
**ТЕОРІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

THEORY OF AUTOMATIC ELECTRIC DRIVE

УДК 621.65:004.183

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**М. В. Загирняк, Д. И. Родькин, Т. В. Коренькова**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Выполнен анализ процессов преобразования энергии во всех элементах силовой структуры электромеханического комплекса с использованием составляющих мгновенной мощности. Установлено, что мерой качества энергетических процессов в системе является эффективная мощность. Предложен коэффициент пропускной способности энергетического канала электромеханического комплекса. Доказано, что переменная составляющая мощности, отражающая энергообменные процессы в системе, приводит к снижению пропускной способности энергетического канала объекта.

Ключевые слова: мгновенная мощность, эффективная мощность, энергетический канал, пропускная способность, электромеханический комплекс.

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ**М. В. Загирняк, Д. Й. Родькін, Т. В. Коренькова**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

Виконано аналіз процесів перетворення енергії у всіх елементах силовій структурі електромеханічного комплексу з використанням складових миттєвої потужності. Встановлено, що мірою якості енергетичних процесів у системі є ефективна потужність. Запропоновано коефіцієнт пропускної здатності енергетичного каналу електромеханічного комплексу. Доведено, що змінна складова потужності, що відображає процеси обміну енергії в системі, призводить до зниження пропускної здатності енергетичного каналу об'єкта.

Ключові слова: миттєва потужність, ефективна потужність, енергетичний канал, пропускна здатність, електромеханічний комплекс.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Вопросам исследования энергетических процессов посвящено большое количество работ [1, 2, 5, 6, 9, 10]. Однако обширность рассматриваемых исследований не привела к потере интереса по данной проблематике. Анализ показал, что в большей степени затронуты вопросы расчета цепей при синусоидальных токах, учета электроэнергии, компенсации реактивной мощности. В связи с интенсивной разработкой и внедрением мощных преобразовательных устройств, приводящих к искажению формы кривых напряжения и тока, активно развиваются математические подходы по интерпретации мощности и энергии в цепях несинусоидального переменного тока [5, 9], созданию показателей оценки энергетической эффективности передачи, преобразования и потребления (генерирования) электрической энергии в такого рода системах.

В системах с несинусоидальными напряжением и током энергия обмена между разного рода накопителями потребителя может значительно превышать энергию на входе потребителя. До сих пор для оценки энергетической эффективности систем переменного тока широко применяются понятия реактивной, полной (кажущейся) мощности и показатели на базе их [2, 6, 9], которые относятся к категории расчетных интегральных величин, определяемых на основе заданного изменения мгновенной мощности и представляющих собой усредненные за период колебаний значения. Такой подход приводит к потере связи с физикой процессов в системе и к затруднениям при интерпретации результатов, а иногда даже к их ошибочности.

С учетом сказанного, энергетические процессы при любой форме кривых напряжения и тока целесообразно оценивать по кривой мгновенной мощности, ее составляющим и показателям, что, как показано в [1, 5, 10], позволяет успешно решать задачи компенсации реактивной составляющей мощности,

подавления высших гармоник тока, потребляемого преобразовательной системой из сети, и т.п. Теория мгновенной мощности достаточно широко используется в задачах диагностики, мониторинга и оценки технического состояния электрических двигателей [8]. Выполненный анализ показал, что вне поля зрения применения теории мгновенной мощности остаются вопросы анализа энергопроцессов в электромеханических комплексах (ЭМК), которые характеризуются различной физической природой рассматриваемых сигналов, их формой, периодичностью, наличием нелинейных элементов, накопительных устройств и т.д. При этом в основе теоретической базы метода мгновенной мощности должны лежать уравнения баланса гармонических составляющих мгновенной мощности источника питания и элементов ЭМК [7].

Целью работы является анализ процессов преобразования энергии и оценка пропускной способности энергетического канала электромеханического комплекса.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Процесс передачи и преобразования энергии в ЭМК сопровождается ее частичной потерей в каждом из элементов и способностью в той или иной степени накапливать энергию в зависимости от типа рассматриваемого элемента. Подтверждением сказанному являются потери энергии, выделяемые в виде теплоты, кинетическая энергия, накапливаемая во вращающихся массах электропривода, и т.п.

Каждый из i -х элементов ЭМК (рис. 1) характеризуется параметрами энергетического режима $u_i(t)$ и $i_i(t)$, причем это не обязательно напряжение и ток, а величины, описывающие физический процесс преобразования энергии, произведение которых дает мощность $p_i(t) = u_i(t)i_i(t)$ – единственный параметр, характеризующий любой режим сколь угодно сложной электромеханической систе-

мы (ЭМС). Определив мощность $p_i(t)$ для отдельных элементов, можно судить о картине преобразования энергии системы в целом.

