

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

*Т. В. Коренькова, к.т.н., доц., В. Г. Ковальчук, асп.
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина
E-mail: ieesu@kdu.edu.ua*

Выполнен анализ процессов преобразования энергии в электромеханическом комплексе с использованием метода мгновенной мощности. Определены составляющие мгновенной мощности, изменение которых обусловлено проявлением нелинейных свойств элементов системы. Предложена группа показателей энергопроцессов, наиболее полно отражающая изменение энергетического состояния электромеханического комплекса.

Ключевые слова: энергетическое состояние, мгновенная мощность, составляющие мгновенной мощности, эффективная мощность, энергетический объем.

Введение. В процессе функционирования в силовом канале электромеханического комплекса (ЭМК) возникают разнообразные энергетические состояния или режимы, которые количественно характеризуются набором электрических, энергетических и механических параметров (напряжением, током, мощностью, частотой вращения и моментом), а также технологическими показателями (производительностью, давлением).

Единым параметром, который связывает между собой элементы ЭМК и используется при анализе процессов энергопотребления, энергопреобразования и энергоуправления является мощность, выражаемая в одних и тех же метрических единицах независимо от физической природы исходных компонент. Энергетические переменные (электрическая мощность, механическая, кинетическая, гидравлическая и т.д.) дают конкретную характеристику протекающего процесса преобразования энергии и позволяют выполнить оценку эффективности энергетического канала ЭМК, его энергетической управляемости [1, 2].

Процессы передачи, преобразования и потребления энергии в ЭМК сложны и многообразны; характеризуются неоднонаправленностью потока энергии, наличием накопителей энергии различного рода, элементов с нелинейными характеристиками, сложным характером изменения энергетических процессов во времени. Составляя баланс мощностей потоков энергии для силового канала ЭМК, можно учитывать различные уровни и направления энергии, описывая тем самым разнообразие энергетических режимов его работы.

На рис. 1, а приведена диаграмма энергопреобразования в простейшем ЭМК, где потребляемая энергия P_s идет на совершение полезной (механической) работы P_{mech} , увеличение кинетической энергии ΔP_k вращательных масс электропривода и суммарные потери мощности ΔP_Σ во всех элементах силового канала.

При анализе энергетических процессов, например, в гидротранспортном комплексе (рис. 1, б), как в одном из наиболее сложных и энергоемких объектов, энергетический канал энергопреобразования включает потери мощности в турбомеханизме

ΔP_{gp} и в трубопроводе ΔP_{gn} . В случае необходимости регулирования параметров гидротранспортной системы следует учитывать потери мощности на регулирующем органе (преобразователе ΔP_{cf} или задвижке ΔP_b); при анализе кавитационных режимов – потери мощности в канале газообразования ΔP_{kav} и т.п. [3].

Таким образом, энергетический канал технологического комплекса представляет собой сложную структуру преобразования энергии, отражающую разнообразие рассматриваемых явлений и энергетических режимов.

Для анализа энергетических процессов в ЭМК обычно используют интегральные оценки [3–5], базирующиеся на усреднении физических величин на заданном интервале времени, и сопряженные с потерей информации в результате интегрирования, что приводит к ошибочным результатам.

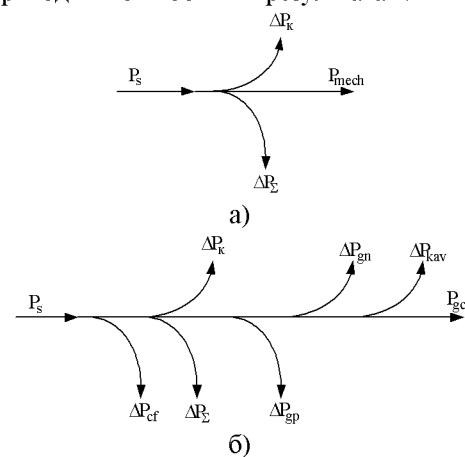


Рисунок 1 – схемы распределения потерь мощности в простейшей ЭМС (а) и в гидротранспортном комплексе (б)

Дальнейшее развитие теории анализа энергопроцессов привело к использованию метода мгновенной мощности, позволяющего наиболее полно характеризовать изменение мощности во временной области, что позволяет решать вопросы оценки энергетической и технологической управляемости ЭМК. Основой теоретической базы метода мгновенной мощности является баланс гармонических

составляющих мгновенной мощности источника питания и элементов ЭМК [6]. Энергетический подход с использованием понятия мгновенной мощности применим для цепей постоянного и переменного тока, в статических и переходных режимах, с периодическими и непериодическими сигналами, для разных сред в виду универсальности аппарата аппроксимации исходных компонент энергетического режима с использованием тригонометрических рядов [7–10].

