

УДК 621.313

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА: ПРОБЛЕМА И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

А. П. Черный

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

Бердай Абдельмажид

ENSEM Университет Хассан II Аин Щок
PO Box 8118, Оасис, Касабланка Марокко. E-mail: a.berdai@gmail.com

Обоснована проблема управления качеством преобразования энергии в электроприводах с электрическими двигателями переменного тока, получающими питание от сети с несимметричным и несинусоидальным напряжением и имеющими приобретенную параметрическую несимметрию. Представлены исследования по применению разработанных принципов управления качеством преобразования энергии. Показана возможность компенсации высших гармоник потребляемой мощности и электромагнитного момента электродвигателя путем управления преобразователем энергии в статорных или роторных цепях. Предложенные принципы распространены на системы с тиристорными регуляторами напряжения на статоре, преобразователями частоты с автономными инверторами и широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения электроприводов с асинхронными двигателями, системы с тиристорным возбуждением синхронных двигателей, а также поисковые оптимизационные системы.

Ключевые слова: качество преобразования энергии, управление преобразованием энергии, электропривод переменного тока, преобразователь энергии.

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ЗМІННОГО СТРУМУ: ПРОБЛЕМА ТА ШЛЯХИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

О. П. Чорний

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

Бердай Абдельмажид

ENSEM Університет Хассан II Аін Щок
PO Box 8118, Оасіс, Касабланка Морокко. E-mail: a.berdai@gmail.com

Обгрунтовано проблему управління якістю перетворення енергії в електроприводах з електричними двигунами змінного струму, які отримують живлення від мережі з несиметричною й несинусоїдальною напругою, мають придбану параметричну несиметрію. Надано дослідження із застосування розроблених принципів управління якістю перетворення енергії. Показано можливість компенсації вищих гармонік споживаної потужності й електромагнітного моменту електродвигуна за рахунок управління перетворювачем енергії. Запропоновані принципи поширено на системи з тиристорними регуляторами напруги на статорі, перетворювачами частоти з автономними інверторами з широтно-імпульсною модуляцією вихідної напруги електроприводів з асинхронними двигунами, системи з тиристорним збудженням синхронних двигунів, а також пошукові оптимізаційні системи.

Ключові слова: якість перетворення енергії, управління перетворенням енергії, електропривод змінного струму, перетворювач енергії.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Качество преобразования энергии – это пока еще новый термин, который не прижился в среде металлургов, горняков, транспортников – всех производителей, использующих электромеханическое оборудование с электрическими двигателями и преобразователями энергии. Как правило, используется другой термин-показатель – качество электрической энергии. Существуют нормы на качество энергии [1] и показатели работы и работоспособности электрооборудования, если качество энергии не соответствует нормам [2]. Электрические приводы потребляют и преобразовывают электрическую энергию в полезную работу. Но в процессе преобразования происходит искажение энергии – появляются высшие гармоники напряжения и тока от преобразователей энергии, несинусоидальность токов от наличия нелинейно-

стей в силовых контурах, несимметрия напряжения от неравномерной нагрузки по фазам и т.д. Все это известно, и существуют методы снижения вышечисленных факторов [3]. Однако при этом потребитель энергии – электрический двигатель – рассматривается как электрически симметричный электромеханический преобразователь без повреждений: токи по фазам симметричны и синусоидальны, колебания электромагнитного момента и частоты вращения отсутствуют. Между тем любые отклонения в конструкции или параметрах электродвигателя, приобретенные в процессе ремонта или процессе длительной эксплуатации, делают двигатель существенно нелинейной системой и приводят к появлению несинусоидальных токов, дополнительных тангенциальных сил и электромагнитных моментов, в том числе пульсирующих [4]. Указанные моменты

являются результатом взаимодействия разных временных гармоник основного поля и полей от временных гармоник токов статора и ротора, возникших в силу новых приобретенных нелинейных характеристик двигателя. Возникают сложные энергообменные процессы, которые характеризуются временными зависимостями мгновенных значений напряжения, тока и мощности. Таким образом, на передний план выступает именно качество преобразования энергии.

В настоящее время не существует единого подхода к формированию процесса качественного преобразования энергии.

В свое время авторами ставилась задача оценки качества преобразования энергии. В силу назревшей необходимости создания системы оценок качества преобразования энергии, с учетом того, что качество энергии не имеет какой-либо абсолютной шкалы и характеризуется не одним числом, а совокупностью различных характеристик, нами были предложены коэффициенты, характеризующие различные аспекты одного процесса – процесса преобразования энергии. Эти коэффициенты получили название «показатели качества преобразования энергии» (ПКПЭ), и основные из них приведены в [5–7]. Указанные показатели и коэффициенты на их основе предполагалось применять для оценки состояния электромеханической системы (ЭМС), которые имеют те или иные формы параметрической несимметрии, приобретенной в процессе эксплуатации или ремонтов.

Разработанный комплекс показателей позволяет перейти к задаче управления качеством преобразования энергии – наделения самого потребителя функциями регулятора режима потребления [8, 9]. Это позволит обеспечить положительный результат по целому комплексу проблем:

- обеспечение эффективной работы ЭМС в сетях ограниченной мощности;
- обеспечение эффективной работы ЭМС с учетом влияния сети при ее несимметрии, несинусоидальности и пр. [1];
- снижение влияния ЭМС с отклонениями в параметрах на сеть и другие потребители;
- минимизация потерь мощности, снижение нагрева, шума, вибрации;
- обеспечение требуемых технологических режимов пуска, перегрузочной способности, продолжительности включения и др., а также для ЭМС с отклонениями параметров;
- обеспечение электромагнитной совместимости и снижение электромагнитного воздействия на биологические объекты и человека.

Таким образом, актуальной является задача такого управления электромеханической системой, чтобы преобразователь энергии, обеспечивая заданный режим работы электропривода, осуществлял не только преобразование энергии, но и управление качеством ее преобразования, что и является целью работы – формирование принципов и путей управ-

ления качеством преобразования энергии в электроприводах переменного тока.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Формулировка показателей некачественного преобразования энергии и создание математического аппарата для ее оценки намечает ряд путей управления процессом преобразования с целью снижения переменных составляющих мощности и момента двигателя – обеспечения эффективного функционирования электрооборудования в условиях изменений факторов, влияющих на его нормальную работу.

