

УДК 621.311

UDC 621.311

**СИСТЕМНЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ
КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
ПРИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОМ И
АВТОНОМНОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ**

**SYSTEM CRITERION FOR THE ESTIMATION
OF ELECTRIC POWER QUALITY AND
ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AT
THE CENTRALIZED AND INDEPENDENT
ELECTRICAL SUPPLY**

Плахотнюк Александр Николаевич
д.т.н., профессор

Plachotnjuk Alexander Nikolaevich
Dr.Sci.Tech., professor

Видовский Леонид Адольфович
д.т.н., доцент

Vidovskiy Leonid Adolfovich
Dr.Sci.Tech., associate professor

Дудник Юрий Анатольевич
*Кубанский государственный технологический уни-
верситет, г. Краснодар, Россия*

Dudnik Yuriy Anatolievich
*Kuban State technological university, Krasnodar, Rus-
sia*

Статья посвящена вопросам контроля качества электрической энергии. В статье рассматривается исследование мгновенной мощности в трехфазной системе электроснабжения и на основе проведенных исследований предлагается альтернативный метод контроля качества электроэнергии

The article is devoted to the questions of electric power quality assurance. In this article, the research of instant power in three-phase AC power system is considered, and based on the spent researches, the alternative quality monitoring of quality of the electric power is offered

Ключевые слова: КАЧЕСТВО
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, СИСТЕМНЫЙ КРИТЕРИЙ,
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ,
МГНОВЕННАЯ МОЩНОСТЬ

Keywords: ELECTRIC POWER QUALITY,
SYSTEM CRITERION, ELECTROMAGNETIC
COMPATIBILITY, INSTANT POWER

В отличие от существующих зарубежных и отечественного стандартов, использующих для оценки качества электроэнергии (КЭ) (электромагнитной (энергетической) совместимости по уровню кондуктивных помех элементов СЭС) множество относительных показателей технологического характера для напряжений, предложенный и разработанный автором метод контроля КЭ по одному системному критерию энергетической неуравновешенности естественно учитывает относительные показатели как напряжений, так и токов, а также энергетические потери и пропускную способность линии передачи, обеспечивая электромеханическую устойчивость СЭС и эксплуатационный уровень напряжений (частоты) независимо от степени соизмеримости мощностей источника и приемника [1, 2].

Для установившегося (периодического) режима трехфазной системы понятие «электроэнергия» связано со средним значением мгновенной

мощности за период (активной мощностью) $P_{3\phi} = \frac{1}{T} \mathcal{E}(t) \Big|_0^T = \frac{1}{T} \int_0^T p_{3\phi}(t) dt$, где

$\mathcal{E}(t) \Big|_0^T$ - «собственно энергия», а ее «качество» при $\mathcal{E}(t) \Big|_0^T = const$ определяется

временной функцией мгновенной мощности $p_{3\phi}(t) = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$

($p_{3\phi}(t) = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C$ - для трехпроводной системы). Поскольку понятие

«качество электроэнергии» является относительным, необходимо выбрать

«эталон качества» - «эталонный режим» функционирования трехфазной

системы, с которым можно сравнивать другие режимы. В качестве «эталона»

КЭ естественно выбрать КЭ «идеальной» трехфазной системы (трех-

проводной, симметричной, синусоидальной при активной нагрузке), отличающейся

постоянством мгновенной мощности – «энергетической уравновешенностью»

$p_{3\phi(a)}(t) = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C = P_{3\phi(a)} = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л}$ и минимумом энергетических

потерь в линии передачи и источнике при максимальной пропускной способности,

электромеханической устойчивости и стабильности напряжений. При этом в каждой из фаз

будет наблюдаться неустранимая энергетическая неуравновешенность с минорантным значением

критерия оценки, которым является однофазный коэффициент пульсации мгновенной

мощности (ТОЭ)

$$q_{1\phi(a)} = \frac{\Delta p_{1\phi(a)}(2\omega)}{P_{1\phi(a)}} = 1, \quad (1)$$

где $\Delta p_{1\phi(a)}(2\omega) = U_{\phi} I_{Л}$ - амплитуда пульсаций с двойной частотой (2ω);

$P_{1\phi(a)} = U_{\phi} I_{Л}$ - активная фазная мощность. Следовательно, в «эталоне»

