

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

Докт. техн. наук, проф. РОДЬКИН Д. И., асп. РОМАШИХИН Ю. В.

*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского*

Теория мощности в цепях с несинусоидальными сигналами начала развиваться в начале XX ст. с развитием электрификации [1]. Значительный интерес к исследованиям энергопроцессов в электрических цепях наблюдался в связи с освоением вентиляльных устройств и систем, характеризующихся несинусоидальными напряжениями и токами [2, 3]. Анализ энергопроцессов в цепях с несинусоидальными напряжениями и токами проводился по аналогии с анализом в цепях с синусоидальными сигналами. Это вызвало ряд противоречий при определении мощности и привело к появлению значительного числа ее составляющих [2–6], которые связывают либо с реактивной мощностью [6], либо с мощностью искажения [2, 5].

Интерес к качеству электрической энергии вызвал поток исследований и публикаций, затрагивающих энергетическую сторону процессов [7, 8]. Эти процессы, с одной стороны, определяются воздействиями от источников питания, а с другой – электрическими, электромагнитными и механическими процессами в отдельных звеньях потребителя.

В [9] показана некорректность применения теории полной мощности для анализа несинусоидальных процессов ввиду несоответствия ее основному закону – закону сохранения энергии. Здесь следует отметить ошибочность определения активной мощности несинусоидальных сигналов, искусственности приемов при определении неактивных составляющих полной мощности и т. п.

Составляющие полной мощности (активной, реактивной, мощности искажения и т. п.) рассматривались в [1, 5, 6]. Мгновенная мощность определяется в виде произведения  $P(t) = U(t)I(t)$  и содержит составляющие – постоянную, косинусные и синусные [3, 7, 9, 10]. Детально этот вопрос анализировался и авторами [8, 11, 12].

Как показано в [7, 11, 12], представление энергопроцессов в форме уравнений баланса составляющих мгновенной мощности в элементах анализируемой системы позволяет решить ряд задач диагностического и энергетического характера для сколь угодно сложной электротехнической системы.

Анализ энергопроцессов, отражающих поведение электромеханического комплекса, который включает в себя электромеханическую систему и производственный механизм с передаточным устройством, следует проводить с использованием уравнений баланса мощностей или энергий. Эффективное применение такого подхода возможно при наличии совокупности уравнений для составляющих мгновенной мощности во всех элементах электротехнического комплекса. Базовым уравнением баланса является равенство мгновенной мощности источника питания  $P_{\text{и}}(t)$  и сумм мгновенных мощностей элементарных потребителей, входящих в комплекс [7]:

$$P_u(t) = \sum_{i=1}^H P_i(t),$$

где  $i$  – индекс соответствующего элементарного потребителя;  $H$  – количество элементарных потребителей.

Баланс мощности вытекает как следствие из теоремы Телледжена: сумма произведений напряжений  $U_i(t)$  и токов  $I_i(t)$  всех ветвей цепи, удовлетворяющих законам Кирхгофа, равна нулю [2]. Произведение  $U_i(t)I_i(t)$  представляет собой мгновенную мощность  $P_i(t)$   $i$ -й ветви, поэтому сумма мощностей всех ветвей цепи равняется нулю. Если выделить ветви с независимыми источниками, то баланс мощности можно сформулировать следующим образом: сумма мощностей, отдаваемых независимыми источниками, равняется сумме мощностей, потребляемых остальными ветвями электрической цепи.

Применительно к известной Т-образной схеме замещения [11] асинхронного двигателя с индуктивностями рассеяния статора  $L_1$  и ротора  $L_2$ , индуктивностью контура намагничивания  $L_\mu$ , сопротивлением статора  $R_1$ , сопротивлением ротора  $R_2$  и сопротивлением контура намагничивания  $R_\mu$  в качестве элементарных потребителей выступает каждый из параметров схемы замещения. Уравнения баланса мгновенной мощности одной фазы двигателя составляются в виде равенств составляющих мгновенной мощности источника питания и составляющих мгновенной мощности всех элементов электромеханической системы [7, 11, 12]:

$$P_u(t) = P_{R_1}(t) + P_{R_2}(t) + P_{R_\mu}(t) + P_{L_1}(t) + P_{L_2}(t) + P_{L_\mu}(t), \quad (1)$$