Цель работы. Анализ процессов преобразования энергии в электромеханическом комплексе.

Материал и результаты исследований. Представим мгновенные значения сигналов напряжения и тока, состоящими из ряда гармонических [6]:

$$U(t) = \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t - \varphi_n) = \sum_{n=0}^N U_{na} \cos(n\Omega t) + \sum_{n=0}^N U_{nb} \sin(n\Omega t); \quad (1)$$

$$I(t) = \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t - \psi_m) = \sum_{m=0}^M I_{ma} \cos(m\Omega t) + \sum_{m=0}^M I_{mb} \sin(m\Omega t), \quad (2)$$

где n, m – номера гармоник напряжения и тока, соответственно; N, M – число составляющих напряжения и тока; $\Omega = 2\pi f$ – круговая частота сигнала напряжения или тока; f – частота изменения сигнала; t – время изменения сигнала; φ, ψ – фазовые углы.

Тогда, мгновенная мощность в системе:

$$P_{ei}(t) = U(t)I(t) = \left(\sum_{n=1}^N U_{na} \cos(n\Omega t - \varphi_n) \right) \left(\sum_{m=1}^M I_{ma} \cos(m\Omega t - \psi_m) \right) = P_{0\Sigma} + \sum_{k=1}^K P_{ka} \cos(k\Omega t) + \sum_{k=1}^K P_{kb} \sin(k\Omega t), \quad (3)$$

где $P_{0\Sigma}$ – суммарная постоянная составляющая мгновенной мощности; P_{ka} – косинусная составляющая мгновенной мощности; P_{kb} – синусная составляющая мгновенной мощности; k – номер гармоники мощности ($k = |m \pm n|$); K – число составляющих мощности.

Анализ (3) показал, что мгновенная мощность включает в себя сумму следующих групп составляющих.

Первая группа определяется перемножением одночастотных составляющих напряжения и тока и образует постоянную и каноническую составляющие мощности.

Постоянная составляющая мгновенной мощности:

$$P_{0\Sigma} = \sum_{n=1}^N U_n \cos(n\Omega t - \varphi_n) \sum_{m=1}^M I_m \cos(m\Omega t - \psi_m) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M U_n I_m \cdot \quad (4)$$

Косинусная составляющая мгновенной мощности канонического порядка:

$$P_{kac}(t) = \sum_{n=1}^N U_n \cos(n\Omega t) \sum_{m=1}^M I_m \cos(m\Omega t) + \sum_{n=1}^N U_n \sin(n\Omega t) \sum_{m=1}^M I_m \sin(m\Omega t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M U_n I_m \cos(k\Omega t). \quad (5)$$

Синусная составляющая мгновенной мощности канонического порядка:

$$P_{kbc}(t) = \sum_{n=1}^N U_n \cos(n\Omega t) \sum_{m=1}^M I_m \sin(m\Omega t) + \sum_{n=1}^N U_n \sin(n\Omega t) \sum_{m=1}^M I_m \cos(m\Omega t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M U_n I_m \sin(k\Omega t). \quad (6)$$

Вторая группа составляющих определяется произведением разночастотных компонент напряжения и тока и представляет собой неканонические составляющие мощности.

Косинусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка:

$$P_{kac}(t) = \sum_{n=1}^N U_n \cos(n\Omega t) \sum_{m=1}^M I_m \cos(m\Omega t) + \sum_{n=1}^N U_n \sin(n\Omega t) \sum_{m=1}^M I_m \sin(m\Omega t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M U_n I_m \cos(k\Omega t). \quad (7)$$

Синусная составляющая мгновенной мощности неканонического порядка:

$$P_{kbc}(t) = \sum_{n=1}^N U_n \cos(n\Omega t) \sum_{m=1}^M I_m \sin(m\Omega t) + \sum_{n=1}^N U_n \sin(n\Omega t) \sum_{m=1}^M I_m \cos(m\Omega t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M U_n I_m \sin(k\Omega t). \quad (8)$$

Таким образом, мгновенная мощность состоит из суммы постоянной составляющей, а также канонических и неканонических составляющих мощности:

$$P(t) = P_{0\Sigma} + P_{kac}(t) + P_{kbc}(t) + P_{kbc}(t) + P_{kbs}(t). \quad (9)$$

