

**ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ «ВЕКТОРНОГО» Й «ПРОПОРЦІЙНОГО» СПОСОБІВ  
КЕРУВАННЯ СИЛОВИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ**

Д.В.Тугай<sup>1\*</sup>, докт.техн.наук, Г.Г.Жемеров<sup>2\*\*</sup>, докт.техн.наук,  
Ю.П.Колонтаєвський<sup>1</sup>, канд.техн.наук, С.І.Корнелюк<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна, e-mail: [tugaydmytro@gmail.com](mailto:tugaydmytro@gmail.com),

<sup>2</sup> Національний технічний університет «ХПІ»,  
вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна,

e-mail: [zhemerov@gmail.com](mailto:zhemerov@gmail.com)

*Доведено еквівалентність «векторного», який засновано на перетвореннях координат  $p$ - $q$ - $r$  теорії миттєвої потужності, та «пропорційного», заснованого на пропорційно-векторній теорії потужності, способів синтезу систем керування паралельним силовим активним фільтром трифазної чотирипровідної системи електропостачання. Одержано нові розрахункові співвідношення задля визначення струмів компенсатора, що дають змогу врахувати нелінійність та асиметрію як фазних напруг мережі, так і фазних струмів навантаження. Показано, що перехід від структурної схеми системи керування, яку побудовано на класичних перетвореннях  $p$ - $q$ - $r$  теорії миттєвої потужності, до структурної схеми, заснованої на розрахунку коефіцієнту пропорційності між модулем просторового вектора напруги мережі з частковим послабленням складової нульової послідовності і модулем постійної складової проекції вектора струму навантаження на вісь « $r$ », дає змогу більш ніж вдвічі зменшити кількість математичних операцій, необхідних задля реалізації алгоритмів керування за тієї ж самої якості компенсації. Бібл. 5, рис. 1.*

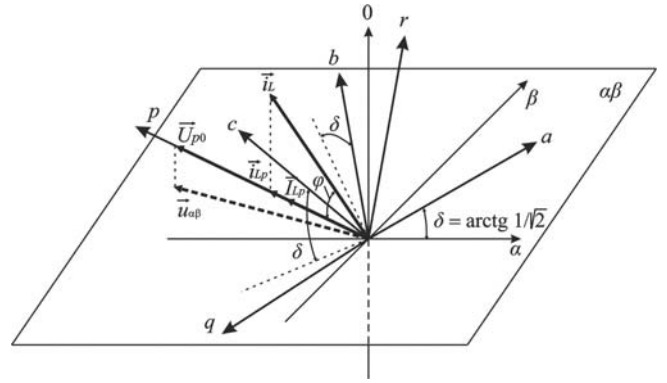
**Ключові слова:** силовий активний фільтр, система керування, алгоритм, теорія потужності

**Вступ.** Одним з найефективніших пристроїв компенсації електромагнітних спотворень у промислових мережах низької та середньої напруги є силовий активний фільтр (САФ) паралельного типу, що підключають до затискачів нелінійного несиметричного навантаження. На відміну від статичних компенсаторів застосування паралельного САФ дає змогу компенсувати миттєву реактивну потужність, асиметрію і вищі гармоніки фазних струмів навантаження в динамічних режимах роботи системи електропостачання (СЕ). На сьогодні існує багато способів синтезу системи керування САФ, які умовно можна розділити на дві групи: «векторні», засновані на сучасних теоріях миттєвої потужності [1–3], та «пропорційні» (або пропорційно-векторні) [4, 5], засновані на формуванні вектора миттєвих струмів трифазного джерела пропорційним узагальненому просторовому вектору напруги мережі. Вибір того чи іншого способу керування базується на аналізі конкретних умов, в яких буде експлуатуватися силове обладнання, і вимог щодо швидкодії реалізації цього способу. Розмаїття способів керування САФ, описаних в літературних джерелах [1–3, 5], вказує на протистояння різних концептуальних підходів, що змагаються між собою за досягнення кращої якості компенсації, однак, породжують протиріччя під час практичної реалізації.

