

УДК 621.314:621.316.7

В.С. Козлов, А.Ф. Синолиций, В.А. Кольсун

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ НА ОСНОВЕ P - Q ТЕОРИИ

V.S. Kozlov, A.F. Sinolitsyy, V.A. Kol'sun

MATHEMATICAL TOOL SYNTHESIS FOR ACTIVE FILTER CONTROL BASED ON IRP P - Q THEORY

В статье предложен математический аппарат выявления неактивных составляющих тока, который можно использовать для управления активными фильтрами по разным критериям оптимальности. Предложены два способа реализации данной стратегии управления активными фильтрами, отличающиеся точностью вычислений. Математические выкладки получены в результате синтеза известных теорий мгновенной мощности. Некоторые формулы представлены в дискретном виде для применения в цифровых вычислительных системах.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ; P - Q ТЕОРИЯ; АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР; КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ; СИММЕТРИРОВАНИЕ ТОКОВ.

Mathematical tool of non-active current components compensation for active filter control is designed. Proposed conception provides active filter control with different compensation strategies. Mathematical tool can be realized in two ways which differ in calculation error and complexity. Proposed mathematical tool is the combination of frequency-base and time-based methods of active filter control. Some formulas are presented in discrete view for using in embedded systems.

ENERGY SAVING TECHNOLOGY; P - Q THEORY; ACTIVE FILTER; REACTIVE POWER COMPENSATION; BALLANSING CURRENTS.

Активные фильтрокомпенсирующие устройства — достаточно эффективное решение задач устранения высших гармоник, регулирования уровня реактивной мощности, улучшения коэффициента мощности, балансирования нагрузки и т. д. [1, 10]. Для управления активными фильтрокомпенсирующими устройствами предложено значительное количество математических аппаратов. Большинство из них может обеспечить работу только по одному критерию оптимальности [7] (например, передача энергии к потребителю с минимумом потерь в сети). Одной из наиболее распространенных теорий, применяемых для управления активными фильтрами, является p - q теория мгновенной мощности, предложенная в [2]. Данная теория имеет ряд недостатков, которые указаны в работах [3–5]. Суть критики этой теории можно свести к факту некорректного определения составляющих

мощности в сети питания при несимметрии и несинусоидальности системы питающего напряжения — в таком случае активный фильтр генерирует в сеть ток коррекции, определенный с ошибкой, [3, 4] и, соответственно, симметрирование фазных токов оказывается невозможным.

Для решения описанных проблем многие ученые предлагают собственные математические аппараты управления активными фильтрами, но также не лишены недостатков.

В данной статье мы предлагаем концепцию управления активными фильтрами тока, объединяющую различные подходы к решению задачи выявления необходимого тока коррекции для сети. Предложенная концепция имеет два варианта реализации, равных по производительности и незначительно отличающихся сложностью реализации в цифровых системах.

Критерии оптимальности

При оптимизации энергетических процессов к устройствам улучшения показателей качества электроэнергии могут предъявлять разные, иногда противоречивые критерии компенсации [7]. Наиболее актуальные из них представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оптимальности при потреблении электроэнергии

№	Критерий	Формула
1.	Передача максимума энергии в нагрузку	$\frac{u}{i} = \frac{U^2}{P} = \text{const}$
2.	Равномерное потребление энергии [6]	$p = P; t \in [0, T]$
3.	Симметрирование фазных токов (напряжений)	$\begin{cases} i_A + i_B + i_C = 0; \\ I_A = I_B = I_C \end{cases}$
4.	Минимизация мгновенных значений тока	$i \leq I_{m \max}$

Здесь u, i, p — мгновенные значения соответственно напряжения, тока и мощности; $i_A, i_B, i_C, I_A, I_B, I_C$ — соответственно мгновенные и действующие значения токов фаз A, B, C ; U — действующее значение фазного напряжения; P — активная мощность; t — текущее значение времени.

Критерий № 1 отображает исполнение закона

$$\frac{u}{i} = R = \text{const}, \quad (1)$$

где R — активное сопротивление нагрузки.

Равенство (1) соответствует закону Ома при активном сопротивлении, не зависимом от частоты и времени, то есть, иначе говоря, минимуму потерь энергии при ее передаче от генератора к нагрузке. Здесь выполняется равенство $P=S$, где S — значение полной мощности.