Одна из составляющих энергетического режима – переменная во времени – характеризует непрерывный энергообменный процесс между источником и потребителем, технологическим механизмом и двигателем. Переменная составляющая мощности снижает энергетическую эффективность процесса преобразования, сопровождается появлением высших гармонических в спектрах мощности, приводит к росту эффективных значений мощности [3, 4], что обусловлено наличием накопительных устройств, нелинейностей, отражающих специфику работы электропривода технологического механизма. Основой теоретической базы метода мгновенной мощности является баланс гармонических составляющих мгновенной мощности источника питания и элемен-

тов ЭМС. Одной из мер оценки качества энергопроцессов в системе служит эффективное значение мгновенной мощности, а составляющие мгновенной мощности представляют собой исходные параметры для такой оценки.

Для условной электрической цепи (рис. 2,а), включающей источник питания, канал передачи мощности потребителю, непосредственно сам потребитель мощности, образующие энергетический канал преобразования мощности в ЭМС, предложена эквивалентная схема распределения потерь мощности (рис. 2,б), где $p_S(t)$ – мгновенная мощность источника питания; $\Delta p_R(t), \Delta p_L(t), \Delta p_C(t)$ – мгновенная мощность, соответственно, на активном, индуктивном и емкостном сопротивлениях; $p_{con}(t)$ – мгновенная мощность у потребителя ЭМС.

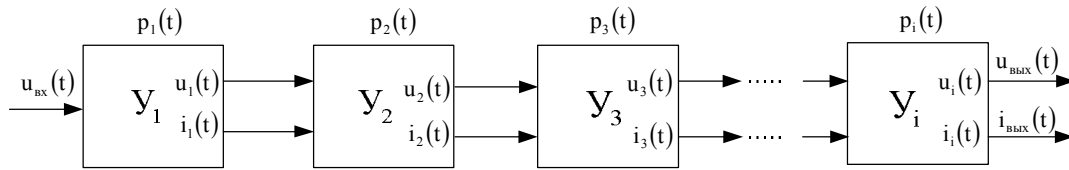


Рисунок 1 – Обобщенная структура энергетического канала ЭМК

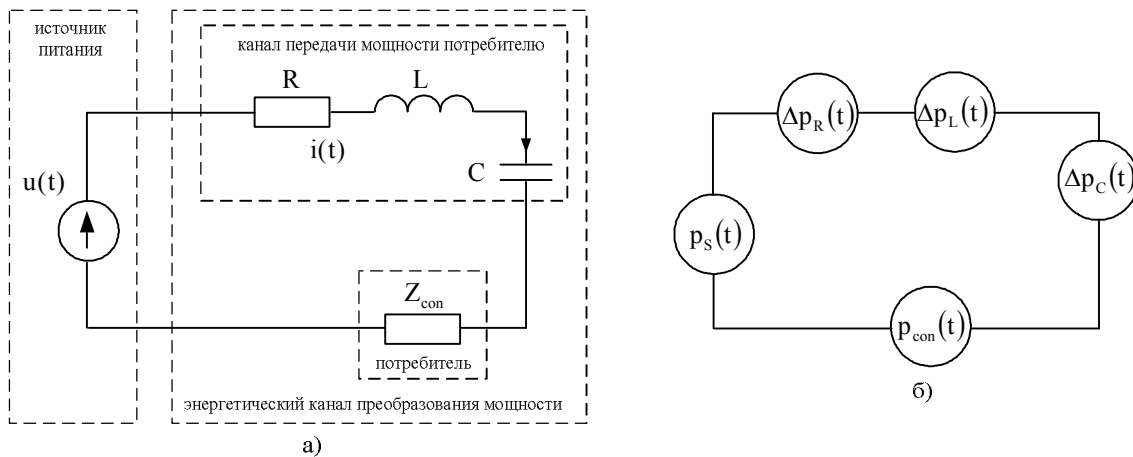


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения ЭМС (а) и эквивалентная схема распределения потерь мощности в системе (б)

Пусть входное напряжение и ток описываются синусоидальными зависимостями вида:

$$u(t) = U_n \cos(\Omega t - \varphi_n) = U_n \cos(\varphi_n) \cos(\Omega t) + U_n \sin(\varphi_n) \sin(\Omega t) = U_a \cos(\Omega t) + U_b \sin(\Omega t); \quad (1)$$

$$i(t) = I_m \cos(\Omega t - \varphi_m) = I_m \cos(\varphi_m) \cos(\Omega t) + I_m \sin(\varphi_m) \sin(\Omega t) = I_a \cos(\Omega t) + I_b \sin(\Omega t), \quad (2)$$

где U_n, I_m – амплитудные значения напряжения и тока, соответственно; $\Omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота изменения сигнала; n, m – номера гармоник напряжения и тока, соответственно; φ_n, φ_m – углы сдвига фаз напряжения и тока относительно начала координат, соответственно; $U_a = U_n \cos(\varphi_n)$; $U_b = U_n \sin(\varphi_n)$; $I_a = I_m \cos(\varphi_m)$; $I_b = I_m \sin(\varphi_m)$.