Знакопеременная мощность вызывает пульсации момента двигателя, колебания скорости и вибрацию двигателя. Запишем общее выражение для мгновенной мощности в одной фазе в виде

$$\begin{aligned}
 p(t) &= u(t)i(t) = \\
 &= \sum_{m_a=0}^M I_{m_a} \cos(\Omega_{m_a} t) \sum_{n_a=0}^N U_{n_a} \cos(\Omega_{n_a} t) + \\
 &+ \sum_{m_e=0}^M I_{m_e} \sin(\Omega_{m_e} t) \sum_{n_e=0}^N U_{n_e} \sin(\Omega_{n_e} t) + \dots (1) \\
 &+ \sum_{m_e=0}^M I_{m_e} \sin(\Omega_{m_e} t) \sum_{n_a=0}^N U_{n_a} \cos(\Omega_{n_a} t) + \\
 &+ \sum_{m_a=0}^M I_{m_a} \cos(\Omega_{m_a} t) \sum_{n_e=0}^N U_{n_e} \sin(\Omega_{n_e} t),
 \end{aligned}$$

где $I_{m_a}, I_{m_b}, U_{n_a}, U_{n_b}$ – амплитуды синусных и косинусных составляющих полигармонических сигналов тока и напряжения, а для трехфазных электротрических двигателей

$$p(t) = \sum_j^{A,B,C} u_j(t) i_j(t). \quad (2)$$

Из выражения (2), с учетом (1), следует, что мгновенная мощность образована суммами произведений одночастотных и разночастотных составляющих [10]. Путем преобразований (2) может быть записано в виде:

$$P(t) = \sum_{k=0}^K P_{k_0} + \sum_{k=2}^{M+N} P_{k_a} + \sum_{k=2}^{M+N} P_{k_e}, \quad (3)$$

где $P_{k_0}, P_{k_a}, P_{k_e}$ – постоянная составляющая активной мощности и переменные составляющие мгновенной мощности (косинусная и синусная составляющие соответственно).

Уравнение (3) может оказаться достаточно сложным, если учесть, например, приобретенную несимметрию электромагнитных параметров двигателя. В этом случае в зазоре будет не просто спектр полей, вращающихся с разными частотами, но и некруговые поля, образующие поля обратной последовательности.

Снижение величины поля обратной последовательности можно осуществлять, формируя гармонический состав питающего напряжения статора. Таким образом, задача управления качеством преобразования энергии сводится к отысканию таких

несимметричных и, в общем случае, несинусоидальных напряжений, при которых выполняется условие

$$\left\{ \sum_{k=2}^{M+N} P_{k_a} + \sum_{k=2}^{M+N} P_{k_b} \right\} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) возможно получить различными способами: в электроприводах с АД – формированием соответствующего напряжения на выходе регулятора напряжения или преобразователя частоты, для СД – формированием напряжения на обмотке возбуждения [8].

Задачу решения уравнения (4) можно сформулировать следующим образом.

Если временной зависимости мгновенной мощности соответствует уравнение

$$p(t) = u(t)i(t), \quad (5)$$

а в частотной области – уравнение свертки

$$P(\omega) = U(\omega) * I(\omega), \quad (6)$$

то выполнение деконволюции (обратной свертки) для заданного спектра мощности $P_{pr}(\omega)$

$$U^*(\omega) = P_{pr}(\omega) * I^{-1}(\omega) \quad (7)$$

позволит определить спектр и гармоники искомого сигнала напряжения, обеспечивающего выполнение (4).

Индекс «-1» – символьное обозначение оператора деконволюции, инверсного прямому оператору свертки

По сути, целью деконволюции является поиск решения уравнения свертки

$$P_{pr}(\omega) = U^*(\omega) * I(\omega). \quad (8)$$

Решая задачу управления, необходимо иметь в виду, что не всегда управление качеством преобразования энергии осуществимо по закону (4). Действительный характер преобразования энергии в машине определяется электромагнитным моментом

$M_e = p_n \frac{\partial W_e}{\partial \gamma}$, где W_e – электромагнитная энергия в зазоре машины; γ – угол поворота ротора; p_n – число пар полюсов.

Использование (4) возможно, если $J_{ed} \gg J_e$, где J_{ed} – эквивалентный момент инерции ЭМС; J_e – момент инерции двигателя. В противном случае, с целью снижения колебаний частоты вращения и динамических нагрузок в механических элементах ЭМС, необходимо использовать еще и уравнение

$$\left\{ \sum_{k=2}^{M+N} M_{e.k_a} + \sum_{k=2}^{M+N} M_{e.k_b} \right\} \rightarrow \min. \quad (9)$$

С учетом (4) и (9) можно предложить следующие структуры (рис. 1, 2) и пути управления (рис. 3).

На рис. 1, 2 обозначены: ПЭ – преобразователь энергии, СД – синхронный двигатель, ИМ – измеритель мощности, ВМ – вычислитель момента, ИПС – измеритель переменных состояния, РКПЭ – регулятор качества преобразования энергии.

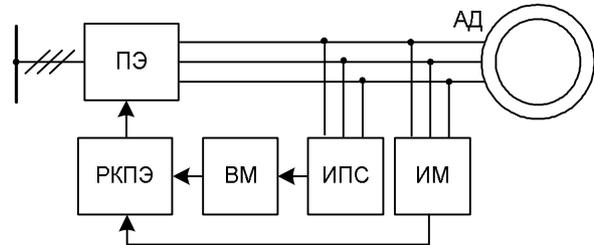


Рисунок 1 – Функциональная схема системы управлением качеством преобразования энергии в АД с компенсацией переменных составляющих мощности и момента

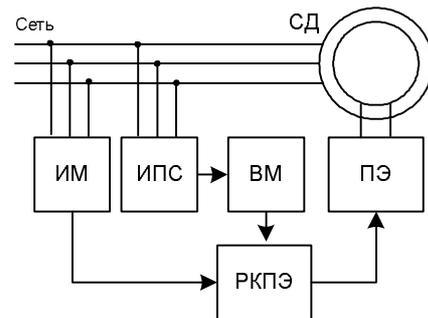


Рисунок 2 – Функциональная схема системы управлением качеством преобразования энергии в СД с компенсацией переменных составляющих мощности и момента



Рисунок 3 – Пути управления качеством преобразования энергии

Однако быстрое решение указанной проблемы затруднительно, т.к. в общем случае для компенсации несимметрии аналитические уравнения для (7) по (4) и (9) получаются слишком громоздкими, а в отдельных случаях, если существует несимметрия

параметров роторних цепей, аналитическое решение вообще невозможно. Тогда решение задачи компенсации может быть получено при помощи оптимизационных поисковых алгоритмов: покоординатного спуска, регулярного симплекса или более эффективных, но и более сложных и требующих большего времени поиска (Хука–Дживса, Нелдера–Мида, деформируемого симплекса). Для микропроцессорной системы управления и компенсации эффективным, например, является метод поиска на основе чисел Фибоначчи.

Рассмотрим несколько примеров управления качеством преобразования энергии в нелинейных цепях.

Пример 1. Пусть имеется электрическая цепь с эквивалентным активным сопротивлением (рис. 4). Причем активное сопротивление является нелинейной функцией тока цепи.