Таким образом, критерий № 1 предполагает и минимизацию реактивной мощности. Под минимизацией реактивной мощности понимается устранение сдвига фаз между одноименными гармониками тока и напряжения в соответствующей фазе (см. табл. 1).

$$U_n \sin(n\omega t + \varphi_n) = k_R I_n \sin(n\omega t + \varphi_n),$$

где U_n, I_n — амплитуды напряжения и тока n -й гармоники; n — порядковый номер гармоники; ω — круговая частота; φ_n — сдвиг фаз n -й гармоники; k_R — коэффициент, соответствующий активному сопротивлению.

Критерий № 1 выполняют устройства, основанные на методе неактивных токов Фризе [8] (например, FBD метод [9]).

Выполнение критерия № 2 обеспечивает равномерное потребление энергии на всем интервале времени T . Критерий № 2 соответствует p - q теории мгновенной мощности [2] и включает частичное исполнение задачи минимизации реактивной мощности. Невозможность симметрирования фазных токов (напряжений) связана с преобразованием обобщенных векторов напряжения и тока из системы координат A, B, C в систему координат α, β . Изначально используемые в p - q теории матрицы преобразований не учитывают нулевую составляющую, которая имеет место в некоторых случаях несимметрии системы напряжений (токов), и предполагают существование только составляющих прямой и обратной последовательностей [6].

Исполнение критерия № 3 в чистом виде может обеспечить, например, теория «СРС» мгновенной мощности, предложенная в [3].

Критерий № 4 накладывает ограничение на максимальное (пиковое) значение мгновенного тока в системе. Его выполнение обеспечивает защиту электротехнического оборудования системы от превышения сигналами заданных уровней.

Рассмотрим математический аппарат предложенной системы управления активным фильтром, учитывая упомянутые выше критерии

Первый режим работы

Имеем трехпроводную систему питания, у которой напряжения в точке подключения активного фильтра насыщены высшими гармониками, а сдвиг фаз между гармониками основной частоты сигналов напряжения не равен 120° :

$$\begin{aligned} u_A &= \sum_{n=1}^{\infty} U_{mAn} e^{j\varphi_{An}}; \\ u_B &= \sum_{n=1}^{\infty} U_{mBn} e^{j\varphi_{Bn}}; \end{aligned}$$

$$u_C = \sum_{n=1}^{\infty} U_{mCn} e^{j\varphi_{Cn}},$$

где u_A, u_B, u_C — соответственно напряжения фаз A, B, C ; $U_{mA n}, U_{mB n}, U_{mC n}$ — амплитуды n -х гармоник фазных напряжений фаз A, B, C ; $\varphi_{A n}, \varphi_{B n}, \varphi_{C n}$ — углы сдвига n -х гармоник сигнала напряжения фаз A, B, C .

Для выполнения критериев № 2, 3 задача коррекции сводится к определению вектора прямой последовательности напряжения трехфазной системы. Его можно найти следующим образом:

$$\vec{U}_{correct} = \frac{U_{mA1} e^{j\varphi_{A1}} + U_{mB1} e^{j\left(\varphi_{B1} + \frac{4}{3}\pi\right)} + U_{mC1} e^{j\left(\varphi_{C1} + \frac{2}{3}\pi\right)}}{3}, \quad (2)$$

где $U_{correct}$ — обобщенный вектор напряжения сети.

Вышеупомянутый вектор $U_{correct}$ в системе координат α, β будет выглядеть так:

$$\begin{cases} u_{f\alpha} = \text{Im}(\vec{U}_{correct}); \\ u_{f\beta} = \text{Re}(\vec{U}_{correct}), \end{cases} \quad (3)$$

где $u_{f\alpha}, u_{f\beta}$ — проекции обобщенного вектора напряжения сети на оси ортогональной неподвижной системы координат α, β .

Отметим, что при симметрировании фазных токов в условиях несимметричного (по вине энергогенерирующей организации) напряжения (см. критерий № 3 в табл. 1) невозможно добиться полного устранения реактивной мощности в классическом ее понимании (по определению Videanu) и равномерности потребления энергии из трехфазной системы.