Метою статті є доведення еквівалентності векторних і пропорційних способів керування паралельним силовим активним фільтром для полегшення їхнього практичного застосування.

**«Векторні» способи синтезу системи керування паралельним силовим активним фільтром.** До цієї групи способів керування САФ можна віднести математичні підходи, що використовують перетворення координат сучасної теорії потужності ( $p$ - $q$  теорія потужності,  $i_d$ - $i_q$  метод,  $p$ - $q$ - $r$  теорія потужності [1], а також модифікації зазначених теорій, що розповсюджують їхнє застосування на трифазні чотирипровідні СЕ [3]). На думку багатьох авторів, найбільш досконалим за якістю компенсації є спосіб керування САФ, заснований на  $p$ - $q$ - $r$  теорії потужності [1], тому зосередимо подальший розгляд саме на ньому. На рисунку зображено просторову координатну структуру, що дає змогу пояснити сутність цього способу. Миттєві значення фазних напруг мережі і струмів навантаження утворюють відповідні узагальнені вектори в нерухомій просторовій координатній системі  $abc$ , вісі якої підведені над площиною  $ab$  на кут  $\delta = 35^\circ 15'$ . Вісь  $p$  обертової координатної системи  $pqr$  співпадає за напрямом з узагальненим вектором напруги мережі, дві інші вісі  $q$  і  $r$  утворюють з нею праву трійку. Координатна система  $pqr$  обертається навколо вісі 0 проти годинникової стрілки, причому вісі  $p$  і  $r$

цієї системи координат лежать в площині, перпендикулярній до площини  $\alpha\beta$ , в якій розташована вісь  $q$ . Сутність способу полягає у виокремленні ортогональної складової узагальненого просторового вектора струму навантаження (проекції на вісь  $p - i_{Lp}$ ), колінеарної вектору напруги мережі.



Після надходження вимірювальної інформації з давачів напруги мережі ( $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$ ) й струму навантаження ( $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ ) і виокремлення основних гармонік з кривих фазних напруг  $u_{sa1}, u_{sb1}, u_{sc1}$  за допомогою смугового фільтра щодо просторових векторів напруги та струму здійснюється пряме перетворення Кларк з переходом від системи координат  $abc$  до просторової нерухомої системи  $\alpha\beta 0$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta & u_0 \end{bmatrix}^T = [K] \cdot \begin{bmatrix} u_{sa1} & u_{sb1} & u_{sc1} \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta & i_0 \end{bmatrix}^T = [K] \cdot \begin{bmatrix} i_{La} & i_{Lb} & i_{Lc} \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

де

$$[K] = \begin{bmatrix} (2/3)^{1/2} & -(6^{-1/2}) & -(6^{-1/2}) \\ 0 & 2^{-1/2} & -(2^{-1/2}) \\ 3^{-1/2} & 3^{-1/2} & 3^{-1/2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Далі щодо просторового вектора струму навантаження здійснюють перехід до просторової обертової системи координат  $pqr$ , для чого розраховують дійсне значення модуля узагальненого вектора напруги після часткового послаблення складової нульової послідовності [3]

$$U_{p0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left( u_{sa1}^2 + u_{sb1}^2 + u_{sc1}^2 - \sigma \left( \frac{u_{sa1} + u_{sb1} + u_{sc1}}{3} \right)^2 \right) dt}, \quad (4)$$

де  $\sigma = 3R_n / (R_s + 3R_n)$  – коефіцієнт оптимального послаблення складової нульової послідовності [5];  $R_s, R_n$  – активні опори фазного та нульового проводу відповідно;  $i$  модуль проекції вектора напруги на площину  $\alpha\beta$