фазная энергетическая неуравновешенность равна $q_{1\phi(мин)} = 100\%$, а трех-

фазная неуравновешенность отсутствует

$$q_{3\phi(a)} = \frac{\Delta p_{3\phi(a)}(2\omega)}{P_{3\phi(a)}} = \frac{|p_{3\phi(a)}(t) - P_{3\phi(a)}|}{P_{3\phi(a)}} = 0, \quad (2)$$

где $\Delta p_{3\phi(a)}(2\omega)$ - амплитуда пульсаций ($\Delta p_{3\phi(a)}(2\omega)=0$). При сравнении с «эталонным режимом» трехфазной трехпроводной (симметричной, синусоидальной) системы с активно – реактивной нагрузкой, критерий энергетической неуравновешенности (КЭН) (коэффициент пульсации мгновенной мощности) которой

$$q_{3\phi(a,p)} = \frac{\Delta p_{3\phi(a,p)}(2\omega)}{P_{3\phi(a,p)}} = 0, \quad (3)$$

где $\Delta p_{3\phi(a,p)} = P_{3\phi(a,p)} = \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}} \cos \varphi$, характеризует ее как уравновешенную СЭС, но в отличие от «эталона», имеющую более высокие энергетические потери в линии и источнике, меньшую пропускную способность и стабильность напряжений при наличии изменении реактивной составляющей токов. Повысить (управлять) КЭ рассматриваемой СЭС представляется возможным на основе минимизации фазных критериев энергетической неуравновешенности

$$q_{1\phi(a,p)} = \frac{\Delta p_{1\phi(a,p)}(2\omega)}{P_{1\phi(a,p)}} = \frac{U_{\phi}I_{\text{Л}}}{U_{\phi}I_{\text{Л}} \cos \varphi} = \frac{1}{\cos \varphi}, \quad (4)$$

повышая (управляя) $\cos \varphi$ с помощью автоматических компенсирующих устройств, при этом пропускная способность линии увеличивается линейно с возрастанием $\cos \varphi$, а удельные потери уменьшаются с возрастанием $\cos^2 \varphi$ [1, 2].

Рассмотрим трехфазную трехпроводную СЭС (асимметричную, синусоидальную при активной нагрузке), обладающую свойством взаимности, сравнив ее с «эталонным режимом», КЭН (коэффициент пульсаций мгновенной мощности) которой равен [1, 2]

$$q_{3\phi}^A = \frac{K_{2U} + K_{2I}}{\cos \varphi_{(1)}} = K_{2U} + K_{2I}, \text{ при } \varphi_{(1)} = 0, \quad (5)$$

где $\varphi_{(1)}$ - фазовый сдвиг между напряжениями и токами прямой последовательности; K_{2U}, K_{2I} - коэффициенты асимметрии обратной последователь-

ности по напряжению и току. При K_{2U} (ПД) = 4% (предельно допустимое значение по ГОСТу 13109-97) и $K_{2I} = 4%$ (по ГОСТу не нормируется) имеем КЭН $q_{3\phi}^A = 8%$, т.е. чувствительность $q_{3\phi}^A$ к асимметрии в 2 раза выше, чем стандартная оценка K_{2U} (ПД), что подтверждает необходимость использовать для оценки КЭ информацию о токах. Рассмотрим, как при этом асимметрия влияет на энергетические потери в линии [2] с учетом соотношения

$$I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 = 3(1 + K_{2I}^2) I_{(1)}^2, \quad (6)$$

откуда увеличение потерь произойдет всего на $K_{2I}^2 = 0,16%$, а суммарные потери от асимметрии с добавлением мощности обратной последовательности возрастут на $(K_{2U} K_{2I} + K_{2I}^2) = 0,32%$ - это намного меньше потерь в ЛЭП из-за снижения $\cos \varphi_{(1)}$ (при активно-реактивной нагрузке): $(\cos^{-2} \varphi_{(1)} - 1) \cdot 100\% = 23%$ при $\cos \varphi_{(1)} = 0,9$. В этом случае для повышения КЭ в первую очередь необходимо применять автоматические компенсирующие устройства для пофазного повышения коэффициента мощности на основе минимизации фазных КЭН.