Мгновенная мощность источника определяется произведением мгновенных значений напряжения и тока, отражающих реальный физический процесс в каждый момент времени:

$$p_S(t) = u(t)i(t) = (U_a \cos(\Omega t) + U_b \sin(\Omega t)) \times (I_a \cos(\Omega t) + I_b \sin(\Omega t)). \quad (3)$$

Выполнив преобразования в (3), получим:

$$p_S(t) = P_{0S} + P_{2aS} \cos(2\Omega t) + P_{2bS} \sin(2\Omega t), \quad (4)$$

где P_{0S} – постоянная составляющая мгновенной мощности источника питания; $P_{0S} = U_a I_a / 2 + U_b I_b / 2$; $P_{2aS} \cos(2\Omega t)$ – знакопеременная косинусная составляющая мгновенной мощности; $P_{2aS} = U_a I_a / 2 - U_b I_b / 2$; $P_{2bS} \sin(2\Omega t)$ – знакопеременная синусная составляющая мгновенной мощности; $P_{2bS} = U_a I_b / 2 + U_b I_a / 2$.

Мгновенная мощность на элементах, образу-

щих канал передачи мощности потребителю:

– активном сопротивлении

$$\Delta p_R(t) = i^2(t)R = P_{0R} + P_{2aR} \cos(2\Omega t) + P_{2bR} \sin(2\Omega t), \quad (5)$$

где $P_{0R} = I_a^2 R/2 + I_b^2 R/2$; $P_{2aR} = I_a^2 R/2 - I_b^2 R/2$;

$P_{2bR} = I_a I_b R$;

– индуктивном сопротивлении

$$\Delta p_L(t) = u_L(t)i(t) = L \frac{di(t)}{dt} i(t) = P_{2aL} \cos(2\Omega t) + P_{2bL} \sin(2\Omega t), \quad (6)$$

где $P_{2aL} = I_a I_b L \Omega$; $P_{2bL} = I_b^2 L \Omega/2 - I_a^2 L \Omega/2$;

– емкостном сопротивлении

$$\Delta p_C(t) = u_C(t)i(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \times i(t) = P_{2aC} \cos(2\Omega t) + P_{2bC} \sin(2\Omega t), \quad (7)$$

где $P_{2aC} = -I_a I_b / C \Omega$; $P_{2bC} = I_a^2 / 2C \Omega - I_b^2 / 2C \Omega$.

Мгновенная мощность у потребителя:

$$p_{con}(t) = p_S(t) - \Delta p_R(t) - \Delta p_L(t) - \Delta p_C(t) = P_{0con} + P_{2acon} \cos(2\Omega t) + P_{2bcon} \sin(2\Omega t), \quad (8)$$

где $P_{0con} = P_{0S} - P_{0R}$;

$P_{2acon} = P_{2aS} - P_{2aR} - P_{2aL} - P_{2aC}$;

$P_{2bcon} = P_{2bS} - P_{2bR} - P_{2bL} - P_{2bC}$.

Анализ выражений (4)–(8) показал, что мгновенная мощность $p(t)$ включает в себя сумму постоянной и знакопеременной (косинусной и синусной) составляющих. Мгновенная мощность индуктивных и емкостных элементов, в отличие от мощности на активном сопротивлении, не содержит постоянную составляющую – реактивные элементы способны только накапливать энергию, при этом не происходит превращения электромагнитной энергии в другой вид энергии. Если электрическая цепь состоит только из реактивных элементов, в системе реализуется непрерывный циклический процесс энергообмена. В реальных условиях, когда канал передачи мощности потребителю содержит как активные, так и реактивные элементы, процессы накопления и обмена энергии усложняются и разделяются на процессы внешнего (между элементом и источником) и внутреннего (между накопителями) энергообмена.

Оценкой качества процессов преобразования энергии в системе является эффективное значение мощности, определяемое как среднеквадратичное значение произведения мгновенных значений напряжений и тока:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^K P_{k0}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{ka}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kb}^2}, \quad (9)$$

где k – номер гармоники мощности ($k = |n \pm m|$);

K – число составляющих мощности.