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}, \quad (5)$$

тоді

$$\begin{bmatrix} i_{Lp} \\ i_{Lq} \\ i_{Lr} \end{bmatrix} = \frac{1}{U_{p0}} \begin{bmatrix} u_0 \sigma_0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & -\frac{U_{p0} u_\beta}{u_{\alpha\beta}} & \frac{U_{p0} u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} \\ u_{\alpha\beta} & -\frac{u_0 \sigma_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_0 \sigma_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{U_{p0}} [N] \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

За допомогою фільтра високих частот з проекції вектора струму навантаження на вісь  $p$  виокремлюють змінну складову струму  $i_{Lp}$ , до якої додають сигнал із виходу  $PI$ -регулятора  $\Delta I_c$ , що враховує неузгодженість сигналу завдання за напругою на конденсаторі в ланці постійного струму САФ  $U_{cref}$  з вимірним значенням напруги конденсатора  $U_c$ . Таким чином, отримуємо сигнали завдання за струмами САФ в  $pqr$ -координатах.

Для виконання зворотних перетворень необхідно послідовно здійснити два переходи, спочатку від системи координат  $pqr$  до  $\alpha\beta 0$ , а далі до  $abc$

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix}^T = [K]^T [N]^T \cdot \begin{bmatrix} -(i_{Lp} + \Delta I_c) & -i_{Lq} & -i_{Lr} \end{bmatrix}^T / U_{p0}. \quad (7)$$

Кінцеві завдання за струмами компенсатора отримаємо після пофазного віднімання струмів зворотного зв'язку, що вимірюються давачами струму, встановленими на вході САФ

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} i_a^* - i_{ca} & i_b^* - i_{cb} & i_c^* - i_{cc} \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

Підрахунок показує, що для реалізації алгоритмів керування паралельним САФ, заснованих на використанні  $p-q-r$  теорії потужності, необхідно в реальному часі виконати 127 математичних операцій, більшість яких виконується послідовно, що висуває більш жорсткі вимоги щодо швидкодії апаратної частини.

**Перехід від «векторних» до «пропорційних» способів синтезу системи керування паралельним силовим активним фільтром.** «Пропорційні» способи синтезу системи керування САФ засновані на пошуку коефіцієнта пропорційності між просторовими узагальненими векторами напруги мережі  $\vec{u}_s$  і струму навантаження  $\vec{i}_L$  [4, 5].

В [3] було запропоновано модифікацію  $p$ - $q$ - $r$  теорії потужності, яка полягає у виключенні математичних операцій, необхідних для розрахунку ортогональних проекцій струму навантаження за осями  $q$  та  $r$  ( $i_{Lq}$ ,  $i_{Lr}$ ) координатної системи  $pqr$ . Під час синтезу алгоритму керування можна обмежитись розрахунком проекції узагальненого вектора струму за віссю  $p$  ( $i_{Lp}$ ), спрощений пошук якої обґрунтовується положеннями крос-векторної теорії потужності [3]

$$i_{Lp} = i_L \cdot \cos \varphi, \quad (9)$$

де 
$$i_L = |\vec{i}_L| = \sqrt{i_{La}^2 + i_{Lb}^2 + i_{Lc}^2} - \quad (10)$$

модуль узагальненого просторового вектора струму навантаження;

$$\cos \varphi = \frac{u_{sa1}}{U_{p0}} \cdot \frac{i_{La}}{|\vec{i}_L|} + \frac{u_{sb1}}{U_{p0}} \cdot \frac{i_{Lb}}{|\vec{i}_L|} + \frac{u_{sc1}}{U_{p0}} \cdot \frac{i_{Lc}}{|\vec{i}_L|} - \quad (11)$$

миттєве значення косинуса кута зсуву між узагальненими векторами напруги мережі (після часткового послаблення складової нульової послідовності) і струму навантаження (рисунок).

Після підстановки (10) і (11) в (9) та інтегрування в періоді повторюваності  $T$  отримуємо співвідношення для розрахунку постійної складової проекції узагальненого просторового вектора струму навантаження за віссю  $p$

$$I_{Lp} = \frac{1}{U_{p0}T} \int_t^{t+T} (u_{sa1}i_{La} + u_{sb1}i_{Lb} + u_{sc1}i_{Lc}) dt = \frac{P_{SL}}{U_{p0}}, \quad (12)$$

де  $P_{SL}$  – середнє значення потужності мережі без урахування струмів компенсатора.