Аналогичные соотношения имеют место для четырехпроводной СЭС: критерий энергетической неуравновешенности

$$q_{3\phi(4np.)}^A \cong \frac{\sqrt{K_{2U}^2 + K_{2I}^2}}{\cos \varphi_{(1)}}, \quad (7)$$

в котором влияние нулевой последовательности (K_{0U}, K_{0I}), как оказалось, пренебрежительно мало, а потери в ЛЭП зависят от соотношения

$$I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2 = 3(1 + K_{2I}^2 + 7K_{0I}^2) I_{(1)}^2. \quad (8)$$

Таким образом, при асимметрии и синусоидальности трехфазной СЭС эффективно управлять КЭ на основе единого КЭН можно, минимизируя фазные КЭН путем компенсации, снижая уровни обменных энергетических

процессов в фазах нагрузки [3]. Дальнейшее повышение КЭ на основе системного КЭН возможно только при выравнивании активной нагрузки фаз.

Рассмотрим влияние несинусоидальности напряжений и токов трехфазной трехпроводной симметричной СЭС на ее энергетическую неуравновешенность. Известно, что в данной системе присутствуют гармоники, кратные $K = 3n + 1$ (n – четное целое) – 1, 7, 13, ..., – прямой последовательности и кратные $K = 3n + 2$ (n – нечетное целое) – 5, 11, 17, ..., – обратной последовательности, последние вызывают «энергетическую асимметрию фаз», приводящую к неуравновешенности. Не нарушая общности, из-за сложности выводов ограничимся моделью 1-й (прямой) и 5-й (обратной) гармониками, энергетически доминирующими по сравнению с остальными. Критерий энергетической неуравновешенности в данном случае [1, 2] равен

$$q_{3\phi}^H(6\omega) = \frac{\sqrt{K_{U5}^2 + K_{I5}^2 + 2K_{U5}K_{I5} \cos(\varphi_1 - \varphi_5)}}{\cos \varphi_1}, \quad (9)$$

где K_{U5} , K_{I5} – коэффициенты 5-й гармоники по напряжению и току. Так при $K_I = K_U$ (ПД) = 12% – коэффициентах несинусоидальности (по ГОСТу для 0,38 кВ) потери в ЛЭП от несинусоидальности составляют всего $K_I^2 = 1,44\%$ при системной неуравновешенности $q_{3\phi}^H(6\omega) \cong 20\%$ ($K_{U5} = K_{I5} = 9\%$ (ПД) и $\cos \varphi_1 = 0,9$). Здесь также, как и при асимметрии, для повышения КЭ прежде необходимо повышение $\cos \varphi_1$, минимизируя фазные КЭН, а затем необходимо конкретно анализировать причины несинусоидальности токов нагрузки [4], теоретически и экспериментально (визуально) исследовать временные диаграммы мгновенных мощностей фаз и системы в целом, минимизируя пульсации отдельных спектральных составляющих [5].

Мгновенная мощность трехфазной системы и ее пульсации во времени непосредственно связаны (при известной частоте вращения) с мгновен-

ным значением электромеханического вращающего момента синхронных и асинхронных электрических машин, связанного с конструктивными особенностями их электромагнитной системы. Это обстоятельство позволяет осуществлять контроль и диагностику во времени (мониторинг) вращающего момента пофазно и в целом. При $i = const$ используем параметрическую форму модели момента, отличающуюся физической наглядностью и простотой:

$$M(\alpha, i) = \int_0^i \frac{\partial \psi(\alpha, i')}{\partial \alpha} di', \quad (10)$$

Выражение (10), для упрощения расчетов, несложно преобразовать в другую эквивалентную параметрическую форму макромодели для нелинейной магнитной цепи (контура)

$$M(\alpha, U_M) = \int_0^{U_M} U_M' \frac{\partial G_M(\alpha, U_M')}{\partial \alpha} dU_M', \quad (U_M = const) \quad (11)$$

с параметрами: U_M - магнитным напряжением и $G_M(\alpha, U_M)$ - магнитной проводимостью, задаваемой аналитической аппроксимацией или численно. Параметрические формы модели нелинейного электромеханического преобразователя (10) и (11) не требуют сложной процедуры вычисления энергии магнитного поля нелинейного объекта.