Для анализа энергетических процессов в электромеханической системе рассмотрена модель сис-

темы тиристорный преобразователь-двигатель (ТПД) с отрицательной обратной связью по скорости (рис. 2). Электрический двигатель описан линеаризованной математической моделью, где $k_d = \frac{1}{R_\Sigma}$ –

коэффициент передачи; $T_e = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma}$ – электромагнит-

ная постоянная времени; R_Σ – суммарное активное сопротивление двигателя; L_Σ – суммарная индуктивность; J – момент инерции двигателя. Работа однонаправленного ТП представлена нелинейностью типа «ограничение». Задающее воздействие, подаваемое на вход системы, имеет вид $U(t) = U_0 + U_a \cos(\Omega t)$, где U_0 – постоянная составляющая напряжения; $U_a \cos(\Omega t)$ – переменная составляющая входного напряжения; U_a – амплитуда переменной составляющей сигнала задания.

Параметры моделируемой системы: $P_n = 75$ кВт; $U_n = 220$ В; $I_n = 340,9$ А; $k_d = 31,25$; $k_f = 1,33$; $J = 2,896$ кгм²; $R_\Sigma = 0,032$ Ом; $L_\Sigma = 0,00082$ Гн; $T_e = 0,026$ с; $M_{rn} = 477,8$ Нм; $k_t = 22$; $k_{r1} = 2,89$; $k_{r2} = 5,77$; $k_{os} = 0,064$; $k_m = 0,019$, $k'_{r1} = 0,6$.

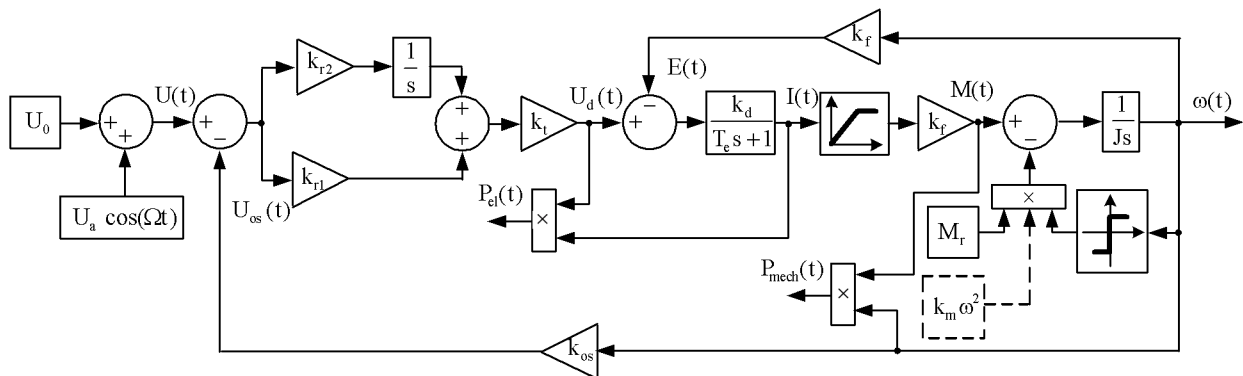


Рисунок 2 – Структурная схема модели электромеханической системы

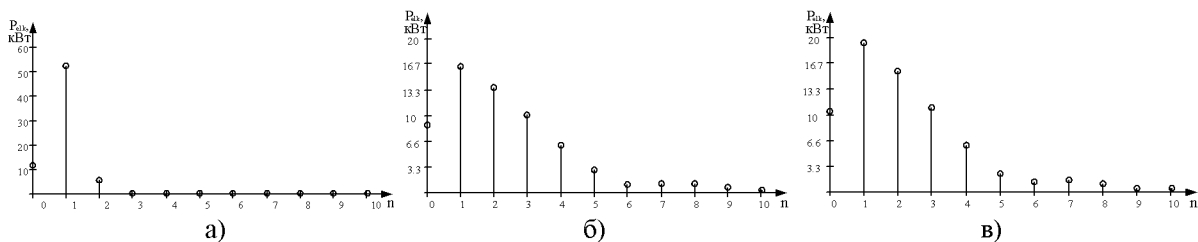


Рисунок 3 – Амплитудные спектры мгновенной электрической мощности в линейной (а) и нелинейной (б, в) системах

На рис. 4 приведены зависимости эффективных значений составляющих (постоянной, косинусной и синусной) мгновенной мощности от амплитуды

На рис. 3,а, б приведены спектры амплитудных значений мгновенной мощности для линейной системы и системы с нелинейностью в силовой цепи при задающем воздействии $U(t) = 5 + 2 \cos(\Omega t)$ с частотой $f = 2$ Гц и моменте сопротивления $M_r = 100$ Нм. Анализ показал, что в спектре мгновенной мощности нелинейной системы имеют место гармоники высшего порядка – 2, 3, 4, и т.д., что обусловлено влиянием свойств нелинейного элемента системы на энергетические процессы, протекающие в ней.