С учетом (9), получена эффективная мощность на каждом элементе ЭМС:

– источнике питания

$$P_{eS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p_S^2(t) dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_{0S} + P_{2aS} \cos(2\Omega t) + P_{2bS} \sin(2\Omega t))^2 dt} = \quad (10)$$

$$= \sqrt{P_{0S}^2 + \frac{P_{2aS}^2}{2} + \frac{P_{2bS}^2}{2}};$$

– активном сопротивлении

$$P_{eR} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p_R^2(t) dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_{0R} + P_{2aR} \cos(2\Omega t) + P_{2bR} \sin(2\Omega t))^2 dt} = \quad (11)$$

$$= \sqrt{P_{0R}^2 + \frac{P_{2aR}^2}{2} + \frac{P_{2bR}^2}{2}};$$

– индуктивном сопротивлении

$$P_{eL} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p_L^2(t) dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_{2aL} \cos(\Omega t) + P_{2bL} \sin(\Omega t))^2 dt} = \quad (12)$$

$$= \sqrt{\frac{P_{2aL}^2}{2} + \frac{P_{2bL}^2}{2}};$$

– емкостном сопротивлении

$$P_{eC} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p_C^2(t) dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_{2aC} \cos(\Omega t) + P_{2bC} \sin(\Omega t))^2 dt} = \quad (13)$$

$$= \sqrt{\frac{P_{2aC}^2}{2} + \frac{P_{2bC}^2}{2}};$$

– у потребителя

$$P_{econ} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p_{con}^2(t) dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_{0con} + P_{2acon} \cos(\Omega t) + P_{2bcon} \sin(\Omega t))^2 dt} = \quad (14)$$

$$= \sqrt{P_{0con}^2 + \frac{P_{2acon}^2}{2} + \frac{P_{2bcon}^2}{2}}.$$

Тогда суммарная эффективная мощность на всех элементах, входящих в систему:

$$\sum_{i=1}^I P_{ei} = P_{eR} + P_{eL} + P_{eC} + P_{econ}. \quad (15)$$

Подставив (10)–(14) в (15), получим:

$$P_{eS} < \sum_{i=1}^I P_{ei}. \quad (16)$$

Неравенство (16) является принципиально важным – полученный дисбаланс эффективных мощностей источника питания и элементов, входящих в энергетический канал преобразования мощности в ЭМС, указывает на сложный характер происходящих в системе энергообменных процессов. Подтверждением сказанному являются значения эффек-

тивных мощностей (табл. 1), полученные для электрической цепи (рис. 2,б), где $u(t) = U_n \cos(\Omega t)$; $U_n = 155,56 \text{ В}$; $\Omega = 314 \text{ рад/с}$; $R = 10 \text{ Ом}$; $R_{con} = 15 \text{ Ом}$; $L = 0,01 \text{ Гн}$; $C = 100 \text{ мкФ}$.

Зная эффективную мощность на входе и выходе рассматриваемой системы, можно определить коэффициент пропускной способности энергетического канала ЭМС:

$$k_{cap} = \frac{P_{econ}}{P_{eS}} = \frac{\sqrt{\left(P_{0S} - \sum_{i=1}^l P_{0i}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(P_{2aS} - \sum_{i=1}^l P_{2ai}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(P_{2bS} - \sum_{i=1}^l P_{2bi}\right)^2}}{\sqrt{P_{0S}^2 + \frac{1}{2}P_{2aS}^2 \sum_{k=1}^K + \frac{1}{2}P_{2bS}^2}} \quad (17)$$

Полученное выражение позволяет учесть изменение мощности в энергетическом канале ЭМС, влияние факторов, снижающих эффективность использования мощности источника питания (сдвиг фазы тока относительно напряжения из-за наличия

реактивных элементов). В цепи с исключительно активной нагрузкой $P_{eS} = P_{eR}$ и $k_{cap} = 1,0$. При увеличении числа элементов в канале передачи мощности потребителю эффективная мощность P_{econ} снижается, что приводит, соответственно, к ухудшению пропускной способности энергетического канала ЭМС $k_{cap} < 1,0$. Сказанное обуславливает необходимость компенсации отклонения P_{econ} от требуемого значения, что может быть осуществлено изменением амплитуды напряжения $u(t)$ на выходе источника питания. Для подтверждения вышеизложенного в табл. 2 приведены значения коэффициента k_{cap} для случаев, когда структура канала передачи мощности потребителю различна.

Еще более сложные процессы энергопреобразования происходят при наличии нелинейных элементов в электрической цепи (рис. 3,а).