Для реализации выражений (2) и (3) в дискретном виде предлагается использовать дискретное преобразование Фурье для первой гармоники. Такое решение даст возможность исключить влияние высших гармоник напряжения в питающей сети.

Таким образом, первый шаг усовершенствованной системы — определение проекций вектора прямой последовательности напряжения $U_{correct}$ на оси ортогональной неподвижной системы α, β (3). Представив вектор $U_{correct}$ в виде синусного и косинусного рядов, получим

$$\begin{aligned} \vec{U}_{correct} = & \frac{1}{3} \left(\sum_{i=0}^{N-1} u_A[k] \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - \right. \\ & \left. -j \sum_{i=0}^N u_A[k] \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=0}^{N-1} u_B[k] \cos\left(\frac{2\pi\left(i + \frac{1}{3}N\right)}{N}\right) - \right. \\ & \left. -j \sum_{i=0}^N u_B[k] \sin\left(\frac{2\pi\left(i + \frac{1}{3}N\right)}{N}\right) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=0}^{N-1} u_C[k] \cos\left(\frac{2\pi\left(i + \frac{2}{3}N\right)}{N}\right) - \right. \\ & \left. -j \sum_{i=0}^N u_C[k] \sin\left(\frac{2\pi\left(i + \frac{2}{3}N\right)}{N}\right) \right), \quad (4) \end{aligned}$$

где $u_A[k], u_B[k], u_C[k]$ — текущие оцифрованные значения напряжения соответственно фаз A, B, C ; k — порядковый номер текущего измерения в пределах одного периода напряжения питания; N — количество дискретных измерений за один период.

Заменив значения косинусов и синусов на константы $W_{Re}[i]$ и $W_{Im}[i]$ (поворотные коэффициенты), которые хранятся в таблицах памяти цифрового вычислительного устройства, формулу (4) приводим к виду

$$\begin{cases} X_{\alpha}[k] = \frac{1}{3} \left(u_A[k] W_{Im}[k] + u_B[k] W_{Im}\left[k + \frac{1}{3}N\right] + \right. \\ \left. + u_C[k] W_{Im}\left[k + \frac{2}{3}N\right] \right); \\ X_{\beta}[k] = \frac{1}{3} \left(u_A[k] W_{Re}[k] + u_B[k] W_{Re}\left[k + \frac{1}{3}N\right] + \right. \\ \left. + u_C[k] W_{Re}\left[k + \frac{2}{3}N\right] \right), \end{cases} \quad (5)$$

где $W_{Re}[k], W_{Im}[k]$ — текущие значения поворотного синусного и косинусного коэффициен-

тов; $X_\alpha[k]$, $X_\beta[k]$ — промежуточные значения для расчета обобщенного вектора напряжения.

В результате проекции обобщенного вектора напряжения таковы:

$$\begin{cases} u_{f\alpha}[k] = u_{f\alpha}[k-1] - X_\alpha[k-N] + X_\alpha[k]; \\ u_{f\beta}[k] = u_{f\beta}[k-1] - X_\beta[k-N] + X_\beta[k], \end{cases} \quad (6)$$

где $u_{f\alpha}[k]$, $u_{f\beta}[k]$ — значения проекций обобщенного вектора напряжения на оси α , β в дискретном виде; $X_\alpha[k-N]$, $X_\beta[k-N]$ — значения за период прошедший для расчета проекций обобщенного вектора напряжения.

На следующем этапе определяется активная составляющая мощности по формуле

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) dt.$$

Для получения обновленных данных на каждом шаге дискретизации значения вышеприведенного интеграла предлагается вычислять через «скользящее среднее», которое рассчитывается по рекуррентной формуле

$$p[k] = u_A[k] i_A[k] + u_B[k] i_B[k] + u_C[k] i_C[k],$$

где $p[k]$ — текущее оцифрованное значение мгновенной мощности; $i_A[k]$, $i_B[k]$, $i_C[k]$ — текущие оцифрованные значения токов фаз A , B , C .

$$P[k] = P[k-1] - \frac{p[k-N]}{N} + \frac{p[k]}{N},$$

где $P[k]$ — текущее значение активной мощности, $P[k-1]$ — значение активной мощности на прошлом шаге дискретизации; $P[k-N]$ — значение мгновенной мощности за прошлый период.