Поскольку $\psi(\alpha, i)$ в (10) и $G_M(\alpha, U_M)$ в (11) являются (особенно для индукторных ЭМ) быстроосциллирующими функциями от “ α ”, это относится также и к энергиям, для повышения точности дифференцирования этих функций по “ α ” и определения мгновенных значений момента целесообразно использовать известный способ дифференцирования по Ланцошу [6].

Как известно, контроль качества КЭ в РФ осуществляется согласно ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», действующему с 1999 года. Постановлением Госстандарта РФ от 14.08.2001 г. №74 до особых указаний приоста-

навливается применение ГОСТ 13109-97, кроме двух показателей качества электроэнергии (ПКЭ): установившихся отклонений напряжения и частоты (которые обеспечиваются энергоснабжающей организацией). Тем не менее, ряд организаций - потребителей электроэнергии заинтересованы в более детальном представлении о параметрах качества электроэнергии в точке общего присоединения (границе балансовой принадлежности сетей потребителя и электроснабжающей организации) и проводят анализ КЭ также и по показателям асимметрии и несинусоидальности напряжений в трехфазной системе, являющимся параметрами длительного эксплуатационного режима. Как уже указывалось в предыдущих работах, асимметрия и несинусоидальность напряжений и токов в трехфазной системе электроснабжения вызывает не только дополнительные потери электроэнергии, но и в значительно большей мере приводит к появлению пульсаций мгновенной мощности – энергетической неуравновешенности системы, что, в свою очередь, способствует увеличению вибраций, шума, возникновению опасных резонансных явлений при работе оборудования. Величина пульсаций мгновенной мощности для трехфазной четырехпроводной асимметричной синусоидальной системы напряжений и токов может быть вычислена по формуле (12).

$$q_p^{(A)} = \frac{\Delta p_{3\phi}(2\omega)}{P_{3\phi}^{(1)}} = \frac{\sqrt{K_{2U}^2 + K_{2I}^2 + K_{0U}^2 K_{0I}^2 + 2K_{2U} K_{2I} \cos(\varphi_{(1)} - \varphi_{(2)}) + 2K_{2I} K_{0U} K_{0I} \cos(\alpha_{(1)} + \alpha_{(2)} - \varphi_{(2)} - 2\alpha_{(0)} + \varphi_{(0)})}}{\cos\varphi_{(1)} \mathbf{L} + 2K_{2U} K_{0U} K_{0I} \cos(\alpha_{(1)} + \alpha_{(2)} - \varphi_{(1)} - 2\alpha_{(0)} + \varphi_{(0)}) \mathbf{L}}, \quad (12)$$

где K_{0U} , K_{0I} – коэффициенты асимметрии напряжения и тока нулевой последовательности; $\varphi_{(2)}$, $\varphi_{(0)}$ – фазовые углы сдвига между напряжением и током для обратной и нулевой последовательности; $\alpha_{(1)}$, $\alpha_{(2)}$, $\alpha_{(0)}$ – начальные фазы фазных напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности.

При измерении показателей качества электрической энергии на одном из предприятий г. Краснодара анализатором качества «ЭРИС–КЭ.01А/тк », были получены результаты, представленные в таблице 1 (фрагмент из протокола измерений).

Таблица 1 – Фрагмент протокола измерения КЭ анализатором «ЭРИС–КЭ.01А/тк »

Наименование ПКЭ	Измеренные значения		Нормы по ГОСТ 13109-97	
	норм.	пред.	норм.	пред.
Установившееся отклонение напряжения, %	3,75	7,38	5,0	10,0
Отклонение частоты, Гц	0,04	0,06	0,2	0,4
Коэффициент несинусоидальности напряжения (при пофазном измерении), %	5,17	6,99	8,0	12,0
Коэффициент асимметрии напряжений по обратной последовательности, %	4,19	6,50	2,0	4,0
Коэффициент асимметрии напряжений по нулевой последовательности, %	7,33	15,55	2,0	4,0