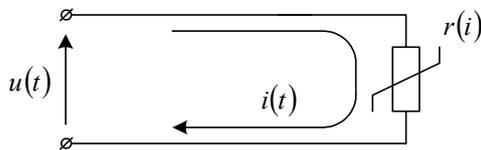


Рисунок 4 – Электрическая цепь с нелинейным активным сопротивлением

Параметры нелинейного активного сопротивления таковы, что при питании синусоидальным напряжением

$$u(t) = U_m \sin(\omega t), \quad (10)$$

где $U_m = 300$, В – амплитуда первой гармоники напряжения, ток в цепи будет иметь полигармонический характер:

$$i(t) = I_1 \sin(\omega t) + I_5 \sin(5\omega t). \quad (11)$$

Тогда, согласно (5), уравнение мгновенной мощности будет иметь вид

$$p(t) = P_0 + P_2 \sin(2\omega t) + P_4 \sin(4\omega t) + P_6 \sin(6\omega t). \quad (12)$$

Зависимости тока, напряжения и мощности для (10)–(12) показаны на рис. 5.

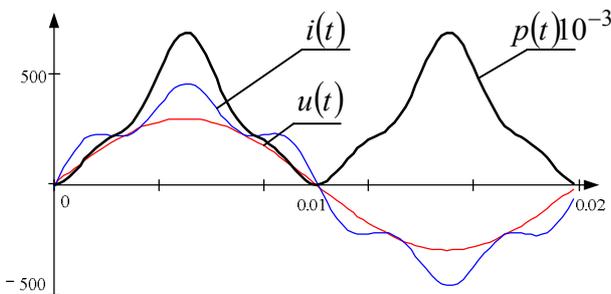


Рисунок 5 – Временные зависимости тока $i(t)$, напряжения $u(t)$ и мощности $p(t)$

Для уравнения (12), согласно (4), должны быть компенсированы все гармоники мощности $k > 2$.

Таким образом, уравнение компенсации будем искать в виде

$$\sum_{k=4}^{M+N} P_k \rightarrow \min. \quad (13)$$

Для решения (13) примем, что питающее напряжение будет изменяться по закону

$$u^*(t) = \sum_{n=1}^N U_{2n-1} \sin((2n-1)\omega t). \quad (14)$$

В частном случае, при $N = 3$, с учетом (11), уравнение питающего напряжения будет содержать только три гармоники:

$$u^*(t) = U_1 \sin(\omega t) + U_3 \sin(3\omega t) + U_5 \sin(5\omega t). \quad (15)$$

Решая уравнение (5) для (11) и (15), получим уравнение (13), для которого $M + N = 6$. Тогда с использованием тригонометрических преобразований (1) преобразуем в систему уравнений по составляющим мощности:

$$\begin{aligned} U_1 I_1 + U_3 I_3 &= P_0; \\ U_1 I_1 + U_1 I_3 - U_3 I_1 + U_5 I_3 - U_3 I_5 &= 2P_2; \\ U_1 I_3 - U_3 I_1 + U_1 I_5 - U_5 I_1 &= 2P_4; \\ U_3 I_3 - U_1 I_5 - U_5 I_1 &= 2P_6; \\ U_3 I_5 + U_5 I_3 &= 2P_8; \\ U_5 I_5 &= 2P_{10}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для решения переписем (16) в развернутой форме относительно синусных и косинусных составляющих:

$$\begin{aligned} P_0 &= U_{b1}(I_{b1}) + U_{b3}(I_{b3}) + U_{b5}(I_{b5}); \\ 2P_{a2} &= U_{b1}(-I_{b1} + I_{b3}) + U_{b3}(I_{b1} + I_{b5}) + U_{b5}(I_{b3}); \\ 2P_{a4} &= U_{b1}(-I_{b3} + I_{b5}) + U_{b3}(-I_{b1}) + U_{b5}(I_{b1}); \\ 2P_{a6} &= U_{b1}(-I_{b5}) + U_{b3}(-I_{b3}) + U_{b5}(-I_{b1}); \\ 2P_{a8} &= 0 + U_{b3}(-I_{b5}) + U_{b5}(-I_{b3}); \\ 2P_{a10} &= 0 + 0 + U_{b5}(-I_{b5}). \end{aligned} \quad (17)$$

Решение (17) позволяет определить параметры гармонического состава (15), необходимого для компенсации.

В общем случае необходимо применение методов решения систем линейных алгебраических уравнений, но для случая $N = 3$ возможно получение и аналитического решения:

$$\begin{aligned} U_1 &= P_z^{-1} (P_0 I_1 + P_0 I_3 - P_0 I_5 + P_2 I_3 - P_2 I_5) I_1; \\ U_3 &= P_z^{-1} (I_1 I_3 P_0 - I_3^2 P_0 + I_3 I_5 (2P_0 + P_2) - I_5^2 (P_0 + P_2) - I_1^2 (P_0 + P_2)); \\ U_5 &= P_z^{-1} (P_0 (I_1 I_5 - I_1^2 - 2I_1 I_3) + P_2 (I_1^2 + I_3 I_5 - I_3^2)), \end{aligned}$$

$$\text{где } P_z = I_3^2 + 2I_1^2 + I_1(I_3 - I_5)^2 + I_3 I_5(2I_3 - I_5) - I_3^3.$$

На рис. 6 показаны временные зависимости напряжения и мощности до и после компенсации.

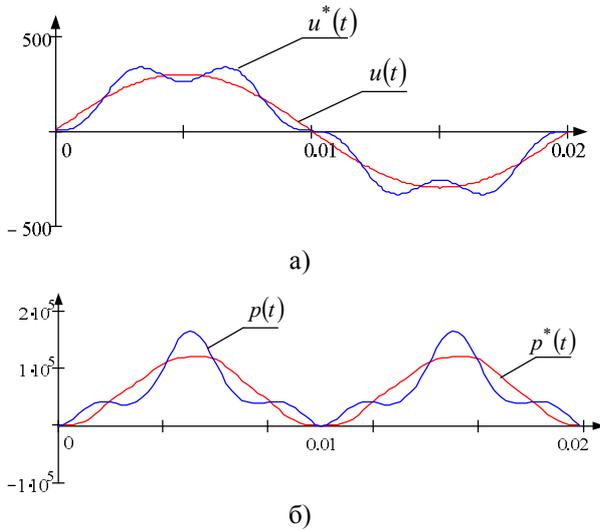


Рисунок 6 – Исходное $u(t)$ и компенсирующее $u^*(t)$ напряжение (а); исходная $p(t)$ и компенсированная $p^*(t)$ мощность (б)

Гармонический состав исходной и компенсированной мощности показан на рис. 7.