Таблица 1 – Значения эффективной мощности на элементах энергетического канала ЭМС

Эффективная мощность источника питания P_{eS} , ВА	Эффективная мощность элементов цепи, ВА			
	P_{eR}	P_{eL}	P_{eC}	P_{econ}
208,897	102,338	18,562	188,073	153,507
$208,897 < 462,48$				

Таблица 2 – Значения коэффициента пропускной способности энергетического канала ЭМС

Коэффициент пропускной способности энергетического канала $k_{cap} = P_{econ} / P_{eS}$	Структура канала преобразования мощности		
	R	$R-L$	$R-L-C$
	0,6	0,58	0,5

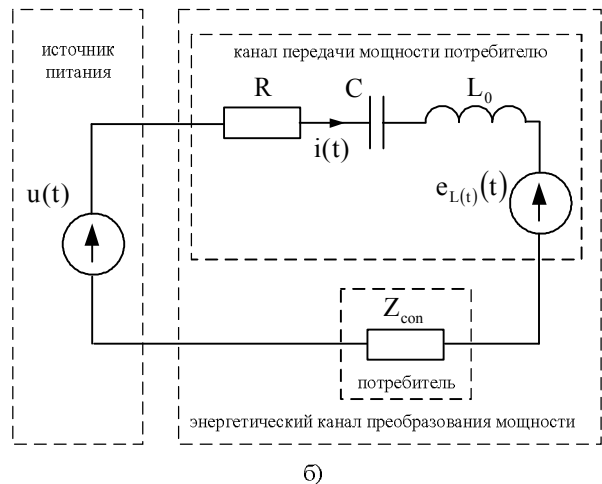
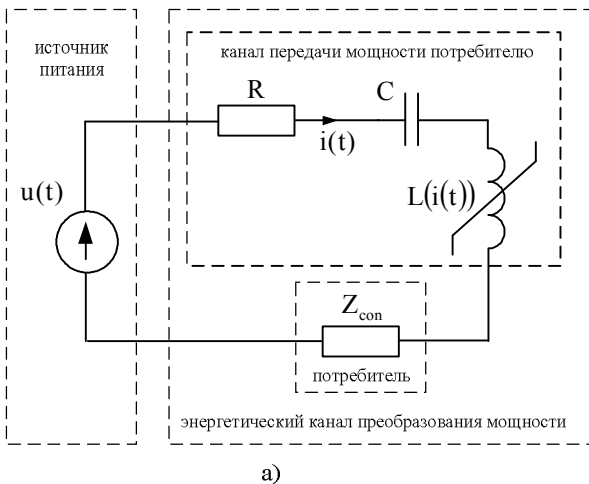


Рисунок 3 – Электрическая схема ЭМС с нелинейной индуктивностью (а) и эквивалентная схема замещения ЭМС с нелинейностью (б)

Ввиду того, что нелинейности являются генераторами собственных гармоник в системе, зачастую не совпадающих с частотой питающего напряжения, нелинейная индуктивность $L(i(t))$ может быть заменена на линейный элемент L_0 и нелинейную компоненту, представленную ЭДС $e_{L(t)}(t)$ (рис. 3,б).

Пусть индуктивное сопротивление описывается зависимостью

$$L(t) = L_0 + L_{var}(t) = L_0 + L_a \cos(\Omega t) + L_b \sin(\Omega t). \quad (18)$$

При токе (2) мгновенная мощность имеет вид:

$$p_{L0}(t) = L_0 \frac{di(t)}{dt} i(t) = P_{2aL0} \cos(2\Omega t) + P_{2bL0} \sin(2\Omega t); \quad (19)$$

$$p_{L(t)}(t) = \frac{d}{dt} \{L_{var}(t) i(t)\} \times i(t) = \left(L_{var}(t) \frac{di}{dt} + i(t) \frac{dL_{var}(t)}{dt} \right) \times i(t) = P_{aL(t)} \cos(\Omega t) + P_{bL(t)} \sin(\Omega t) + P_{3aL(t)} \cos(3\Omega t) + P_{3bL(t)} \sin(3\Omega t), \quad (20)$$

где в выражениях (19), (20):

$$P_{2aL0} = L_0 \Omega I_a I_b; \quad P_{2bL0} = L_0 \Omega I_b^2 / 2 - L_0 \Omega I_a^2 / 2;$$

$$P_{aL(t)} = L_a I_b I_a \Omega / 2 + 3 I_a^2 L_b / 4 - L_b I_a^2 \Omega / 4 - L_a I_b I_a / 2 + L_b I_b^2 \Omega / 4 + I_b^2 L_b / 4;$$

$$P_{bL(t)} = L_b I_b I_a - L_a I_a^2 \Omega / 4 - L_a I_a^2 / 4 + 3 I_b^2 L_a \Omega / 4 - I_b^2 L_a / 4;$$

$$P_{3aL(t)} = L_a I_b I_a \Omega / 2 + L_a I_b I_a / 2 + L_b I_a^2 \Omega / 4 + I_a^2 L_b / 4 - I_b^2 L_b \Omega / 4 - I_b^2 L_b / 4;$$

$$P_{3bL(t)} = L_b I_b I_a \Omega / 2 + L_b I_b I_a / 2 - I_a^2 L_a \Omega / 4 - I_a^2 L_a / 4 + L_{1a} I_b^2 \Omega / 4 + I_b^2 L_a / 4.$$

