

УДК 621.313

КОМПЛЕКСНАЯ ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

А. П. Черный, Д. И. Родькин

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, Oasis, Касабланка, Марокко. E-mail: a.berdai@gmail.com

Сформулирована комплексная задача управления качеством преобразования энергии электромеханическими системами. Представлены исследования по применению разработанных принципов управления качеством преобразования энергии в регулируемых электроприводах переменного тока. Показана возможность компенсации высших гармоник потребляемой мощности и электромагнитного момента электродвигателя за счет управления преобразователем энергии. 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.

КОМПЛЕКСНА ЗАДАЧА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

О. П. Чорний, Д. Й. Родькін

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, Oasis, Касабланка, Марокко. E-mail: a.berdai@gmail.com

Сформульовано комплексну задачу управління якістю перетворення енергії електромеханічними системами. Надано дослідження по застосуванню розроблених принципів управління якістю перетворення енергії в регульованих електроприводах змінного струму. 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 инженерно-технических специалистов металлургической, горнорудной промышленности, транспорта – всех, кто эксплуатирует 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 нелинейностей в силовых контурах, несимметрия напряжения от неравномерной нагрузки по фазам и т.д. Все это известно, и существуют методы снижения вышеперечисленных факторов [3]. Однако при этом потребитель энергии – электрический двигатель, как прави-

ло, 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 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 под-

хода 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, 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 [7, 8, 9]. Указанные показатели и коэффициенты на их основе предполагалось применять для оценки состояния электро-механической 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 – наделяя потребителя функциями регулятора режима потребления. 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 т.п. [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, ПВ 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 ЭМС, 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 управления 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:

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

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 электрических 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 [5]. Путем преобразований (2) может быть преобразовано в выражение:

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

где $P_{k_0}, P_{k_a}, P_{k_b}$ – 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 [6].

Задачу решения уравнения (4) можно сформулировать следующим образом.

Если временной зависимости мгновенной мощности соответствует уравнение

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

а частотной области соответствует 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 сигнала напряжения, обеспечивающего выполнение (3).

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) компенсации переменных составляющих мощности и момента и пути управления (рис. 3).

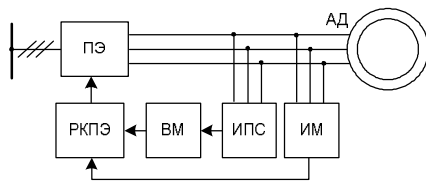


Рисунок 1 – Функциональная схема системы управления качеством преобразования энергии в АД

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.

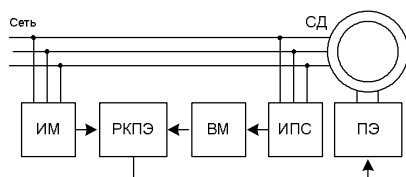


Рисунок 2 – Функциональная схема системы управления качеством преобразования энергии в СД

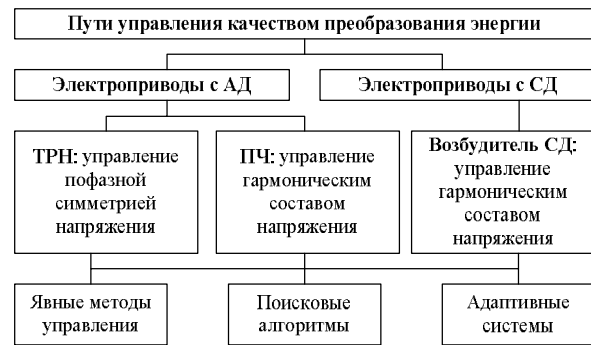


Рисунок 3 – Пути управления качеством преобразования энергии

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

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 и не требует дополнительных специальных систем или устройств.

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 снижения переменных составляющих мощности в 8–10 раз, а переменных составляющих момента – в 3–7 раз.

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.

4. 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.

5. Родькин Д.И. Составляющие мгновенной мощности при полигармоническом напряжении и токе // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наукових праць КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2/2003 (19), ч. 1.

6. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.В. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 244 с.

7. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах / Д.И. Родькин, А.П. Черный, В.А. Мартыненко // Про-

блемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПУ. – Кременчук, 2002. – Вып. 1. – С. 81–85.

8. Родькин Д.И. О необходимости разделения понятий качества потребления и преобразования энергии // Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПУ. – Кременчук, 2003. – Вып. 2 (19), ч. 1. – С. 143–148.

9. Применение показателей качества преобразования энергии для контроля за состоянием электромеханического оборудования / А.П. Черный, А.В. Кальченко, В.А. Киричков // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 45. – С. 449–452.

THE COMPLEX TASK OF CONTROL OF ENERGY CONVERSION QUALITY IN AC ELECTRIC DRIVES

O. Chorny, D. Rodkin

Kremenchuk Mykhaylo 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

The paper considers the complex task of control of energy conversion quality in electromechanical systems, along with application of the principles developed for control of energy conversion quality in regulated AC electric drives. We also present the possibility of compensation of high-order harmonics of an electric motor's power consumption and electromagnetic moment through control by the energy converter. The principles proposed are extended to systems with thyristor voltage regulators in the stator, systems with frequency converters including an autonomous voltage inverter with a pulse-width modulation system for AC motor drives and thyristor excitation systems for synchronous motors, as well as to search optimization systems.

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

REFERENCES

1. GOST 13109-97" *Quality norms of electrical energy in general purpose power supply*". [in Russian]

2. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. *Increase the power quality in electrical networks*. – K.: Naukova dumka, 1985. – 268 p. [in Russian]

3. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Matters of power quality in electrical installations*. – Mariupol: PGTU, 1996. – 173 p. [in Russian]

4. Ivanov-Smolenskiy A.V. *Electromagnetic forces and power conversion in electrical machines*: Textbook. Manual for higher educational institutions, specialities «Electromechanics». – M.: Vysshaya shkola, 1989. – 312 c. [in Russian]

5. Rodkin D.I. Components of instantaneous power for the poly-harmonic voltage and current // *Bulletin of Kremenchuk State Polytechnic University*. – Kremenchuk: KSPU, 2003. – Iss. 2/2003 (19), part 1. [in Russian]

6. Cherniy A.P., Rodkin D.I., Kalinov A.P., Vorobeychik O.V. *Monitoring of parameters of electric engines of the electromechanics systems*: Monograph. – Kremenchug: PE Shcherbatykh A.V., 2008. – 244 p. [in Russian]

7. Rodkin D.I. Ground of criteria of quality of transformation of energy in the electromechanics systems // *Problems of creation of new machines and technologies. Collection of scientific labours of KSPU*. – Kremenchug, 2002. – Iss. 1. – PP. 81–85. [in Russian]

8. Rodkin D.I. About the necessity of division of concepts of quality of consumption and transformation of energy // *Problem of creation of new machines and technologies. Collection of scientific labours of KSPU*. – Kremenchug, 2003. – Iss. 2 (19), part 1. – PP. 143–148. [in Russian]

9. Cherniy A.P. Application of indexes of quality of transformation of energy for control after the state of electromechanics equipment // *Bulletin of National Polytechnic University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. Collection of scientific labours «Problems of automatic electric drive. Theory and practice». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2005. – Iss. 45. – PP. 449–452. [in Russian]

Стаття надійшла 25.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Садовим О.В.