Далее значения тока, которые должен генерировать активный фильтр, вычисляются, как и в оригинальной $p-q$ теории [5]:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{f\alpha}^2 + u_{f\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{f\alpha} & -u_{f\beta} \\ u_{f\beta} & u_{f\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ — мгновенные значения проекций обобщенного вектора скорректированного тока на оси α , β .

$$\begin{bmatrix} i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{3}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{3}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix},$$

где i_{cA} , i_{cB} , i_{cC} — токи коррекции фаз A , B , C .

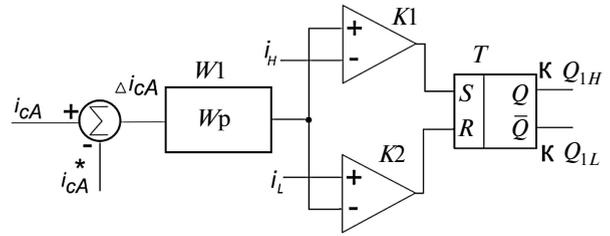


Рис. 1. Функциональная схема формирования сигналов управления ключами в фазе A

Для преобразования тока коррекции в сигнал, поступающий на ключи инвертора, удобно использовать алгоритм с гистерезисом (рис. 1).

Разность Δi_{cA} сигнала задания и фазного тока фильтра поступает на блок регулятора (блок $W1$), задача которого заключается в ограничении частоты f_Q работы силовых ключей (в данном примере $f_Q \leq 20$ кГц). Далее уровни сигналов i_H , i_L задают ширину токового коридора, формируемого компараторами $K1$, $K2$. Непосредственно импульсы для ключей Q_{1H} , Q_{1L} одного плеча инвертора генерирует RS -триггер.

По аппаратным затратам предложенный способ близок к оригинальной $p-q$ теории и требует приблизительно 29 умножений и 21 сложения за один шаг дискретизации системы управления фильтра ($p-q$ теория требует приблизительно 35 умножений и 21 сложение). Таким образом данный алгоритм может быть выполнен любым современным контроллером цифровой обработки сигнала.

Второй режим работы. В этом режиме задача определения тока коррекции фильтра сводится к вычислению амплитуды вектора тока и фазы вектора напряжения первой гармоники прямой последовательности. Токи коррекции фильтра вычисляются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - I_{f1} \cos(\varphi_{fU1} - \varphi_{fI1}) \times$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi_{fU1}) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{fU1}\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \varphi_{fU1}\right) \end{bmatrix},$$

где I_{f1} — амплитудное значение вектора тока первой гармоники прямой последовательности,

вычисленное по формулам, аналогичным (4)–(6); φ_{fU1} , φ_{fI1} — фазы векторов напряжения и тока первой гармоники прямой последовательности.

Формы сигналов и значения всех энергетических показателей в данном случае эквивалентны результатам, полученным при первом режиме работы (рис. 3). По аппаратным затратам данный метод можно считать более простым, чем предыдущий.

Ниже представлены результаты физического моделирования работы активного фильтра тока. Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

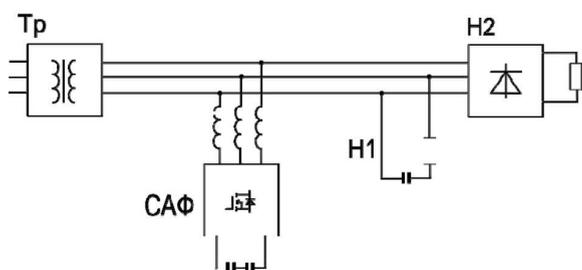


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки:

Tr — понижающий трансформатор 220/12 В; САФ — силовой активный фильтр; Н1 — активно-индуктивная нагрузка; Н2 — мостовой выпрямитель

Токи, протекающие в экспериментальной сети, отличны друг от друга по форме и действующему значению. Система напряжений сети искажена вследствие работы нелинейной на-

грузки. Параметры экспериментальной установки следующие:

Фазное напряжение сети	12 В
Индуктивность САФ	16 мГн
Емкость САФ	1100 мкФ
Частота переключения ключей	
САФ	(10–15) кГц
Частота измерения АЦП САФ	12,8 кГц
Параметры нагрузки Н1	$Z = (48 - j29)$ Ом
Величина активного сопротивления нагрузки Н2	$R = 66$ Ом

Ниже представлены осциллограммы и оцифрованный сигнал системы управления устройства, которые позволяют оценить работу САФ.