На рис. 3,в приведен спектр амплитудных значений мгновенной мощности с учетом однонаправленности ТП и моменте сопротивления вида $M_r = k_m \omega^2$. Такой вид нагрузочного момента соответствует работе электропривода с насосом на валу, где момент сопротивления нелинейно зависит от скорости и приводит к росту амплитудных значений гармоник мощности.

Мерой оценки качества энергетических процессов в ЭМК при изменении управляющих сигналов, введении в контур преобразования энергии нелинейностей, накопителей энергии различного рода, является эффективная мощность P_{ef} , которая определяется как среднеквадратичное значение мгновенной мощности [6–8]:

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} = \sqrt{P_{0\Sigma}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (P_{kac} + P_{kas})^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (P_{kbc} + P_{kbs})^2} \quad (10)$$

вуют изменению суммарного эффективного значения мгновенной электрической мощности в линейной и нелинейной системах. Из анализа полученных кривых следует, что при малых значениях амплитуды U_a переменная составляющая сигнала задания эффективная мощность в линейной и нелинейной системах практически не меняется; при дальнейшем увеличении U_a наблюдается интенсивный рост эффективного значения мощности P_{efnl} в нелинейной системе, что обусловлено проявлением нелинейных свойств вводимого в силовой канал ЭМК элемента.

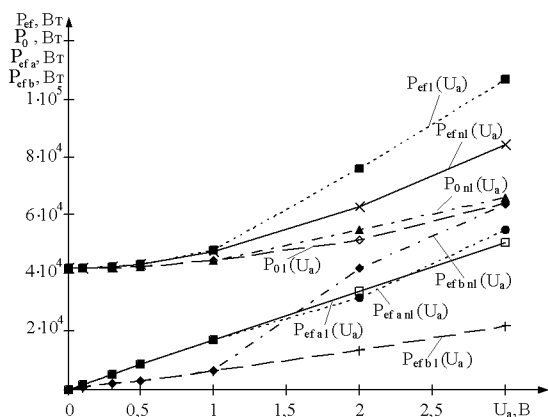


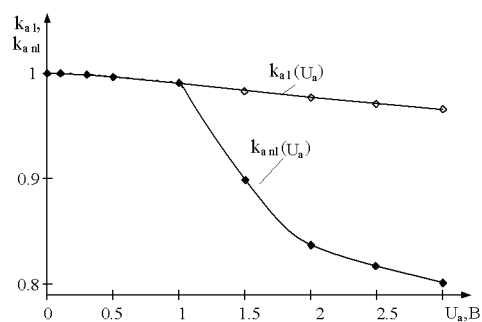
Рисунок 4 – Кривые изменения эффективных значений мгновенной мощности в линейной и нелинейной системах

Не менее наглядными при анализе энергопроцессов являются кривые изменения коэффициентов использования активной и реактивной мощности в ЭМК [6]:

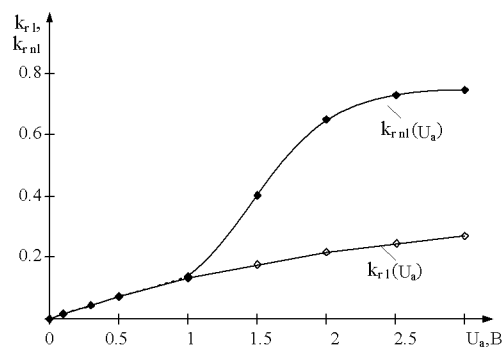
$$k_a = \frac{\sqrt{P_{0\Sigma}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (P_{kac} + P_{kas})^2}}{P_{ef}}; \quad (11)$$

$$k_r = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (P_{kbc} + P_{kbs})^2}}{\sqrt{P_{0\Sigma}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (P_{kac} + P_{kas})^2}}. \quad (12)$$

Анализ кривых (рис. 5) показал, что введение нелинейности в силовую цепь двигателя приводит к существенному снижению коэффициента использования активной мощности и, соответственно, росту коэффициента реактивной мощности при увеличении амплитудного значения переменная составляющей сигнала задания в пределах 1–3 В.