где  $P_{R_1}(t)$ ,  $P_{R_2}(t)$ ,  $P_{R_\mu}(t)$ ,  $P_{L_1}(t)$ ,  $P_{L_2}(t)$ ,  $P_{L_\mu}(t)$  – значения мгновенных мощностей элементов схемы замещения, определяемых в соответствии с [5, 9]:

- для активного сопротивления  $P_R(t) = E_R(t)I(t) = I^2(t)R$ ;
- для индуктивности  $P_L(t) = E_L(t)I(t) = L \frac{dI(t)}{dt} I(t)$ ;
- для емкости  $P_C(t) = E_C(t)I(t) = I(t) \left( E_{C_0} + \frac{1}{C} \int_0^T I(t) dt \right)$ ;
- для нелинейного активного сопротивления  $P_R(t) = E_R(t)I(t) = I^2(t)R(t)$ ;
- для нелинейной емкости  $P_C(t) = E_C(t)I(t) = \left( E_{C_0} + \int_0^T \frac{I(t)}{C(t)} dt \right) I(t)$ ;
- для нелинейной индуктивности

$$P_L(t) = E_L(t)I(t) = \frac{d(I(t)L(t))}{dt} I(t) = I^2(t) \frac{dL(t)}{dt} + L(t)I(t) \frac{dI(t)}{dt},$$

где  $E_{C_0}$  – остаточная ЭДС.

Использование этих зависимостей для практических целей, например решения идентификационных задач или оценки характера энергетического

режима, осуществляется путем представления напряжений и токов в цепях анализируемой схемы в виде гармонических рядов. Это наиболее просто реализуется с помощью рядов Фурье. При этом появляется возможность использовать уравнения баланса косинусных и синусных составляющих всего ансамбля гармоник мгновенной мощности.

Представим несинусоидальные зависимости напряжения и тока в форме усеченных гармонических рядов [10]:

$$U(t) = \sum_{n=0}^N U_n \cos(n\Omega t - \varphi_n); \quad (2)$$

$$I(t) = \sum_{m=0}^M I_m \cos(m\Omega t - \varphi_m), \quad (3)$$

где  $U_n$  – амплитудные значения составляющих напряжения высших гармоник;  $n$  – номер гармоники напряжения;  $N$  – число гармоник напряжения;  $\Omega$  – круговая частота сети;  $\varphi_n$  – угол сдвига фаз между напряжением и вещественной осью  $a$  (принимается, что вектор первой гармоники напряжения совпадает с вещественной осью, т. е.  $\varphi_1 = 0$ );  $I_m$  – амплитудные значения составляющих тока высших гармоник;  $m$  – номер гармоники тока;  $M$  – число гармоник тока;  $\varphi_m$  – угол сдвига фаз между током и напряжением.

Используя простейшие координатные преобразования с вещественной осью  $a$  и мнимой  $b$ , получим:

$$U(t) = \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) + \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t); \quad (4)$$

$$I(t) = \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \sum_{m=0}^M I_{mb} \sin(m\Omega t), \quad (5)$$

где

$$U_{na} = U_n \cos(\varphi_n); \quad U_{nb} = U_n \sin(\varphi_n); \quad I_{ma} = I_m \cos(\varphi_m); \quad I_{mb} = I_m \sin(\varphi_m);$$

$U_{na}, I_{ma}$  – косинусные гармонические составляющие напряжения и тока;  $U_{nb}, I_{mb}$  – то же синусные.

Тогда зависимость для мгновенной мощности с учетом выражений (4) и (5) приобретает вид [8]

$$\begin{aligned} P(t) = U(t)I(t) &= \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{mb} \times \\ &\times \sin(m\Omega t) + \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{mb} \sin(m\Omega t) + \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t) \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{ma} + U_{nb} I_{mb}) \cos((m-n)\Omega t) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{ma} - U_{nb} I_{mb}) \times \\ &\times \cos((m+n)\Omega t) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma}) \sin((m-n)\Omega t) + \end{aligned} \quad (6)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma}) \sin((m+n)\Omega t).$$

Из зависимости (6) следует, что мгновенная мощность состоит из двух групп составляющих. Первая группа образуется в результате умножения одночастотных компонент напряжения и тока, т. е. при  $m = n$ . При этом частоты гармоник мгновенной мощности:  $k_c = m - n = 0$ ;  $k_c = m + n = 2m$ . Нулевая частота  $k = 0$  соответствует постоянному значению мощности.

Вторая группа составляющих мгновенной мощности образуется в результате умножения разночастотных компонент напряжения и тока ( $m \neq n$ ). Частоты гармоник мгновенной мощности при этом  $k_s = m \pm n \neq 0$ .