Так как измеренное значение несинусоидальности (с вероятностью 95%) лишь незначительно превышает 5%, то условно такую систему напряжений будем считать синусоидальной (согласно ГОСТ 13109-97, если уровень несинусоидальности в трехфазной системе не превышает 5%, то эту систему можно считать синусоидальной). Измеренные же значения показателей асимметрии трехфазной четырехпроводной системы напряжений значительно превышают допускаемые стандартом нормы. На основании суточных графиков изменения коэффициентов асимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности, проведем оценку энергетической неуравновешенности данной трехфазной системы согласно выражению (12). Так как значения коэффициентов асимметрии токов по обратной и нулевой последо-

вательности не нормируются ГОСТ 13109-97 и суточными графиками этих величин мы не располагаем, то примем значения коэффициентов асимметрии токов равными соответствующим показателям асимметрии для напряжений (в большинстве же случаев, как показывает практика, асимметрия токов в трехфазной системе значительно превосходит асимметрию напряжений). Зададимся наиболее вероятными значениями углов сдвига фазы токов $\varphi_{(1)} = 30^\circ$, $\varphi_{(2)} = 40^\circ$, $\varphi_{(0)} = 30^\circ$ ($\cos \varphi_{(1)} = \cos \varphi_{(0)} = 0.87$, $\cos \varphi_{(2)} = 0.77$). Значения начальных фаз фазных напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности примем одинаковыми: $\alpha_{(1)} = \alpha_{(2)} = \alpha_{(0)} = 10^\circ$ (наихудший случай с точки зрения влияния на величину q_p). Суточные графики коэффициентов асимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности, коэффициента пульсаций мгновенной мощности (коэффициента энергетической неуравновешенности) в едином масштабе времени приведены на рисунке 1. На графике $q_p(t)$ видно, что величина пульсаций мгновенной мощности (частотой 100Гц) в трехфазной четырехпроводной системе электроснабжения достигает 17,3% от величины «полезной» мощности прямой последовательности основной частоты (в течение 13-го часа контрольного периода), вызывая известные негативные явления, способствующие снижению срока службы электрооборудования и ухудшению его эксплуатационных показателей [7].