а)



б)

Рисунок 5 – Кривые изменения коэффициентов использования активной а) и реактивной б) электрической мощности в линейной и нелинейной системах

Декомпозиция мгновенной мощности на постоянную и ортогональные знакопеременные составляющие позволяет определить энергетический объем ЭМК, представляющий собой в пространстве параллелепипед, диагональю которого является суммарная эффективная мощность в системе (10). Такая графическая интерпретация процессов энергопреобразования отражает реальное энергетическое состояние системы, демонстрирует изменение переменных составляющих мощности при изменении амплитуды и частоты управляющего воздействия, введении нелинейностей и т.п.

Сказанное является принципиально важным – анализ производной мгновенной мощности от параметров задающего сигнала позволяет оценить качество преобразования энергии, энергетическую управляемость рассматриваемой системы.

Подтверждением выше изложенному служат диаграммы изменения энергетического объема в линейной и нелинейной системах (рис. 6, а, б) при задающем воздействии $U(t) = 5 + 2 \cos(\Omega t)$ с частотой $f = 1 \div 3$ Гц, где по осям координатных плоскостей отложены эффективные значения составляющих мгновенной мощности. Анализ показал, что нелинейная система характеризуется значительным ростом синусной компоненты мгновенной мощности, увеличением эффективной мощности системы в целом. Изменение характера нагрузки на валу двигателя (рис. 6, в) приводит к расширению энергетического объема системы.

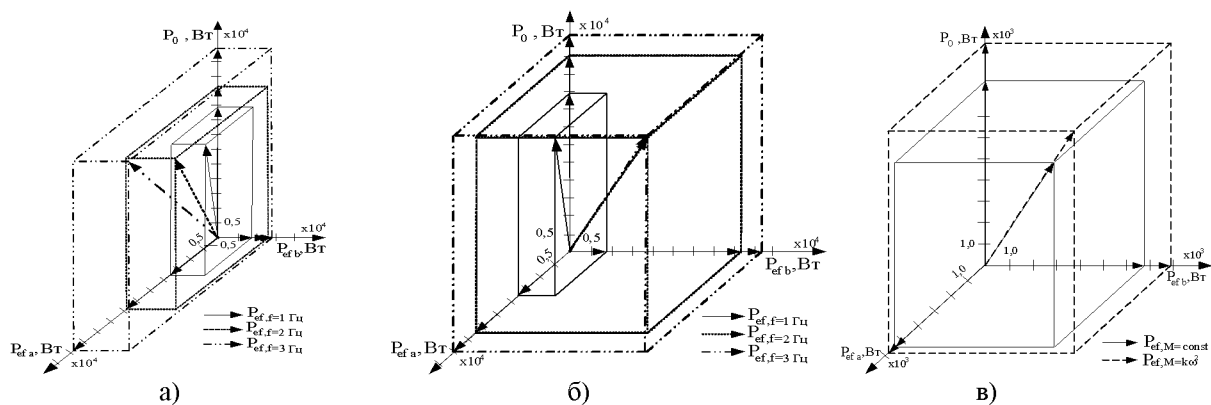


Рисунок 6 – Диаграммы изменения энергетического объема в линейной (а) и нелинейной (б, в) системах

Выводы. Доказано, что анализ процессов преобразования энергии во всех звеньях энергетического канала электромеханического комплекса с использованием составляющих мгновенной мощности отражает реальную картину энергообменных процессов в системе, обусловленную наличием нелинейных элементов, накопителей энергии и т.п. Показано, что наличие в электромеханической системе нелинейного элемента приводит к появлению высших гармонических в амплитудном спектре мощности, что обусловлено ростом переменной составляющей мощности и приводит к снижению энергетической эффективности системы. В связи с этим, для изменения амплитуды высших гармонических в спектрах мощностей, необходимо формировать определенного вида управляющие воздействия.

В качестве меры мгновенной мощности для анализа энергетических процессов в электромеханических комплексах оправдано использование эффективного значения мощности, содержащей постоянную и переменную составляющие, где первая определяет активную мощность в рассматриваемой схеме, а вторая компонента – мгновенную мощность обменного характера. Анализ полученных

максимумов, причем диагональ параллелепипеда является суммарное эффективное значение мощности в рассматриваемой системе. Анализ показал, что вводимые нелинейности в силовую цепь двигателя, со стороны нагрузки приводят к существенному росту синусоидальной компоненты мгновенной мощности и расширению объема геометрической фигуры, расположенной в первом октанте перпендикулярных плоскостей.