В табл. 2 приведены некоторые показатели качества электрической сети экспериментальной установки.

Как видно из табл. 2, фазный ток и напряжение после коррекции приобретают синусоидальную форму. Системы токов и напряжений также являются симметричными друг относительно друга. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности после коррекции входит в допустимые пределы (согласно ГОСТ 13109). Коэффициент искажения фазных напряжений в данном опыте значительно ухудшается. Это можно объяснить тем, что АЦП оцифровывает «иголки» в кривой напряжения, вызванные переключением силовых ключей. Пассивный фильтр на выходе САФ в данной установке отсутствует.

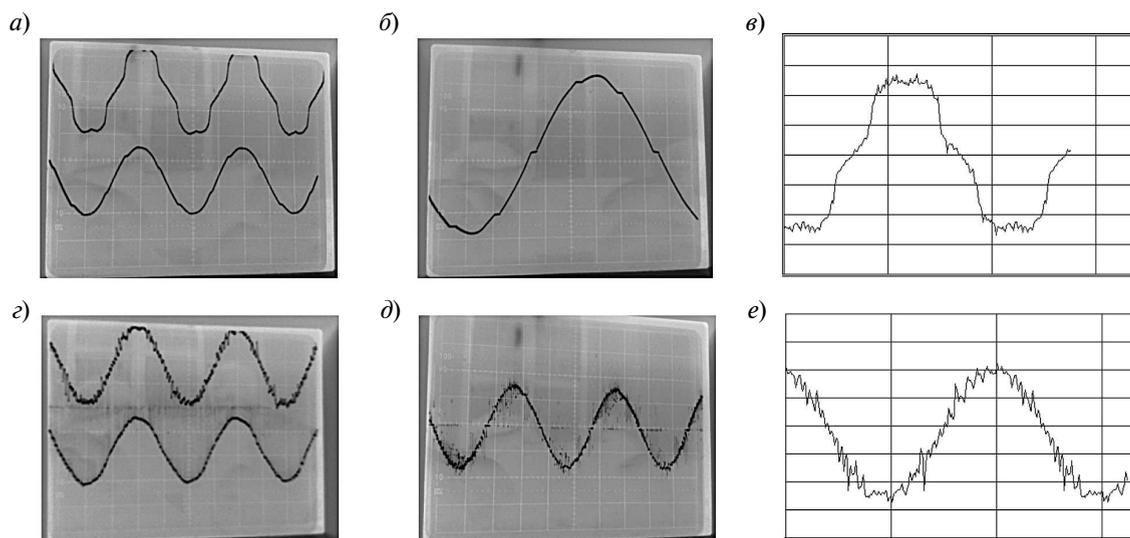


Рис. 3. Напряжение и ток одной фазы сети до коррекции (а), линейное напряжение до коррекции (б), оцифрованный ток фазы сети до коррекции (в) и соответствующие показатели после коррекции (г, д, е)

Таблица 2

Результаты физического моделирования работы активного фильтра

Параметр	Фазы сети	До коррекции	После коррекции
Угол сдвига фаз между кривыми напряжения и тока, эл. град.	А	13	8
	В	-22	10
	С	9	10
Коэффициент искажения кривых фазного напряжения, %	А	4	11
	В	2	15
	С	4	23
Коэффициент искажения кривых фазного тока, %	А	13	8
	В	14	7
	С	22	9
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %		8,8	3,2
Коэффициент несимметрии тока по обратной последовательности, %		32,7	3,4

Предложена концепция управления активными фильтрами, которая может обеспечить их работу с ориентацией на следующие критерии оптимальности:

1) равномерное потребление электрической энергии с симметрированием и балансировкой фазных токов в условиях несимметричной не-синусоидальной системы питания;

2) частичное устранение реактивной мощности (повышение коэффициента мощности).

Предложено два способа определения тока коррекции сети. Способы аналогичны с точки зрения продуктивности, однако второй способ более экономичен в плане аппаратных затрат.

Приведены примеры реализации некоторых математических выкладок в дискретном виде, пригодном для использования в цифровых микропроцессорных системах.