Для удобства именуем частоты и составляющие мгновенной мощности, полученные путем перемножения одночастотных составляющих, каноническими частотами и составляющими и отмечаем индексом  $c$  ( $k_c, P_c$ ), а соответствующие частоты и составляющие мгновенной мощности, полученные в результате перемножения разночастотных компонент, – неканоническими и обозначим индексом  $s$  ( $k_s, P_s$ ). Таким образом, при  $m = n$  имеем гармоники мощности канонического порядка  $k_c$ , а при  $m \neq n$  – неканонического порядка  $k_s$ .

Разделение знакопеременных составляющих мощности на канонические и неканонические позволяет записать выражение для мощности в таком виде [8]

$$P(t) = P_{k_0} + \sum_{k=1}^{M+N} P_{ka}(t) + \sum_{k=1}^{M+N} P_{kb}(t) = P_{k_0} + \sum_{k=1}^{M+N} (P_{ka_c}(t) + P_{ka_s}(t)) + \sum_{k=1}^{M+N} (P_{kb_c}(t) + P_{kb_s}(t)). \quad (7)$$

Гармоники мощности (косинусные и синусные) с частотами  $k$  выражаются так:

$$P_{ka}(t) = (P_{ka_c} + P_{ka_s}) \cos(k\Omega t); \quad (8)$$

$$P_{kb}(t) = (P_{kb_c} + P_{kb_s}) \sin(k\Omega t),$$

где

$$P_{ka_c} + P_{ka_s} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{ma} + U_{nb} I_{mb}) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{ma} - U_{nb} I_{mb});$$

$$P_{kb_c} + P_{kb_s} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (U_{na} I_{mb} + U_{nb} I_{ma}).$$

Таким образом, мгновенная мощность, кроме постоянной компоненты, включает в себя косинусные и синусные, канонические и неканонические составляющие. Частоты гармоник мгновенной мощности  $k$  формируются в результате умножения всего ансамбля гармоник напряжения  $n$  и тока  $m$  и определяются как  $k = m \pm n$ . Так, 4-я гармоника мгновенной мощности

( $k = 4$ ) при наличии в сигналах напряжения и тока гармоник с номерами  $m = n = 1, 3, 5, 7$  формируется всеми рассматриваемыми гармониками:  $k = m + n = 1 + 3 = 4$ ;  $k = m - n = 5 - 1 = 4$ ;  $k = m - n = 7 - 3 = 4$ .

Выполненный анализ указывает на возможность получения зависимости, связывающей составляющие тока и напряжения на конкретном элементе схемы замещения с компонентами мгновенной мощности  $k$ -го порядка. Это, в свою очередь, позволяет составить уравнения баланса составляющих гармоник мгновенной мощности на элементах схемы замещения и источнике полигармонического напряжения.

Уравнения баланса мощности имеют общий характер и формируются в виде равенств составляющих мощности источника питания и составляющих мощности всех элементов электромеханической системы. В качестве составляющих мощности могут быть использованы активная мощность, реактивная мощность, канонические составляющие гармоник мгновенной мощности, неканонические составляющие гармоник мгновенной мощности, полные составляющие гармоник мгновенной мощности, которые включают в себя канонические и неканонические составляющие. Уравнения баланса мощностей принимают вид: уравнения баланса активной мощности  $P_{0u} = \sum_{i=1}^H P_{0i}$ ; уравнения баланса реактивной мощности  $Q_{ku} = \sum_{i=1}^H Q_{ki}$ ;

уравнения баланса канонических составляющих мгновенной мощности  $P_{ku_c} = \sum_{i=1}^H P_{ki_c}$ ; уравнения баланса неканонических составляющих мгновенной мощности  $P_{ku_s} = \sum_{i=1}^H P_{ki_s}$ ; уравнения баланса полных составляющих

мгновенной мощности  $P_{ku_c} + P_{ku_s} = \sum_{i=1}^H (P_{ki_c} + P_{ki_s})$ .

Уравнения баланса активной мощности формируются в виде равенства составляющих гармоник активной мощности источника питания  $U_{1v} I_{1v} \cos \phi_{1v}$  составляющим гармоник активной мощности на активных сопротивлениях  $I_{iv}^2 R_i$ , уравнения баланса реактивной мощности формируются в виде равенства составляющих гармоник реактивной мощности источника питания  $U_{1v} I_{1v} \sin \phi_{1v}$  составляющих гармоник реактивной мощности на индуктивных сопротивлениях  $I_{iv}^2 X_i$ .