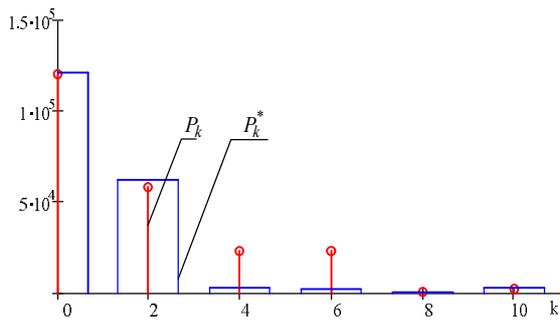


Рисунок 7 – Гармонический состав исходной и компенсированной мощности

Пример 2. Пусть имеется электрическая цепь с последовательным соединением эквивалентных активного сопротивления и индуктивности, причем индуктивность является нелинейной функцией тока цепи (рис. 8). Параметры элементов цепи показаны в табл. 1.

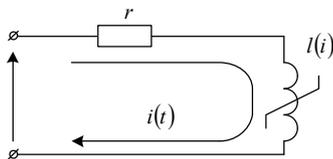


Рисунок 8 – Электрическая цепь с нелинейной индуктивностью

Нелинейная индуктивность задана моделью

$$l(I) = d \left(g + \frac{1}{a + bI^c} \right) l_0, \quad (18)$$

где a, b, c, d, g – коэффициенты модели; $g = 0,255$.

Указанная зависимость имеет вид, показанный на рис. 9.

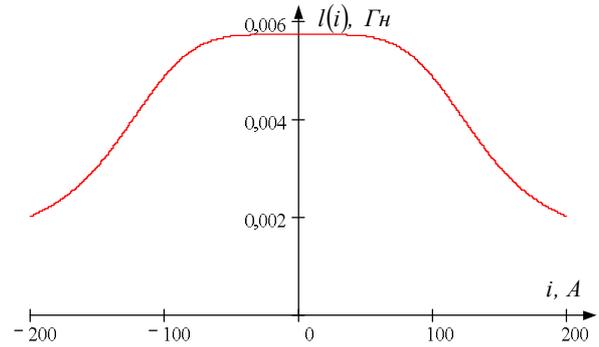


Рисунок 9 – Зависимость нелинейной индуктивности от тока

Таблица 1 – Параметры элементов электрической цепи с нелинейным активным сопротивлением

Параметр	Значение
Амплитуда первой гармоники питающего напряжения, U_m , В	311
Индуктивность, l_0 , Гн	0,00573
Активное сопротивление, r , Ом	0,312

Расчет тока в цепи выполним при питающем напряжении (10). Временные зависимости напряжения, тока и мощности показаны на рис. 10.

Учитывая нелинейную индуктивность (18), ток имеет полигармонический характер.

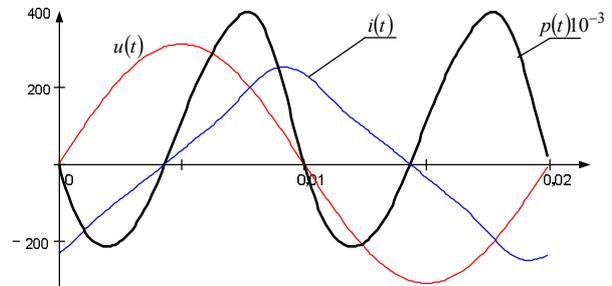


Рисунок 10 – Временные зависимости напряжения, тока и мощности

При этом уравнение тока, а в дальнейшем напряжения и мощности, будем записывать и анализировать с учетом их синусных и косинусных составляющих для тока $i(t)$ и для мощности $p(t)$:

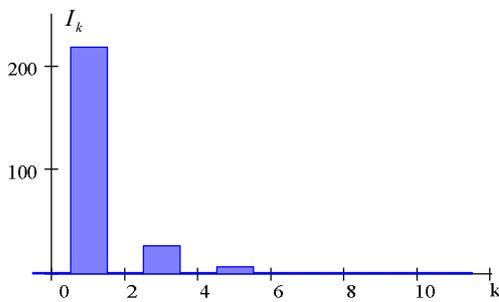
$$i(t) = \sum_{k=1}^M I_{k_a} + \sum_{k=1}^M I_{k_b}; \quad (19)$$

$$p(t) = P_{k_0} + \sum_{k=2}^{N+M} P_{k_a} + \sum_{k=2}^{N+M} P_{k_b}. \quad (20)$$

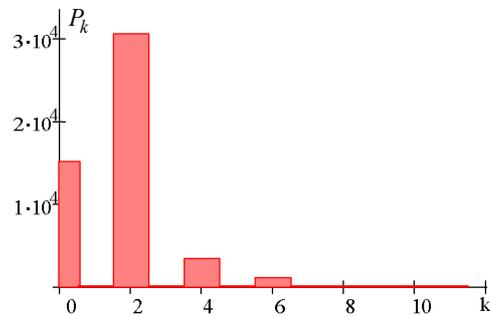
Гармонический состав тока и мощности (5) показан в табл. 2 и в виде диаграмм на рис. 11.

Таблиця 2 – Синусные и косинусные составляющие тока цепи и мгновенной мощности

Гармоники тока		
№ гармоники	Косинусные	Синусные
1	-212,487	-48,419
3	-19,304	-19,151
5	-1,709	-6,755
7	0,407	0,232
9	-0,284	0,501
11	-0,147	0,024
Гармоники мощности		
№ гармоники	Косинусные	Синусные
0	15060	0
2	-4553	30050
4	-1928	2737
6	-1087	329,233
8	-41,86	-107,485
10	74,18	21,318
12	7,509	27,174



а)



б)

Рисунок 11 – Диаграммы гармонического состава тока в цепи (а) и мгновенной мощности (б)

