системы определяют баланс мощностей на каждой из гармоник мгновенной мощности – синусных и косинусных. Общее число таких уравнений баланса для уравнения (21) равно G_a, а для уравнения (22) – $G_в$. Общее число уравнений баланса будет:

$$G_\Sigma = G_a + G_в + G_0.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАНЫЕ

1. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей, М.: Энергия, 1978, - 318 с.

2. Родькин Д.И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии // Вісник КДПУ, 2003, випуск 1. - С. 80-85.

3. Родькин Д.И., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническим напряжением и током. // Электротехника, №6, 2004, С. 37-41.

4. Калинов А.П., Лейко В.В., Родькин Д.И. Спектральный анализ мгновенной мощности в сети с полигармоническим напряжением и током. // Вестник Кременчугского политехнического университета, выпуск 3/2006 (38), часть 2, С. 59-72.

5. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.

6. Зиновьев А.А., Филиппов Л.И. Введение в теорию сигналов и цепей. – М.: Высшая школа, 1968. - 280 с.

7. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей, М.: Связь, 1972. - 326 с.

8. Сиберг У.М. Цепи, сигналы, системы. М.: Мир, 1988. - 265 с.

9. Дезоер Ч.А., КУ Э.С. Основы теории цепей, М.: Связь, 1976. - 200 с.

Стаття надійшла 25.04.2007 р.