Как показали исследования, достаточно эффективные методы идентификации параметров электромеханических систем базируются на уравнениях баланса мощности цепей схем замещения [7, 11, 12]. Определение электромагнитных параметров возможно при питании асинхронного двигателя полигармоническим напряжением (например, от тиристорного регулятора напряжения). Схему замещения асинхронного двигателя при питании от тиристорного регулятора напряжения можно представить T-образной схемой замещения, которая состоит из первичного кон-

тура  $(R_1, \nu X_1)$ , контура намагничивания  $(R_\mu, \nu X_\mu)$  и вторичной цепи  $(R_2, \nu X_2)$  [12].

Система уравнений баланса мощностей для Т-образной схемы замещения составляется для каждой из гармоник в виде равенства составляющих мгновенной мощности источника полигармонического напряжения сумме составляющих мгновенной мощности на активных и индуктивных сопротивлениях статорной и роторной цепей и контура намагничивания [11, 12]:

$$\begin{cases} P_{0u\Sigma} = P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R'_2}; \\ P_{kau\Sigma} = P_{kaR_1} + P_{kaR_\mu} + P_{kaR'_2} + P_{kaL_1} + P_{kaL_\mu} + P_{kaL'_2}; \\ P_{kbu\Sigma} = P_{kbR_1} + P_{kbR_\mu} + P_{kbR'_2} + P_{kbL_1} + P_{kbL_\mu} + P_{kbL'_2}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $P_{0u\Sigma}$ ,  $P_{0R_1}$ ,  $P_{0R_\mu}$ ,  $P_{0R'_2}$  – постоянные составляющие мгновенной мощности соответственно источника полигармонического напряжения и активных сопротивлений первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи;  $P_{kau\Sigma}$ ,  $P_{kbu\Sigma}$  – косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности источника полигармонического напряжения;  $P_{kaR_1}$ ,  $P_{kbR_1}$ ,  $P_{kaR_\mu}$ ,  $P_{kbR_\mu}$ ,  $P_{kaR'_2}$ ,  $P_{kbR'_2}$  – то же на активных сопротивлениях первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи;  $P_{kaL_1}$ ,  $P_{kbL_1}$ ,  $P_{kaL_\mu}$ ,  $P_{kbL_\mu}$ ,  $P_{kaL'_2}$ ,  $P_{kbL'_2}$  – то же на индуктивностях первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи.

Выражения для постоянной, косинусных и синусных составляющих мгновенной мощности при использовании трех гармоник напряжения и тока ( $m = n = 1, 3, 5$ , принято, что  $\varphi_{1m} = 0$ ):

- для источника полигармонического напряжения:

$$\begin{aligned} P_{0u\Sigma} &= \frac{1}{2}(U_1 I_{1a_1} + U_{1_3} I_{1a_3} + U_{1_5} I_{1a_5}); \\ P_{2au\Sigma} &= \frac{1}{2}(U_1 I_{1a_1} + U_{1_3} I_{1a_3} + U_{1_5} I_{1a_5} + U_{1_3} I_{1a_1} + U_{1_5} I_{1a_3}); \\ P_{2bu\Sigma} &= \frac{1}{2}(U_1 I_{1b_1} + U_{1_3} I_{1b_3} - U_{1_3} I_{1b_1} + U_{1_5} I_{1b_5} - U_{1_5} I_{1b_3}); \\ P_{4au\Sigma} &= \frac{1}{2}(U_1 I_{1a_3} + U_{1_3} I_{1a_5} + U_{1_5} I_{1a_1} + U_{1_5} I_{1a_3}); \\ P_{4bu\Sigma} &= \frac{1}{2}(U_1 I_{1b_3} + U_{1_3} I_{1b_5} + U_{1_5} I_{1b_1} - U_{1_5} I_{1b_3}); \quad P_{6au\Sigma} = \frac{1}{2}(U_{1_3} I_{1a_5} + U_{1_5} I_{1a_3} + U_{1_5} I_{1a_1}); \\ P_{6bu\Sigma} &= \frac{1}{2}(U_{1_3} I_{1b_5} + U_{1_5} I_{1b_3} + U_{1_5} I_{1b_1}); \quad P_{8au\Sigma} = \frac{1}{2}(U_{1_5} I_{1a_5} + U_{1_5} I_{1a_3}); \\ P_{8bu\Sigma} &= \frac{1}{2}(U_{1_5} I_{1b_5} + U_{1_5} I_{1b_3}); \quad P_{10au\Sigma} = \frac{1}{2}(U_{1_5} I_{1a_5}); \quad P_{10bu\Sigma} = \frac{1}{2}(U_{1_5} I_{1b_5}); \end{aligned}$$