$$\begin{aligned}
 P_0 &= U_{a1}(I_{a1}) + U_{b1}(I_{b1}) + U_{a3}(I_{a3}) + U_{b3}(I_{b3}) + U_{a5}(I_{a5}) + U_{b5}(I_{b5}); \\
 2P_{a2} &= U_{a1}(I_{a1}+I_{a3}) + U_{b1}(-I_{b1}+I_{b3}) + U_{a3}(I_{a1}+I_{a5}) + U_{b3}(I_{b1}+I_{b5}) + U_{a5}(I_{a3}) + U_{b5}(I_{b3}); \\
 2P_{b2} &= U_{a1}(I_{b1}+I_{b3}) + U_{b1}(I_{a1}-I_{a3}) + U_{a3}(I_{b1}+I_{b5}) + U_{b3}(-I_{a1}-I_{a5}) + U_{a5}(I_{b3}) + U_{b5}(-I_{a3}); \\
 2P_{a4} &= U_{a1}(I_{a3}+I_{a5}) + U_{b1}(I_{b3}+I_{b5}) + U_{a3}(I_{a1}) + U_{b3}(-I_{b1}) + U_{a5}(I_{a1}) + U_{b5}(I_{b1}); \\
 2P_{b4} &= U_{a1}(I_{b3}+I_{b5}) + U_{b1}(I_{a3}-I_{a5}) + U_{a3}(I_{b1}) + U_{b3}(I_{a1}) + U_{a5}(I_{b1}) + U_{b5}(-I_{a1}); \\
 2P_{a6} &= U_{a1}(I_{a5}) + U_{b1}(-I_{b5}) + U_{a3}(I_{a3}) + U_{b3}(-I_{b3}) + U_{a5}(I_{a1}) + U_{b5}(I_{b1}); \\
 2P_{b6} &= U_{a1}(I_{b5}) + U_{b1}(I_{a5}) + U_{a3}(I_{b3}) + U_{b3}(I_{a3}) + U_{a5}(I_{b1}) + U_{b5}(I_{a1}); \\
 2P_{a8} &= 0 + 0 + U_{a3}(I_{a5}) + U_{b3}(-I_{b5}) + U_{a5}(I_{a3}) + U_{b5}(-I_{b3}); \\
 2P_{b8} &= 0 + 0 + U_{a3}(I_{b5}) + U_{b3}(I_{a5}) + U_{a5}(I_{b3}) + U_{b5}(I_{a3}); \\
 2P_{a10} &= 0 + 0 + 0 + 0 + U_{a5}(I_{a5}) + U_{b5}(-I_{b5}); \\
 2P_{b10} &= 0 + 0 + 0 + 0 + U_{a5}(I_{b5}) + U_{b5}(I_{a5}).
 \end{aligned} \tag{22}$$

Решение переопределенной системы (22) стандартными методами для систем линейных алгебраических уравнений, с учетом $N < M$, затруднительно. Поэтому найдем решение, используя первую трансформацию Гаусса.

Запишем систему уравнений (22) в матричном виде

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{P}. \tag{23}$$

Осуществим первую трансформацию Гаусса – умножим систему (23) на транспонированную матрицу \mathbf{I}^T слева:

Для уравнения (20), согласно (4), должны быть компенсированы все гармоники мощности $k > 2$.

Таким образом, уравнение компенсации будем искать в виде

$$\sum_{k=4}^{N+M} P_{k_a} + \sum_{k=4}^{N+M} P_{k_b} \rightarrow \min. \tag{21}$$

Пусть напряжение $u^*(t)$, необходимое для выполнения условия (21), изменяется по закону

$$u^*(t) = \sum_{n=1}^N U_{2n-1} \sin((2n-1)\omega t).$$

Тогда систему уравнений для составляющих мощности, которая содержит $M + N + 1$ уравнение, запишем в виде матрицы для $N = 3$.

$$\mathbf{I}^T \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}^T \cdot \mathbf{P}. \tag{24}$$

Получаем уравнение

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{f},$$

где $\mathbf{G} = \mathbf{I}^T \cdot \mathbf{I}$ – матрица Грамма.

Теперь решение (22) получим в виде

$$\mathbf{U}^* = (\mathbf{I}^T \cdot \mathbf{I}^{-1}) \cdot \mathbf{I}^T \cdot \mathbf{P}, \tag{25}$$

и результат решения покажем в табл. 3.

Таблиця 3 – Гармоники компенсирующего напряжения

Гармоники напряжения		
№ гармоники	Косинусные	Синусные
1	0,1	-319,563
3	-9,051	29,319
5	-0,193	0,763

На рис. 12 показаны временные зависимости напряжения и мощности до и после компенсации.

Гармонический состав и диаграммы исходной и компенсированной мощности показан в табл. 4 и на рис. 13.

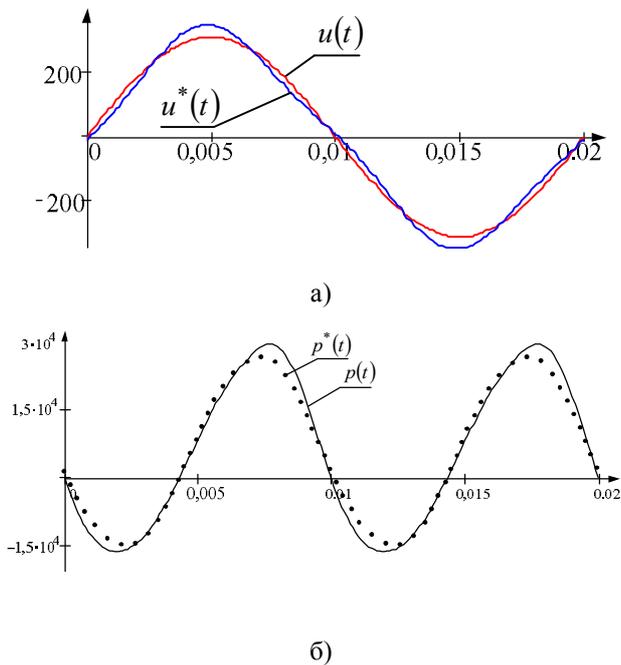


Рисунок 12 – Исходное $u(t)$ и компенсирующее $u^*(t)$ напряжение (а); исходная $p(t)$ и компенсированная $p^*(t)$ мощность (б)

Таблиця 4 – Синусные и косинусные составляющие мгновенной мощности до и после компенсации

Гармоники мощности		
№ гармоники	До компенсации	После компенсации
0	15064,52	15060,15
2	30395,25	27946,03
4	3348,07	354,67
6	1136,64	703,88
8	115,35	131,16
10	77,18	78,413
12	23,16	17,36

Пример 3. Для асинхронного электропривода (рис. 14, табл. 5) рассмотрим процесс компенсации параметрической несимметрии обмоток статора.