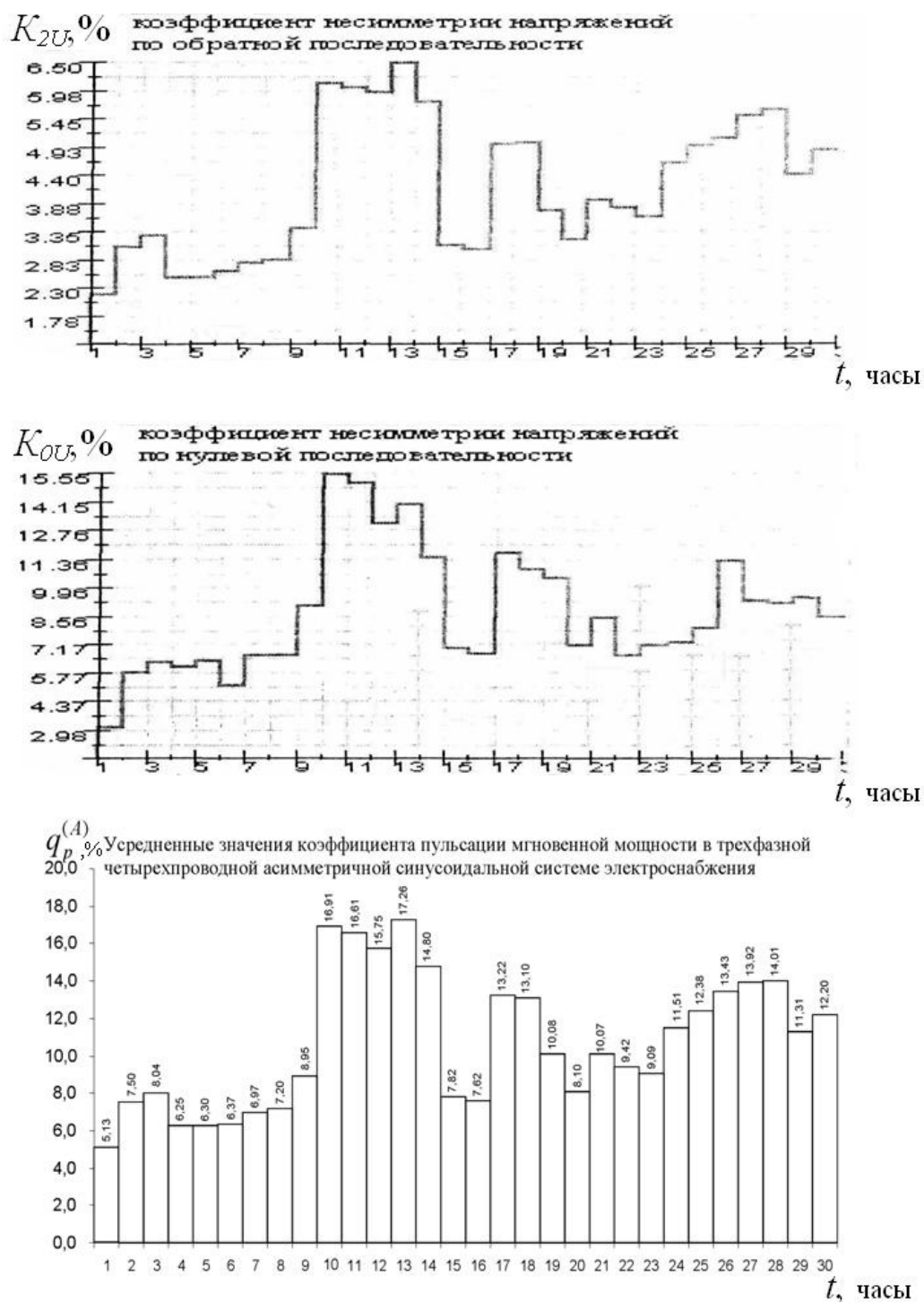


Рисунок 1 – Изменение показателей асимметрии напряжений и энергетической неуравновешенности в трехфазной системе электроснабжения в течение суток.

Литература:

1. Плахотнюк А.Н. Единый критерий оценки качества электроэнергии трехфазной системы // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы третьей межвузовской научной конференции. Том 1; Краснодар. военн. авиац. инс-т (КВАИ). Краснодар, 2004. С. 187-191.
2. Плахотнюк А.Н. и др. Критерии оценки качества трехфазной системы при асимметрии и несинусоидальности напряжений и токов // Научный журнал «Труды Кубанского государственного технологического университета». Том XIX. - Серия: Нефтегазопромысловое дело. – Вып.3; Изд-во КубГТУ. Краснодар, 2003. С. 103-111.
3. Плахотнюк А.Н. О некоторых особенностях энергетического взаимодействия элементов и обменных процессов в электротехнических системах // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки (ЮРНК - 07): Материалы пятой Всероссийской научной конференции. Том 1; Краснодар. высш. воен. авиац. уч. летчиков (КВВАУЛ). Краснодар, 2007. С. 93-96.
4. Плахотнюк А.Н. О коэффициенте мощности управляемых выпрямителей // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки (ЮРНК - 07): Материалы пятой Всероссийской научной конференции. Том 1; Краснодар. высш. воен. авиац. уч. летчиков (КВВАУЛ). Краснодар, 2007. С. 89-92.
5. Плахотнюк А.Н., Дудник Ю.А. Контроль и управление качеством электроэнергии на основе критерия энергетической неуравновешенности системы электропитания (СЭС) // Технические и технологические системы (ТТС-11): Материалы третьей международной научной конференции «ТТС-11». Сборник материалов; Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». Краснодар, 2011. С. 164-169.
6. Плахотнюк А.Н., Дудник Ю.А. Сравнительный анализ методов расчета и моделирования тангенциальных и радиальных силовых взаимодействий элементов нелинейных электромеханических преобразователей (НЭМП) // Технические и технологические системы (ТТС-10): Материалы третьей международной научной конференции «ТТС-10». Сборник материалов; Краснодар. высш. воен. авиац. уч. летчиков (КВВАУЛ). Краснодар, 2010. С. 80-84.
7. Плахотнюк А.Н., Дудник Ю.А. Оценка степени энергетической неуравновешенности в реальной системе электропитания // Технические и технологические системы (ТТС-10): Материалы третьей международной научной конференции «ТТС-10». Сборник материалов; Краснодар. высш. воен. авиац. уч. летчиков (КВВАУЛ). Краснодар, 2010. С. 106-109.