С учетом (19), (20) мгновенная мощность у потребителя

$$p_{con}(t) = p_S(t) - p_R(t) - p_{L0}(t) - p_{L(t)}(t) - p_C(t) = P_{0con} + P_{acon} \cos(\Omega t) + P_{bcon} \sin(\Omega t) + P_{2acon} \cos(2\Omega t) + P_{2bcon} \sin(2\Omega t) + P_{3acon} \cos(3\Omega t) + P_{3bcon} \sin(3\Omega t), \quad (21)$$

где $P_{0con} = P_{0S} - P_{0R}; \quad P_{acon} = -P_{aL(t)};$
 $P_{bcon} = -P_{bL(t)}; \quad P_{2acon} = P_{2aS} - P_{2aR} - P_{2aL0} - P_{2aC};$
 $P_{2bcon} = P_{2bS} - P_{2bR} - P_{2bL0} - P_{2bC}; \quad P_{3acon} = -P_{3aL(t)};$
 $P_{3bcon} = -P_{3bL(t)}.$

Выражение для определения коэффициента пропускной способности в ЭМС с нелинейностью приведено в табл. 3. Анализ показал, что наличие нелинейных элементов в составе системы приводит к еще более заметному снижению коэффициента пропускной способности k_{cap} энергетического канала

из-за наличия дополнительных компонент $\sum_{j=1}^J P_{jAL}^2$, $\sum_{j=1}^J P_{jBL}^2$ мощности в числителе анализируемого выражения.

Ввиду того, что в реальных условиях напряжение питания, подаваемое на вход системы, отличается от синусоидального, представим сигналы напряжения и тока полигармоническими зависимостями вида:

$$u(t) = \sum_{n=0}^N U_n \cos(n\Omega t - \varphi_n); \quad (22)$$

$$i(t) = \sum_{m=0}^M I_m \cos(m\Omega t - \psi_m), \quad (23)$$

где N, M – число составляющих напряжения и то-

ка, соответственно.

Тогда мгновенная мощность на источнике и соответствующих элементах энергетического канала:

$$p_S(t) = u(t) i(t) = \left(\sum_{n=1}^N U_n \cos(n\Omega t - \phi_n) \right) \left(\sum_{m=1}^M I_m \cos(m\Omega t - \phi_m) \right) = (24)$$

$$= \sum_{k=1}^K P_{k0S} + \sum_{k=1}^K P_{kas} \cos(k\Omega t) + \sum_{k=1}^K P_{kbs} \sin(k\Omega t);$$

$$\Delta p_i(t) = u_i(t) i_i(t) = \left(\sum_{n=1}^N U_{ni} \cos(n\Omega t - \phi_n) \right) \left(\sum_{m=1}^M I_{mi} \cos(m\Omega t - \phi_m) \right) = (25)$$

$$= \sum_{k=1}^K P_{k0i} + \sum_{k=1}^K P_{kai} \cos(k\Omega t) + \sum_{k=1}^K P_{kbi} \sin(k\Omega t);$$

$$p_{con}(t) = \sum_{k=1}^K P_{k0con} + \sum_{k=1}^K P_{kacon} \cos(k\Omega t) + \sum_{k=1}^K P_{kbccon} \sin(k\Omega t). \quad (26)$$

Эффективная мощность на каждом элементе ЭМС:

$$P_{eS} = \sqrt{\sum_{k=1}^K P_{k0S}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kas}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbs}^2}; \quad (27)$$

$$P_{eR} = \sqrt{\sum_{k=1}^K P_{k0R}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kaR}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbR}^2}; \quad (28)$$

$$P_{eL} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kaL}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbL}^2}; \quad (29)$$

$$P_{eC} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kaC}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbC}^2}; \quad (30)$$

$$P_{econ} = \sqrt{\sum_{k=1}^K P_{k0con}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kacon}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K P_{kbccon}^2}. \quad (31)$$

Выражение для определения коэффициента пропускной способности энергетического канала ЭМС при полигармоническом питании приведено в табл. 3.

Получено, что при полигармоническом питании работа ЭМС сопровождается снижением k_{cap} , что связано с появлением высших гармонических в спектре мощности и ростом значений эффективной мощности элементов, образующих канал энергопреобразования.