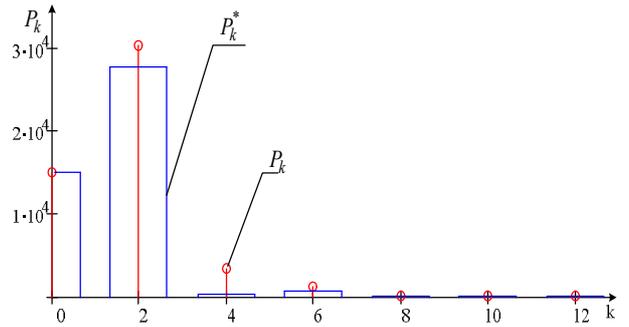


Рисунок 13 – Диаграммы гармонического состава исходной и компенсированной мощности

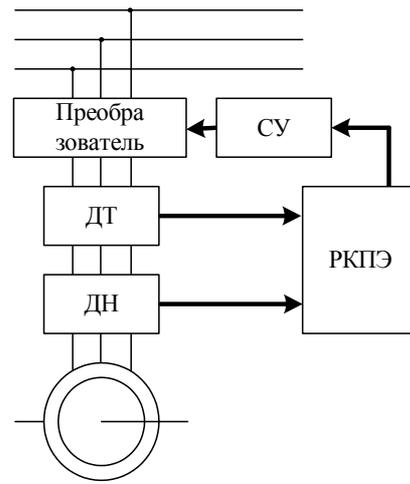


Рисунок 14 – Функциональная схема поисковой оптимизационной системы управления качеством преобразования энергии

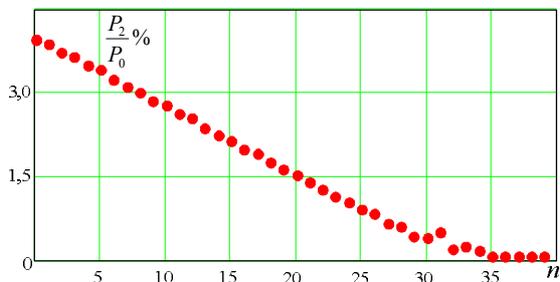
Таблиця 5 – Паспортные данные асинхронного двигателя

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	14
Номинальный ток, А	102,36
Номинальное напряжение, В	61
Номинальный коэффициент мощности	0,804
Номинальный КПД	0,858
Номинальная скорость, об/мин	615
Число пар полюсов	4
Перегрузочная способность	2,8
Кратность пускового момента	1,8
Кратность пускового тока	5
Момент инерции привода, кг м ²	24
Параметры схемы замещения	
Активное сопротивление фазы статора, Ом	0,0427
Индуктивность фазы статора, Гн	0,073

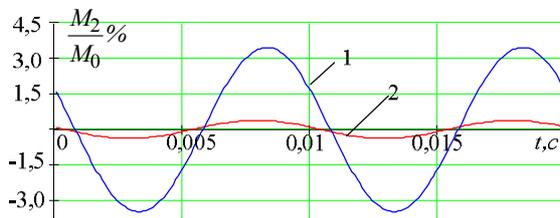
РКПЭ реализуется в виде поисковой системы, которая осуществляет пошаговый поисковый режим на основании значений напряжений и токов в каждой из фаз и определении величины переменной составляющей момента или мощности [11].

Алгоритм пошука побудований на визначенні найменше навантаженої в токовому відношенні фази і наступному зміні величини напруг в інших фазах, причому зміна здійснюється синхронно на однакову величину. При цьому крок варіюється в залежності від результатів попереднього зміни напруг. Основними критеріями управління є: збереження величини постійної складової електромагнітного моменту АД, токова навантаження фаз, яке не повинно перевищувати номінальну, забезпечення мінімальної величини перемінної складової миттєвої споживаної потужності.

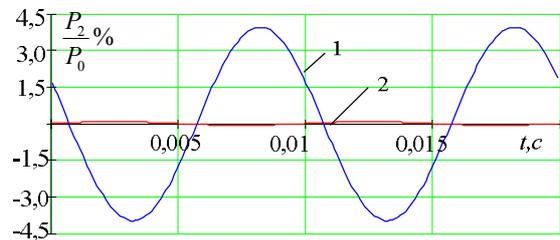
Дослідження компенсації параметричної несиметрії і покращення якості перетворення енергії виконано методом математичного моделювання з використанням Matlab. Процеси до і після компенсації показані на рис. 15, 16.



а)

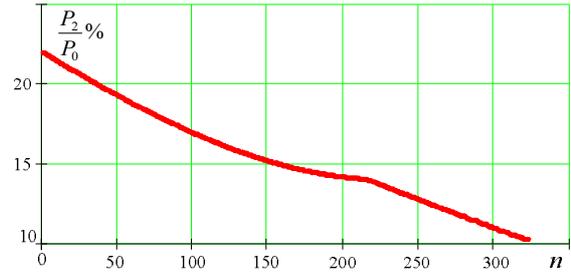


б)

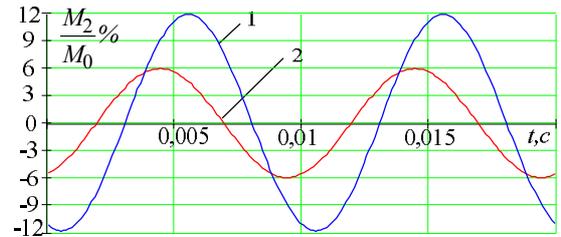


в)

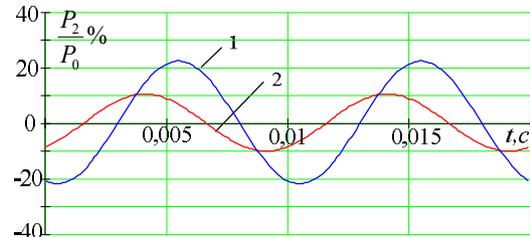
Рисунок 15 – Процес поетапної компенсації несиметрії активних опорів статора (а), зміна другої гармоніки електромагнітного моменту (б) і споживаної потужності (в) АД з несиметрією активних опорів статора 20 % при навантаженні $0,5M_n$: 1 – при симетричному живленні; 2 – при компенсації несиметрії



а)



б)



в)

Рисунок 16 – Процес поетапної компенсації несиметрії індуктивностей розсіяння статора (а), зміна другої гармоніки електромагнітного моменту (б) і споживаної потужності (в) АД з несиметрією індуктивностей розсіяння статора 5 % при навантаженні $0,5M_n$: 1 – при симетричному живленні; 2 – при компенсації несиметрії

Приклад 4. Для СД (рис. 17) розглянемо процес компенсації несиметрії напруг живлячої мережі.

Для СД, в відмінність від раніше розглянутих принципів компенсації, існує ще один канал управління якістю перетворення енергії – шляхом впливу на обмотку збудження.

При використанні контуру збудження задачу управління (4) сформулюємо як знаходження такого напруги збудження

$$U_f(t) = U_{fc} + U_{fv} \sin(\Omega t + \phi),$$

формуючого ток збудження і магнітний потік, компенсуючий часові гармоніки потужності, де U_{fc} – постійна складова напруги збудження; U_{fv} – амплітуда змінної складової напруги збудження; Ω , ϕ – частота і фаза змінної складової.