- для активного сопротивления:

$$P_{0R\Sigma} = \frac{1}{2} (I_{1a_1}^2 + I_{1b_1}^2 + I_{1a_3}^2 + I_{1b_3}^2 + I_{1a_5}^2 + I_{1b_5}^2);$$

$$P_{2aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left( (f_R(v_1) + f_R(v_3)) (I_{ia_1} I_{ia_3} + I_{ib_1} I_{ib_3}) + (f_R(v_3) + f_R(v_5)) \times \right. \\ \left. \times (I_{ia_3} I_{ia_5} + I_{ib_3} I_{ib_5}) + f_R(v_1) I_{ia_1}^2 - f_R(v_1) I_{ib_1}^2 \right);$$

$$P_{2bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left( (f_R(v_1) + f_R(v_3)) (I_{ia_1} I_{ib_3} - I_{ia_3} I_{ib_1}) + (f_R(v_3) + f_R(v_5)) \times \right. \\ \left. \times (I_{ia_3} I_{ib_5} - I_{ia_5} I_{ib_3}) + f_R(v_1) I_{ia_1} I_{ib_1} \right);$$

$$P_{4aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left( (f_R(v_1) + f_R(v_3)) (I_{ia_1} I_{ia_3} - I_{ib_1} I_{ib_3}) + \right. \\ \left. + (f_R(v_1) + f_R(v_5)) (I_{ia_1} I_{ia_5} + I_{ib_1} I_{ib_5}) \right);$$

$$P_{4bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left( (f_R(v_1) + f_R(v_3)) (I_{ia_1} I_{ib_3} + I_{ia_3} I_{ib_1}) + (f_R(v_1) + f_R(v_5)) (I_{ia_1} I_{ib_5} - I_{ia_5} I_{ib_1}) \right);$$

$$P_{6aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left( (f_R(v_1) + f_R(v_5)) (I_{ia_1} I_{ia_5} - I_{ib_1} I_{ib_5}) + f_R(v_3) I_{ia_3}^2 - f_R(v_3) I_{ib_3}^2 \right);$$

$$P_{6bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left( (f_R(v_1) + f_R(v_5)) (I_{ia_1} I_{ib_5} + I_{ia_5} I_{ib_1}) + f_R(v_3) I_{ia_3} I_{ib_3} \right);$$

$$P_{8aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left( (f_R(v_3) + f_R(v_5)) (I_{ia_3} I_{ia_5} + I_{ib_3} I_{ib_5}) \right);$$

$$P_{10aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} (f_R(v_5) I_{ia_5}^2 - f_R(v_5) I_{ib_5}^2);$$

$$P_{8bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left( (f_R(v_3) + f_R(v_5)) (I_{ia_3} I_{ib_5} + I_{ia_5} I_{ib_3}) \right); \quad P_{10bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} (f_R(v_5) I_{ia_5} I_{ib_5});$$

- для индуктивности:

$$P_{0\Sigma} = 0; \quad P_{2aL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (2I_{ia_1} I_{ib_1} + 2I_{ia_1} I_{ib_3} - 2I_{ib_1} I_{ia_3} + 2I_{ia_3} I_{ib_5} - 2I_{ib_3} I_{ia_5});$$

$$P_{2bL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (-I_{ia_1}^2 + I_{ib_1}^2 - 2I_{ia_1} I_{ib_3} - 2I_{ib_1} I_{ib_3} - 2I_{ib_3} I_{ia_5} - 2I_{ib_5} I_{ib_3});$$

$$P_{4aL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (4I_{ia_1} I_{ib_3} + 4I_{ia_1} I_{ib_5} + 4I_{ib_1} I_{ia_3} - 4I_{ib_1} I_{ia_5});$$

$$P_{4bL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (-4I_{ia_1} I_{ia_3} - 4I_{ia_1} I_{ia_5} + 4I_{ib_1} I_{ib_3} - 4I_{ib_1} I_{ib_5});$$

$$P_{6aL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (6I_{ia_3} I_{ib_3} + 6I_{ia_1} I_{ib_5} + 6I_{ib_1} I_{ia_5}); \quad P_{6bL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (-3I_{ia_1}^2 + 3I_{ib_1}^2 - 6I_{ia_1} I_{ia_5} + 6I_{ib_1} I_{ib_5});$$

$$P_{8aL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (8I_{ia_3} I_{ib_5} + 8I_{ib_3} I_{ia_5}); \quad P_{8bL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (-8I_{ia_3} I_{ia_5} + 8I_{ib_3} I_{ib_5});$$

$$P_{10aL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (10I_{ia_5} I_{ib_5}); \quad P_{10bL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (-5I_{ia_5}^2 + 5I_{ib_5}^2),$$