Предложенная концепция является синтезом частотных и временных методов выявления неактивных составляющих тока питающей сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters // Bulletin of the Polish Academy of science, Technical sciences. 2006. Vol. 54. P. 255–269.
2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits // IPEC'83— Int. Power Electronics Conf. 1983. P. 1375–1386.
3. Czarnecki L.S. On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power $p-q$ Theory // IEEE Trans. On Power Electronics. 2004. Vol. 19, No. 3. P. 828–836.
4. Czarnecki L.S. Effects of supply voltage asymmetry on IRP $p-q$ theory based switching compensator control // Accepted in IET Power Electronics. 2009.
5. Tolbert L.M., Halbetler T.G. Comparison of Time Based Nonactive Power Definitions for Active Filtering // Power Electronics Congress CIEP. October 2000. 2000. P. 73–79.
6. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
7. Тонкаль И.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. [и др.]. Баланс энергий в электрических цепях. Киев: Наукова Думка, 1992. 312 с.
8. Fryze S. Wring-, Blind-, and Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung // Elekt. Zeitschrift. 1932. Vol. 53, № 25. P. 596–599.
9. Depenbrock M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations // IEEE Transactions on Power Systems. 1993. Vol. 8. Iss. 2. P. 381–387.
10. Kale M., Ozdemir E. Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage // Electric Power Syst. 2005. Res. 77. P. 363–370.

REFERENCES

1. Akagi H. [Modern Active Filters and Traditional Passive Filters] *Bulletin of the Polish Academy of science, Technical sciences*. 2006. Vol. 54.— P. 255–269.
2. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. [Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits]. *IPEC'83— Int. Power Electronics Conf.* 1983. P. 1375–1386.
3. Czarnecki L.S. [On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory]. *IEEE Trans. On Power Electronics* 2004. Vol. 19, No. 3. P. 828–836.
4. Czarnecki L.S. [Effects of supply voltage asymmetry on IRP p-q theory based switching compensator control] *Accepted in IET Power Electronics*. 2009.
5. Tolbert L.M., Halbetler T.G. [Comparision of Time Based Nonactive Power Definitions for Active Filtering]. *Power Electronics Congress CIEP*. October 2000. 2000. P. 73–79.
6. Usol'tsev A.A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami: uchebnoe posobie*. SPb.: Izd-vo SPbGU ITMO, 2006. 94 s. (rus.)
7. Tonkal' I.E., Novosel'tsev A.V., Denisiuk S.P. [i dr.]. *Balans energii v elektricheskikh tsepyakh*. Kiev: Naukova Dumka, 1992. 312 s. (rus.)
8. Fryze S. [Wrink-, Blind-, and Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung]. *Elekt. Zeitschrift*. 1932. Vol. 53, № 25. P. 596–599.
9. Depenbrock M. [The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations]. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1993. Vol. 8, Iss. 2. P. 381–387.
10. Kale M., Ozdemir E. [Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage]. *Electric Power Syst.* 2005. Res. 77. P. 363–370.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЗЛОВ Владислав Сергеевич — аспирант кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте Криворожского национального университета; 50027, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. XXII партсъезда, 11, Украина. e-mail: vskpost@yandex.ru

СИНОЛИЦЫЙ Анатолий Филиппович — доктор технических наук профессор кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте Криворожского национального университета; 50027, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. XXII партсъезда, 11, Украина.

КОЛЬСУН Вячеслав Анатолиевич — кандидат технических наук доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте Криворожского национального университета; 50027, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. XXII партсъезда, 11, Украина. e-mail: kolsun_va@3g.ua

AUTHORS

KOZLOV Vladislav S. — SHEE «Kriviy Rih State University»; 50027, XXII parts'ezda street 11, Kriviy Rih, Dnipropetrovs'ka oblast, Ukraine. e-mail: vskpost@yandex.ru

SINOLITSYY Anatoliy F. — SHEE «Kriviy Rih State University»; 50027, XXII parts'ezda street 11, Kriviy Rih, Dnipropetrovs'ka oblast, Ukraine.

KOL'SUN Vyatsheslav A. — SHEE «Kriviy Rih State University»; 50027, XXII parts'ezda street 11, Kriviy Rih, Dnipropetrovs'ka oblast, Ukraine. e-mail: kolsun_va@3g.ua