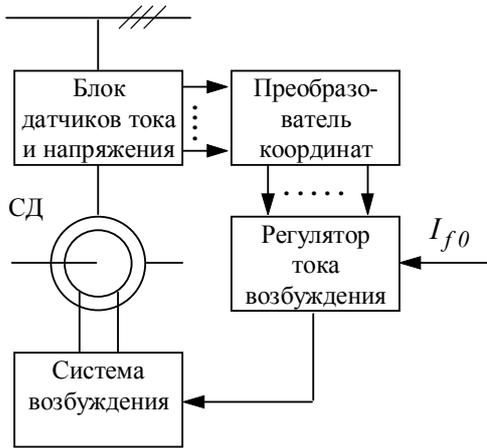


Рисунок 17 – Функциональная схема системы электропривода

Рассмотрим случай несимметрии напряжения питания на статоре СД. Уравнение (2) для этого случая запишем в виде

$$P_{\Sigma}(t) = \sum_i^{A,B,C} [U_{mi} \sin(\omega t - \psi_i) I_{mi} \sin(\omega t - \psi_i - \phi_i)], \quad (26)$$

где U_{mi}, I_{mi} – амплитуда фазного напряжения и фазного тока; ψ_i – фазовый сдвиг между векторами напряжений; ϕ_i – угол между векторами тока и напряжения.

Для случая несимметрии питающей сети выразим несимметричную систему напряжений через симметричные составляющие. Тогда уравнение для мощности будет иметь вид [12]:

$$P_{\Sigma}(t) = \frac{3}{2} U_1 I_1 \cos \phi - \frac{3}{2} \times [U_1 I_2 \sin(2\omega t + \Delta_1 + \Delta_2) + U_2 I_1 \sin(2\omega t + \Delta_1 + \Delta_2 + \phi)] \quad (27)$$

или, с учетом векторных диаграмм СД для токов прямой и обратной последовательностей, без учета активных сопротивлений:

$$P_{\Sigma}(t) = \frac{3}{2} \frac{E}{x} U_1 \sin \theta + \frac{3}{2} \frac{E}{x} U_2 \sin(2\omega t + \Delta_1 + \Delta_2 - \theta) - \frac{3}{2} U_1 U_2 \sin(2\omega t + \Delta_1 + \Delta_2) \left(\frac{1}{x_2} + \frac{1}{x} \right), \quad (28)$$

где Δ_1, Δ_2 – углы между векторами напряжений прямой и обратной последовательности с вектором напряжения фазы А (U_{1A}, U_{2A}); θ – угол нагрузки; x_2 – индуктивное сопротивление обратной последовательности; x – индуктивное сопротивление двигателя; U_1, U_2 – напряжение прямой и обратной последовательности; E – ЭДС возбуждения.

Из уравнения (28), с учетом $I_f = I_{f0} \frac{E}{U_{\delta}}$, найдем:

$$I_f(t) = \frac{I_{f0} \left(P_c + \frac{3}{2} U_1 U_2 \sin(2\omega t + \Delta_1 + \Delta_2) \left(\frac{1}{x_2} + \frac{1}{x} \right) \right)}{\frac{3}{2} \frac{U_{\delta}}{x} (U_1 \sin \theta + U_2 \sin(2\omega t + \Delta_1 + \Delta_2 - \theta))}, \quad (29)$$

где U_{δ} – базисное напряжение; I_{f0} – ток возбуждения, заданный условиями технологического режима.

Для магистрального насосного агрегата с синхронным двигателем СТД–2500–2РУ4 и насосом НМ–3600–230, установленным на НПС "Кременчуг", замеры напряжения питания показали несимметрию напряжений на статоре: $U_{AB} = 6330 \text{ В}$, $U_{BC} = 6240 \text{ В}$, $U_{CA} = 6311 \text{ В}$. Амплитуда колебаний мощности при этом составляет $P_v = 296,8 \text{ кВт}$ (11,9% P_n). Выполненные расчеты работы СД при регулировании тока возбуждения (результаты моделирования приведены на рис. 18–20) показали эффективность регулирования и полное снижение переменной составляющей мощности.

На рис. 18 приведены временные диаграммы токов статора при управлении СД по закону (29).

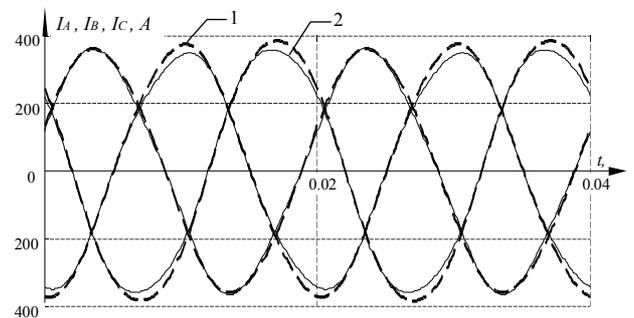


Рисунок 18 – Фазные токи СД при постоянном токе возбуждения (1); при компенсации регулированием тока возбуждения (2)

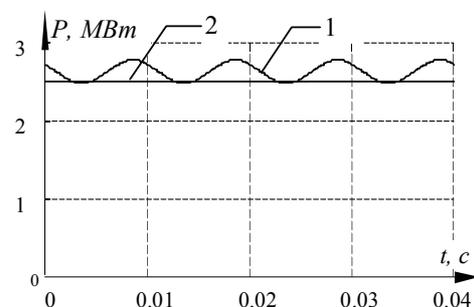


Рисунок 19 – Мощность при постоянном токе возбуждения (1); при компенсации регулированием тока возбуждения (2)

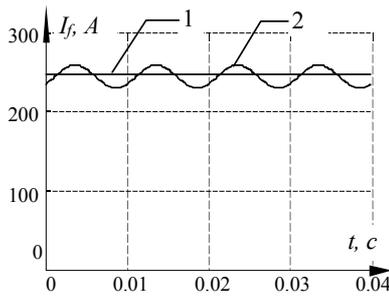


Рисунок 20 – Ток возбуждения: 1 – неизменный; 2 – при компенсации

ВЫВОДЫ. Не вызывает сомнений, что в основу анализа природы качества преобразования энергии должны быть положены электромагнитные и электромеханические взаимодействия полей и моментов от них. Отсутствие однозначной оценки качества протекания процессов преобразования энергии в ЭМС говорит, с одной стороны, о сложности этих процессов, а с другой – об особенностях проявления этих процессов в конкретных физических системах и устройствах.

Требуется поиск адекватных показателей качества преобразования энергии, а также разработки соответствующего математического аппарата для их качественной и количественной оценки. Это могут быть, например, методы на основе анализа переменных состояния, но, по нашему мнению, учитывая энергетическую природу преобразования энергии, наилучшие результаты будут получены на основе анализа мгновенной мощности и момента ЭД.

Установлено, что мгновенная мощность является основным показателем, характеризующим процессы преобразования энергии в ЭМС.