где  $I_{ia_m} = I_{i_m} \cos(\varphi_{i_m})$ ,  $I_{ib_m} = I_{i_m} \sin(\varphi_{i_m})$ ;  $m = 1, 3, 5$ ;  $i$  – индекс элемента соответствующей цепи (статорной, роторной, намагничивания);  $f_R(v_1)$ ,  $f_R(v_3)$ ,  $f_R(v_5)$  – зависимости активных сопротивлений от частоты (для активного сопротивления статора  $f_R(v_1) = f_R(v_3) = f_R(v_5) = 1$ , для сопротивления ротора  $f_R(v_m) = 1 + \beta v_m^2$ , для сопротивления контура намагничивания  $f_R(v_m) = v_m^\alpha$ ,  $v$  – относительная частота).

Уравнения баланса мощностей при использовании трех гармоник напряжения и тока ( $m = n = 1, 3, 5$ ) примут вид:

$$P_{0u\Sigma} = P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R'_2}; \quad P_{2au\Sigma} = P_{2aR_1} + P_{2aR_\mu} + P_{2aR'_2} + P_{2aL_1} + P_{2aL_\mu} + P_{2aL'_2};$$

$$P_{2bu\Sigma} = P_{2bR_1} + P_{2bR_\mu} + P_{2bR'_2} + P_{2bL_1} + P_{2bL_\mu} + P_{2bL'_2};$$

$$P_{4au\Sigma} = P_{4aR_1} + P_{4aR_\mu} + P_{4aR'_2} + P_{4aL_1} + P_{4aL_\mu} + P_{4aL'_2};$$

$$P_{4bu\Sigma} = P_{4bR_1} + P_{4bR_\mu} + P_{4bR'_2} + P_{4bL_1} + P_{4bL_\mu} + P_{4bL'_2};$$

$$P_{6au\Sigma} = P_{6aR_1} + P_{6aR_\mu} + P_{6aR'_2} + P_{6aL_1} + P_{6aL_\mu} + P_{6aL'_2};$$

$$P_{6bu\Sigma} = P_{6bR_1} + P_{6bR_\mu} + P_{6bR'_2} + P_{6bL_1} + P_{6bL_\mu} + P_{6bL'_2};$$

$$P_{8au\Sigma} = P_{8aR_1} + P_{8aR_\mu} + P_{8aR'_2} + P_{8aL_1} + P_{8aL_\mu} + P_{8aL'_2};$$

$$P_{8bu\Sigma} = P_{8bR_1} + P_{8bR_\mu} + P_{8bR'_2} + P_{8bL_1} + P_{8bL_\mu} + P_{8bL'_2};$$

$$P_{10au\Sigma} = P_{10aR_1} + P_{10aR_\mu} + P_{10aR'_2} + P_{10aL_1} + P_{10aL_\mu} + P_{10aL'_2};$$

$$P_{10bu\Sigma} = P_{10bR_1} + P_{10bR_\mu} + P_{10bR'_2} + P_{10bL_1} + P_{10bL_\mu} + P_{10bL'_2}.$$

Анализ приведенных уравнений баланса гармоник мгновенной мощности показывает, что для определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя с помощью Т-образной схемы замещения достаточно использовать три гармоники напряжения и тока, так как при этом получается 11 составляющих мгновенной мощности при 11 неизвестных схемы замещения (сопротивление статора  $R_1$  определяется заранее).

Анализ гармонических составляющих напряжения и тока на выходе тиристорного регулятора напряжения (рис. 1а, б), а также составляющих мгновенной мощности (рис. 1в) показывает, что значительное изменение этих составляющих наблюдается при углах управления  $\alpha$  в диапазоне от  $\frac{5\pi}{12}$  до  $\frac{5\pi}{6}$  (исследования проведены с использованием асинхронного двигателя типа 4АХБ2П100Л4 мощностью  $P_i = 4$  кВт). Это значит, что наиболее целесообразно определять электромагнитные параметры асинхронного двигателя при указанных углах управления тиристорного регулятора.