Очевидно, что при наличии возмущающих воздействий, приводящих, например, к снижению устойчивости системы и сопровождающихся значительным увеличением амплитудных значений и изменением знака фазы в спектре мощности, параллелепипед, отображающий энергетический объем системы, смещается во второй или третий октанты, что необходимо учитывать в виду возможных режимов рекуперации энергии в сеть высшими гармоническими введением знаковой функции в определенные компоненты мгновенной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коренькова Т. В. Формализация понятия управляемости в электромеханических комплексах // Научно-прикладный журнал: "Проблемы силовой электротехники". – Киев: ИЕДЦАНУ, 2010. – № 1. – С. 10-14.

trical Machines, ICEM 2010. – Rome, Italy, 2010. – Paper RF-009458. IEEE Catalog Number CFP1090B-

система оказывается нечувствительной к воздействию нелинейных свойств вводимого э

к проявлению нелинейных свойств элемента при

вводимого элемента, при переменной составляющей активной мощности в нелинейно возрастает. Этот факт оценки способности систематические воздействия по изменению управляющих и т. е. для оценки энергии анализируемой системы. Такая интерпретация изменения состояния электромеханической пространственной фигуры анализируемая на определение постоянной и переменной составляющей мгновенной мощности в идеальной (нелинейной) системе

Paper RF-009458. IEEE Catalog Number CFP1090B-CDR, ISBN 978-1-4244-4175-4, Library of Congress Number 2009901651.

3. Зиновьев Г.С. Определение результирующих энергетических показателей вентильных преобразователей. Силовые вентильные преобразователи. – Новосибирск: НЭТИ, 1984. – С. 89–100.
4. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О. А. Маевский – М.: Энергия, 1975. – 320 с.
5. Баланс энергий в силовых цепях / В.Е. Тонкаль, А.Е. Новосельцев, С.П. Денисюк. – К.: Наукдумка, 1992. – 312 с.
6. Родькин Д.И. Составляющие мгновенной мощности полигармонических сигналов // Электротехника. – М., 2003. – № 3. – С. 38–42.

нию нелинейных свойств в больших амплитудах сигнала задания – эффективной системе интенсивно можно использовать для передачи энергии силовому тракту при из возмущающих воздействия энергетической управляемости

Предложена графическая интерпретация энергетического объема электромеханического комплекса в виде параллелепипеда, балансирующей эффективных значений составляющих мгновенной (линейной) и реальной

7. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, 2004. – Вип. 15. – С. 10–18.

8. Родькин Д.И. О необходимости разделения понятий качества потребления и преобразования энергии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 2/2003(19), част. 1 – Кременчук: КДПУ, 2003. – С. 143–148.

9. Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами. Часть 2. Определение и использование показателей энергетических режимов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 3/2005 (32). – Кременчук: КДПУ, 2005. – С. 106–115.

10. Родькин Д.И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 3/2007 (44), част. 1. – Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 66–77.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЕННЯ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

*Т. В. Коренькова, к.т.н., доц., В. Г. Ковальчук, асп.
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна
E-mail: ieesu@kdu.edu.ua*

Виконаний аналіз процесів перетворення енергії в електромеханічному комплексі з використанням методу миттєвої потужності. Визначені складові миттєвої потужності, зміна яких зумовлена проявом нелінійних властивостей елементів системи. Запропонована група показників енергопроцесів, які найбільш повно відображають зміну енергетичного стану електромеханічного комплексу.

Ключові слова: енергетичний стан, миттєва потужність, змінна складова потужності, ефективна потужність, енергетичний об'єм.

CHARACTERISTICS OF THE ENERGY CONVERSION PROCESS IN ELECTROMECHANICAL COMPLEXES

*T. Korenkova, Cand. Sc. (Tech), Assoc.Prof. V. Kovalchuk, P.G., post-grad.
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine
E-mail: ieesu@kdu.edu.ua*

The analysis of energy conversion in electromechanical complex using the instantaneous power. Identified components of the instantaneous power, which change due to the manifestation of the nonlinear properties of system elements. We propose a set of indicators of energy processes that best reflects the change in energy state of the electromechanical industry.

Key words: energy state, instantaneous power, variable component of power, effective power, energy volume.