Для сравнительного анализа показателей энергопроцессов на выходе источника питания рассматриваемой электрической цепи определен коэффициент использования активной мощности интегральным методом $k_1 = P_{0S} / S$ и методом мгновенной мощности $k_2 = P_{0S} / P_{eS}$, где $S = U_e I_e$ – полная мощность источника; U_e, I_e – эффективные значения напряжения и тока источника, соответственно. На рис. 4 приведены кривые изменения указанных коэффициентов от угла сдвига фазы тока относительно напряжения, причем кривые $k_1 = (\varphi_m)$, $k_2 = (\varphi_m)$ соответствуют входному напряжению синусоидальной формы $u(t) = U_n \cos(\Omega t)$, кривые $k'_1 = (\varphi_m)$, $k'_2 = (\varphi_m)$ – полигармоническому напряжению вида $u(t) = U_1 \cos(\Omega t) + U_3 \cos(3\Omega t) + U_5 \cos(5\Omega t)$.

Таблица 3 – Выражения для определения коэффициента пропускной способности энергетического канала ЭМС

<p>Коэффициент пропускной способности ЭМС с нелинейностью</p>	$k_{cap} = \frac{P_{e\ con}}{P_{e\ S}} =$ $= \frac{\sqrt{\left(P_{0S} - \sum_{i=1}^I P_{0i}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(P_{2aS} - \sum_{i=1}^I P_{2ai}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(P_{2bS} - \sum_{i=1}^I P_{2bi}\right)^2 - \frac{1}{2}\sum_{j=1}^J P_{jaL(t)}^2 - \frac{1}{2}\sum_{j=1}^J P_{jbL(t)}^2}}{\sqrt{P_{0S}^2 + \frac{1}{2}P_{2aS}^2 \sum_{k=1}^K + \frac{1}{2}P_{2bS}^2}}$ <p>где $\sum_{j=1}^J P_{jaL(t)}^2 = P_{aL(t)}^2 + P_{3aL(t)}^2$; $\sum_{j=1}^J P_{jaL(t)}^2 = P_{aL(t)}^2 + P_{3aL(t)}^2$; $\sum_{j=1}^J P_{jbL(t)}^2 = P_{bL(t)}^2 + P_{3bL(t)}^2$; j, J – номер и число, соответственно, гармоник мощности, генерируемых нелинейным элементом</p>
<p>Коэффициент пропускной способности ЭМС при полигармоническом питании</p>	$k_{cap} = \frac{P_{e\ con}}{P_{e\ S}} =$ $= \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^K \left(P_{k0S} - \sum_{i=1}^I P_{k0i}\right)^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^K \left(P_{kaS} - \sum_{i=1}^I P_{kai}\right)^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^K \left(P_{kbS} - \sum_{i=1}^I P_{kbi}\right)^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^K P_{k0S}^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^K P_{kaS}^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^K P_{kbS}^2}}$

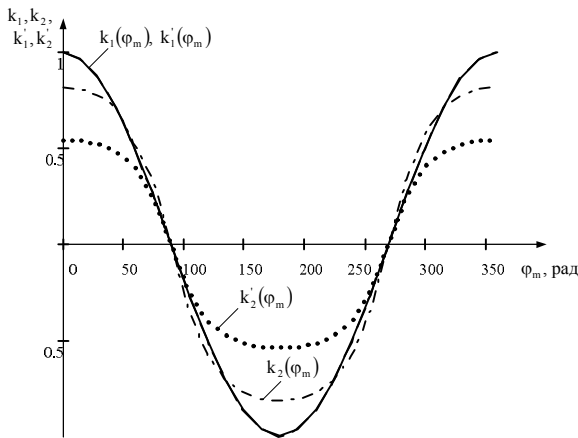


Рисунок 4 – Кривые изменения коэффициента использования активной мощности от угла сдвига фазы тока

Получено, что при $\varphi_m = 0$ рад и синусоидальном питании отношение P_{eS}/S составляет 1,22; при полигармоническом напряжении – $P_{eS}/S = 1,85$. Сказанное подтверждает ошибочность использования интегральных оценок при анализе процессов энергопреобразования – полная мощность не является адекватной мерой оценки энергопроцессов, в особенности в цепях с несинусоидальным напряжением.

ВЫВОДЫ. При анализе энергопроцессов в электрических цепях со сложной структурой (наличием активных и реактивных элементов, нелинейностей различного рода, источником полигармонического напряжения) целесообразно выделять в энергетическом канале преобразования мощности отдельный контур, отражающий канал передачи мощности потребителю, что позволяет выполнить оценку пропускной способности передачи, преобразования и потребления (генерирования) электрической энергии в электромеханических системах. Отмеченный подход пре-

доставляет возможность анализа процессов энергопреобразования как в электрических, так и иного рода системах: механических, электромеханических, гидравлических и т.п., где исходные сигналы, формирующие мгновенную мощность, могут иметь сложный характер (периодический или непериодический).