На рис. 1 в показаны эффективные значения косинусных  $P_{kac\Sigma} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (P_{kac})^2}$  и синусных  $P_{kbc\Sigma} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (P_{kbc})^2}$  канонических, а также косинусных  $P_{kas\Sigma} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (P_{kas})^2}$  и синусных  $P_{kbs\Sigma} = \sqrt{\sum_{k=1}^K (P_{kbs})^2}$  неканонических составляющих мгновенной мощности.

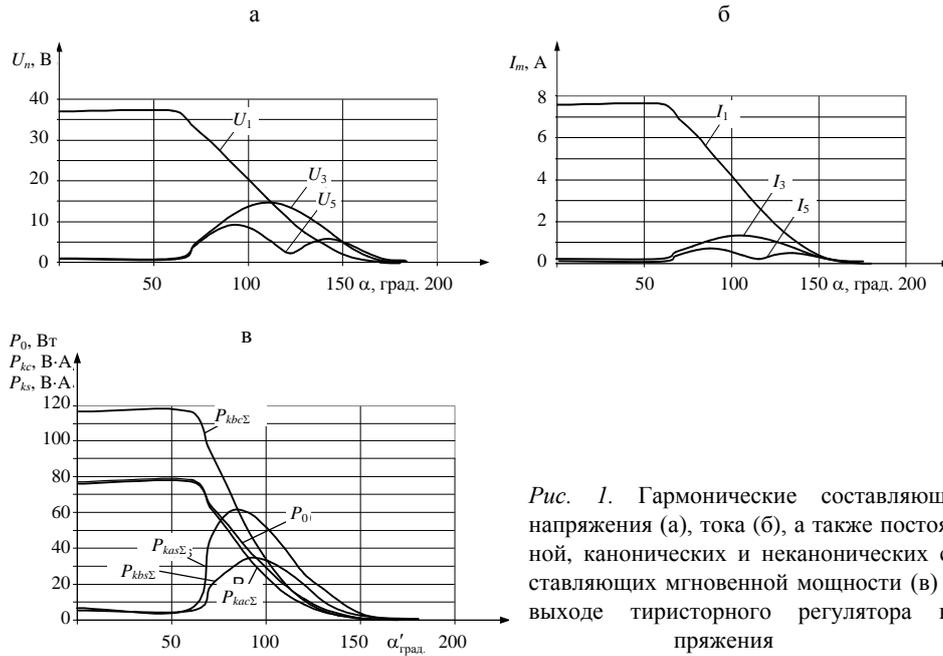


Рис. 1. Гармонические составляющие напряжения (а), тока (б), а также постоянной, канонических и неканонических составляющих мгновенной мощности (в) на выходе тиристорного регулятора напряжения

Эффективность рассмотренного метода идентификации электромагнитных параметров определялась путем сравнения заводских параметров АД и параметров, полученных экспериментально. Результаты исследований сведены в табл. 1. Для определения электромагнитных параметров применялся метод с использованием уравнений баланса: активной, реактивной, мгновенной мощности канонического, неканонического порядков, а также полных уравнений баланса мгновенной мощности [9].

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшая точность при определении электромагнитных параметров наблюдается при использовании полных уравнений баланса мгновенной мощности. Ошибки при определении электромагнитных параметров асинхронного двигателя с использованием полных уравнений баланса мгновенной мощности не превышают 5 % [11]. Определение электромагнитных параметров асинхронного двигателя проводится при неподвижном роторе, т. е. при  $s_v = 1$ . Для определения электромагнитных параметров при вращающемся роторе необходимо воспользоваться Т-образной схемой замещения при учете изменения активного сопротивления роторной цепи в соответствии с (12) и электромагнитного момента (2) [11, 12].

## Отклонения электромагнитных параметров

№ п/п	Методы определения электромагнитных параметров при использовании	Отклонения электромагнитных параметров, %				
		$\Delta R_{\mu}$	$\Delta R_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_{\mu}$	$\Delta L_2$
1	уравнений баланса активной мощности	12,68	15,39	9,09	1,46	7,60
2	уравнений баланса реактивной мощности	13,48	16,51	10,11	2,87	8,75
3	уравнений баланса мгновенной мощности канонического порядка	11,25	8,33	11,25	20,66	4,11
4	уравнений баланса мгновенной мощности неканонического порядка	3,75	4,17	7,50	1,48	2,74
5	полных уравнений баланса мгновенной мощности	2,50	4,17	1,25	0,74	1,37

## ВЫВОДЫ

Предложенный метод идентификации параметров электрических машин с использованием полных уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности аналогов не имеет и является новой ветвью научных результатов для анализа процессов преобразования энергии.