Впервые предложен способ управления качеством преобразования энергии в ЭД переменного тока в составе регулируемых электроприводов. Управление качеством преобразования энергии осуществляется средствами преобразователя питания статорных цепей АД или возбудителя СД, не требует дополнительных специальных систем или устройств и обеспечивается искусственным созданием несимметрии и несинусоидальности питающей энергии на статоре АД и в цепи возбуждения СД, что позволяет минимизировать переменные составляющие мгновенной мощности и момента.

Показана теоретически возможность компенсации высших гармоник мощности и момента, которые вызваны параметрической несимметрией и наличием нелинейностей в параметрах ЭМС. Проведенные авторами исследования предложенных законов и алгоритмов на математических моделях показали возможность снизить в девять раз переменную составляющую электромагнитного момента и в 54 раза – потребляемую мощность при несимметрии активных сопротивлений статора, а также, соответственно, 3,5 и 3,7 – при несимметрии индуктивностей рассеяния статора и 2,0 и 2,7 – при несимметрии механической системы. Неполная, в отдельных случаях, компенсация параметрической несимметрии

обусловлена сложным многочастотным характером изменения тока статора и наличия гармоник выше второй, которые при использовании показанных алгоритмов не компенсировались.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 13109-97 "Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения".
- Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
- Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173 с.
- Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высшая школа, 1989. – 312 с.
- Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах // Проблемы создания новых машин и технологий: сбор. науч. трудов КГПУ. – Кременчуг: КГПУ, 2002. – Вып. 1. – С. 81–85.
- Родькин Д.И. О необходимости разделения понятий качества потребления и преобразования энергии // Проблемы создания новых машин и технологий: сбор. науч. трудов КГПУ. – Кременчуг: КГПУ, 2003. – Вып. 2 (19). – Т. 1. – С. 143–148.
- Черный А.П., Кальченко А.В., Киричков В.А. Применение показателей качества преобразования энергии для контроля за состоянием электромеханического оборудования // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: збір. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 45. – С. 449–452.
- Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.В. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 244 с.
- Бердай Абдельмажид, Черный А.П., Родькин Д.И. Комплексная задача управления качеством преобразования энергии электромеханическими системами // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний наукововиробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 316–319.
- Родькин Д.И. Составляющие мгновенной мощности при полигармонических напряжении и токе // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2/2003 (19). – Т. 1. – С. 123–130.
- Черный А.П., Бердай Абдельмажид. Поисковая система компенсации параметрической несимметрии при управлении качеством преобразования энергии в приводах с асинхронными двигателями // Вісник національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»: збір. наук. праць. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – Вип. 36. – С. 447–450.

12. Волощенко А.М., Родкін Д.І., Черный А.П. К вопросу повышения ресурса работоспособности синхронных двигателей насосных агрегатов

// Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ», 2000. – Вип. 113. – С. 302–303.

QUALITY CONTROL OF ENERGY CONVERSION IN ALTERNATING CURRENT DRIVE: PROBLEMS AND WAYS TO SOLVE IT

O. Chorny

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

Berdai Abdelmajid

ENSEM, University Hassan II AIN Schok
PO Box 8118, Oasis, Casablanca, Morocco. E-mail: a.berdai@gmail.com

Proved a problem quality control in electric energy conversion with electric AC motors, which are powered from the mains with an asymmetric and nonsinusoidal voltage, have acquired parametric asymmetry. Presented research on the application of quality management principles developed energy conversion. The possibility to compensate for the higher harmonics of the power consumption and electromagnetic torque of electric motor by controlling the power converter in the stator and rotor circuits. The proposed principles extended to systems with thyristor voltage regulators on the stator frequency converters and inverters with independent PWM output voltage drives with asynchronous motors with thyristor excitation system of synchronous motors, as well as search optimization system.

Key words: quality of energy conversion, energy conversion control, electric AC power converter.

REFERENCES

1. GOST 13109–97 "Quality norms of electrical energy in general purpose power supply". (in Russian)
2. Shidlovskii, A.K. and Kuznetsov, V.G. (1985), *Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyakh* [Increase the power quality in electrical networks], Naukova dumka, Kyiv. (in Russian)
3. Zhezhelenko, I.V. and Saenko, Yu.L. (1996), *Voprosy kachestva elektroenergii v elektroustanovkakh* [Matters of power quality in electrical installations], PGTU, Mariupol. (in Russian)
4. Ivanov-Smolenskii, A.V. (1986), *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh* [Electromagnetic forces and power conversion in electrical machines], Vysshaya shkola, Moscow. (in Russian)
5. Rodkin, D.I., Chorny, A.P. and Martynenko, V.O. (2002), "Justification quality criteria of energy conversion in electromechanical systems", *Problemy sozdaniya novykh mashin i tekhnologiy. Sb. nauchnykh trudov KGPU*, Vol. 1, pp. 81–85. (in Russian)
6. Rodkin, D.I. (2003), "About the need to separate the concepts of quality and consumption of energy conversion", *Problemy sozdaniya novykh mashin i tekhnologiy. Sb. nauchnykh trudov KGPU*, Vol. 2, no. 19, part 1, pp. 143–148. (in Russian)
7. Chorny, A.P., Kalchenko, A.V. and Kirichkov, V.A. (2005), "Application of quality power conversion for monitoring the state of the electromechanical equipment", *Visnik natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivskiy politekhnichniy institut»*. Zbirnik naukovikh prats. Tematichniy vipusk «Problemy avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika», no. 45, pp. 449–452. (in Russian)
8. Chorny, A.P., Rodkin, D.I., Kalinov, A.P. and Vorobeichik, O.V. (2008), *Monitoring parametrov elektricheskikh dvigateley elektromekhanicheskikh sistem* [Monitoring parameters of electric motors electromechanical systems], Shcherbatykh, Kremenchug. (in Russian)
9. Berday, A., Chorny, A.P. and Rodkin, D.I. (2012), "Complex task of quality management systems, electromechanical energy conversion", *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, Vol. 3, no. 19, pp. 316–319. (in Russian)
10. Rodkin D.I. (2003), "Components of instantaneous power for the poly-harmonic voltage and current", *Visnik KDPU: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 2, no. 19, part 1, pp. 123–130. (in Russian)
11. Chorny, A.P. and Berday, A. (2013), "Parametric search engine unbalance compensation in quality management of energy conversion in drives with asynchronous motors", *Visnik natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivskiy politekhnichniy institut»*. Zbirnik naukovikh prats. Tematichniy vipusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika», no. 36, pp. 447–450. (in Russian)
12. Voloshenko, A.M., Rodkin, D.I. and Chorny, A.P. (2000), "On the question of increasing the resource capacity for work synchronous motor pumps", *Visnik natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivskiy politekhnichniy institut»*. Zbirnik naukovikh prats. Tematichniy vipusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika», Vol. 113, pp. 302–303. (in Russian)

Стаття надійшла 20.02.2014.