Доказано, что при несинусоидальных напряжении и токе энергетические процессы в индуктивных и емкостных накопителях различаются как по знаку, что имеет место в синусоидальных цепях, так и по частоте колебаний мощности и ее амплитуде. Меняется энергетика протекающих в системе процессов, и оценки, полученные известными интегральными методами расчета на базе полной мощности и ее составляющих, не отражают полную анализируемых процессов. Показано, что мерой качества энергетических процессов в системе является эффективная мощность, а составляющие мгновенной мощности представляют собой исходные параметры для такой оценки.

Выполненный анализ процессов преобразования энергии позволил определить изменение пропускной способности энергетического канала электромеханического комплекса, представляющей собой отношение эффективной мощности потребителя к эффективной мощности источника питания. Такой подход учитывает разнообразие структуры и процессов, протекающих в канале передачи мощности потребителю. Получено, что при изменении угла сдвига фазы тока относительно напряжения из-за наличия реактивных элементов в канале передачи мощности потребителю, включении нелинейных элементов в силовую структуру или полигармоническом питании растет переменная составляющая мгновенной мощности, эффективная мощность потребителя снижается, что приводит к ухудшению пропускной способности энергетического канала электромеханического комплекса. Для повышения эффективности передачи мощности потребителю необходимо формирование определенного вида управляющих и задающих воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. – New York: Wiley, 2007. – 379 p.
2. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентиляльных преобразователей. – Новосибирск: изд-во Новосиб. ун-та, 1990. – 220 с.
3. 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.
4. Zagirnyak M., Rod'kin 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.
5. Крогерис А.Ф., Рашевич К.К., Трейманис Э.Ц., Шинка Я.К. *Мощность переменного тока*. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.
6. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. – М.: Энергия, 1975. – 320 с.
7. Родькин Д.И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов // *Вісник КДПУ*. – Кременчук: Кременчужський державний політехнічний університет, 2007. – Вип. 3/2007 (44), ч. 1. – С. 66–77.
8. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах // *Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика*. – Днепро-дзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 507–512.
9. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.Е., Денисюк С.П. Баланс энергий в силовых цепях. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с.
10. 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 results // *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. – 2008. – Iss. 55. – № 1. – PP. 184–196.

THE ANALYSIS OF POWER CONVERSION PROCESSES IN ELECTROMECHANICAL COMPLEXES

M. Zagirnyak, D. Rod'kin, T. Korenkova

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39614, Ukraine. E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua

The analysis of power conversion processes is executed in all elements of power structure of electromechanical complexes with the use of instantaneous power components. It has been established that effective power is a quality measure for power processes in the system. An index of power channel carrying capacity has been offered. It is well-proven that the power variable component reflecting energy exchange processes in the system results in the decrease of the carrying capacity of the object power channel.

Key words: instantaneous power, effective power, power channel, carrying capacity, electromechanical complex

REFERENCES

1. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. – New York: Wiley, 2007. – 379 p.
2. Zinoviyev G.S. *Direct methods of calculation of power indexes of valve transformers*. – Novosibirsk: publishing house of Novosibirsk University, 1990. – 220 p. [in Russian]
3. 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.
4. Zagirnyak M., Rod'kin 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.
5. Krogeris A.F., Rashevics K.K., Treimanis E., Shinka J.K. *Power of alternating current*. – Riga: Institute of Physical Energetics, Lat. Academy of Science, 1993. – 294 p. [in Russian]
6. Maevskiy O.A. *Power indexes of valve transformers*. – М.: Energia, 1975. – 320 p. [in Russian]
7. Rodkin D.I. Balance of constituents instantaneous power of polyharmonic signals // *Bulletin of KSPU*. – Kremenchuk: Kremenchuk State Polytechnic University, 2007. – Iss. 3/2007 (44), part 1. – PP. 66–77. [in Russian]
8. Rodkin D. I., Romashihin J.V. Possibilities and efficiency of method energy diagnostics in identification problems // *Problems of automated electrodrives*. – Dneprodzerjinsk: DGTU, 2007. – PP. 507–512. [in Russian]
9. Tonkal V.E., Novoseltsev A.V., Denisiuk S.P. *Energy Balance in Power Circuits*. – К.: Naukova dumka, 1992. – 312 p. [in Russian]
10. 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 results // *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. – 2008. – Iss. 55. – № 1. – PP. 184–196.

Стаття надійшла 24.07.2012.

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