Мгновенная мощность содержит кроме постоянной составляющей косинусные и синусные составляющие, что расширяет возможности метода при использовании полных уравнений баланса мгновенной мощности благодаря значительному числу уравнений.

Система уравнений идентификации электромагнитных параметров, составленная на основе уравнений составляющих мгновенной мощности источника и элементов схемы замещения, соответствует закону сохранения энергии и позволяет анализировать параметры асинхронного двигателя, а также других видов электрических машин.

Анализ указывает на эффективность использования составляющих мгновенной мощности, так как при небольшом количестве гармоник входных сигналов (напряжения и тока) получается значительное количество гармоник мгновенной мощности и соответственно идентификационных уравнений для определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей.

Метод, базирующийся на полных уравнениях составляющих гармоник мгновенной мощности, позволяет в отличие от других методов определять электромагнитные параметры схемы замещения асинхронного двигателя с ошибкой, не превышающей 5 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. З и н о в ь е в, Г. С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1990. – 220 с.
2. Б а л а н с энергий в силовых цепях / В. Е. Тонкаль [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1992. – 312 с.
3. G z a r n e c k i, L. Comments on Active Power Flow and Energy Accounts In Electrical Systems With Nonsinusoidal Waveforms and Assymetry / L. Gzarnecki // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, No 3. – P. 1244–1250.

4. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
5. Агунов, М. В. Об энергетических соотношениях в электрических цепях с несинусоидальными режимами / М. В. Агунов, А. В. Агунов // Электричество. – 2005. – № 4. – С. 53–56.
6. Хусаинов, Ш. Н. Мощностные характеристики несинусоидальных режимов / Ш. Н. Хусаинов // Электричество. – 2005. – № 9. – С. 63–70.
7. Родькин, Д. И. Энергопроцессы в трехфазной двигательной нагрузке с несинусоидальным напряжением питания / Д. И. Родькин // Проблемы створення нових машин і технологій: наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 1998. – Вип. 1 (4). – С. 23–35.
8. Родькин, Д. И. Декомпозиция составляющих мощности полигармонических сигналов / Д. И. Родькин // Электротехника. – 2003. – № 6. – С. 34–37.
9. Родькин, Д. И. Показатели энергопроцессов в сети с полигармоническими напряжениями и токами / Д. И. Родькин, А. В. Бялобржеский, А. И. Ломонос // Электротехника. – 2004. – № 6. – С. 37–42.
10. Rodkin, D. I. Elementy teorii ukladow dynamicznego obciazenia w stanowiskach diagnostycznych maszyn elektrycznych / D. I. Rodkin, T. Kurowski // Zeszyty naukowe. – Zielona Góra, Politechnika Zielonogórska, Widział Elektryczny, 1997. – NR 112. – P. 19–33.
11. Родькин, Д. И. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока / Д. И. Родькин, А. П. Калинов, Ю. В. Ромашихин // Электроприводы переменного тока: труды междунар. 14-й науч.-техн. конф. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2007. – С. 273–278.
12. Родькин, Д. И. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах / Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашихин // Проблемы автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: сб. науч. трудов XIV міжнар. наук.-техн. конф. / Днепродзержинский гос. техн. ун-т. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 507–512.

Представлена кафедрой САУЭ

Поступила 03.03.2011

УДК 62-83+004.8

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОСТОВОГО КРАНА С КОНТРОЛЛЕРОМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

**Канд. техн. наук, доц. ПЕТРЕНКО Ю. Н.,  
асп. АЛАВИ С. Э., инж. АЛЕКСАНДРОВСКИЙ С. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

Автоматизированный электропривод (АЭП) является неотъемлемой составляющей автоматизации, часто определяя производительность, безопасность обслуживания и эффективность технологического оборудования. В настоящее время в мировой практике наряду с совершенствованием традиционных классических систем управления АЭП существует устойчивая тенденция разработки систем, основанных на приемах искусственного (компьютерного) интеллекта [1]. Исследования в области экспертных сис-