Зворотні перетворення виконують тільки для постійної складової струму навантаження за віссю  $p$   $I_{Lp}$  з урахуванням сигналу неузгодженості завдання за напругою на конденсаторі в ланці постійного струму САФ  $\Delta I_c$ , тобто  $I_{Lp}^* = I_{Lp} + \Delta I_c$

$$\begin{bmatrix} i_a^* & i_b^* & i_c^* \end{bmatrix}^T = [K]^T [N]^T \cdot \begin{bmatrix} I_{Lp}^* & 0 & 0 \end{bmatrix} / U_{p0} = [K]^T (I_{Lp}^* / U_{p0}) \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta & u_0 \end{bmatrix}^T = G \begin{bmatrix} u_{sa1} & u_{sb1} & u_{sc1} \end{bmatrix}^T, \quad (13)$$

де 
$$G = \frac{P_{SL}}{U_{p0}^2} + \frac{\Delta I_c}{U_{p0}} - \quad (14)$$

коефіцієнт пропорційності (провідність) між узагальненим просторовим вектором напруги мережі і постійною складовою проекції струму навантаження на вісь  $p$ .

Сигнали завдання за фазними струмами компенсатора визначають як різницю між вимірними струмами навантаження, розрахованими струмами і вимірними поточними струмами силового активного фільтра

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* & i_{cb}^* & i_{cc}^* \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} i_{La} - i_a^* - i_{ca} & i_{Lb} - i_b^* - i_{cb} & i_{Lc} - i_c^* - i_{cc} \end{bmatrix}^T. \quad (15)$$

Для реалізації «пропорційного» способу керування паралельним САФ необхідно виконати в реальному часі 57 математичних операцій, більшість яких виконується паралельно, що знижує вимоги щодо швидкодії апаратної частини. Співвідношення (7) і (13) дають рівнозначні результати щодо розрахунку струмів завдання паралельного САФ, тобто їхня реалізація в алгоритмах керування забезпечить аналогічну якість компенсації.

**Висновки.** Використання «пропорційного» способу синтезу систем керування паралельним САФ забезпечує такі самі високі результати щодо якісних показників електропостачання, що й використання класичної  $p$ - $q$ - $r$  теорії. Зважаючи на значно меншу кількість математичних операцій (на 55%), які потрібно виконати в реальному часі для обчислення завдань за струмами компенсатора, на практиці доцільно віддати перевагу саме «пропорційному» способу.

1. Kim H., Blaabjerg F., Bak-Jensen B., Choi I. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory. *IEEE Trans. Power Electronics*. 2002. Vol. 17. No. 5. Pp. 701-710.

DOI: <http://doi.org/10.1109/TPEL.2002.802185>

2. Bialobrzheskiy O.V., Vlasenko R.V. Interrelation of a Clarke and Fortescue transformation for the three-phase asymmetrical electrical network. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2016. № 5. С. 67 – 74.

3. Тугай Д.В., Жемеров Г.Г., Корнелюк С.І., Шкурпела О.О. Новий спосіб керування паралельним силовим активним фільтром на основі модифікованої р-q-r теорії потужності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2019. № 20 (1345). С. 173 – 182. DOI: <http://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.22>
4. Fryze S. Active, reactive and apparent power in circuits with non-sinusoidal voltage and current. *Przegląd Elektrotechniczny*. 1931. № 7-8. P. 193 – 203.
5. Поліщук С.Й., Артеменко М.Ю., Михальський В.М., Батрак Л.М., Шаповал І.А. Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі. *Техн. електродинаміка*. 2013. № 3. С. 12 – 19.

### ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ «ВЕКТОРНОГО» И «ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО» СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

Д.В.Тугай<sup>1</sup>, докт.техн.наук, Г.Г. Жемеров<sup>2</sup>, докт.техн.наук, Ю.П.Колонтаевский<sup>1</sup>, канд.техн.наук, С.И. Корнелюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,

ул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харьков, Украина, e-mail: [tugavdmytro@gmail.com](mailto:tugavdmytro@gmail.com)

<sup>2</sup> Национальный технический университет «ХПИ»,

ул. Кирпичова, 2, 61002, Харьков, Украина,

e-mail: [zhemerov@gmail.com](mailto:zhemerov@gmail.com)

*Доказана эквивалентность «векторного», основанного на преобразованиях координат р-q-r теории мгновенной мощности, и «пропорционального», основанного на пропорционально-векторной теории мощности, способов синтеза систем управления паралельным силовым активным фильтром трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения. Получены новые расчетные соотношения для определения токов компенсатора, позволяющие учесть нелинейность и асимметрию как фазных напряжений сети, так и фазных токов нагрузки. Показано, что переход от структурной схемы системы управления, построенной на классических преобразованиях р-q-r теории мгновенной мощности, к структурной схеме, основанной на расчете коэффициента пропорциональности между модулем пространственного вектора напряжения с частичным ослаблением составляющей нулевой последовательности и модулем постоянной составляющей проекции вектора тока нагрузки на ось «р», позволяет более чем в два раза уменьшить количество математических операций, необходимых для реализации алгоритмов управления при том же качестве компенсации.* Библ. 5, рис. 1.

**Ключевые слова:** силовой активный фильтр, система управления, алгоритм, теория мощности

### EQUIVALENCE OF "VECTOR" AND "PROPORTIONAL" CONTROLLING METHODS FOR ACTIVE POWER FILTER

D.V.Tugay<sup>1</sup>, G.G.Zhemerov<sup>2</sup>, Yu.P.Kolontaevsky<sup>1</sup>, S.I.Korneliuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,

Marshal Bazhanov str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [tugavdmytro@gmail.com](mailto:tugavdmytro@gmail.com)

<sup>2</sup> National Technical University Kharkov Polytechnic Institute,

Kirpichov str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: [zhemerov@gmail.com](mailto:zhemerov@gmail.com)

*The equivalence of "vector" based on transformations of p-q-r instantaneous power theory and "proportional" based on proportional-vector power theory methods of control systems synthesis for three-phase four-wire power supply system parallel power active filter is proved. New calculated ratios to determine the compensator currents, which allow to take into account the nonlinearity and asymmetry of both the phase network voltages and the phase load currents are obtained. It is shown that the transition from a structural diagram of a control system based on classical transformations of p-q-r instantaneous power theory to a structural diagram based on the coefficient of proportionality calculation between the module of the network voltage spatial vector with partial weakening of the zero sequence component and the module of the constant component projection of the load current vector on the axis "p", allows more than twice to reduce the number of mathematical operations required to implement control algorithms for the same quality compensation.* References 5, figures 1.

**Key words:** power active filter, control system, algorithm, power theory

1. Kim H., Blaabjerg F., Bak-Jensen B., Choi I. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory. *IEEE Trans. Power Electronics*. 2002. Vol. 17. No. 5. Pp. 701–710. DOI: <http://doi.org/10.1109/TPEL.2002.802185>
2. Bialobrzheskyi O.V., Vlasenko R.V. Interrelation of a Clarke and Fortescue transformation for the three-phase asymmetrical electrical network. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. No 5. Pp. 67 – 74. (Ukr)
3. Tugay D., Zhemerov G., Kotelevets S., Shkurpela A. Parallel power active filter new control technique based on modified p-q-r power theory. *Visnyk Natsionalnogo Tekhnichnoho Universytetu KhPI*. 2019. No 20 (1345). Pp. 173 – 182. DOI: <http://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.22> (Ukr)
4. Fryze S. Active, reactive and apparent power in circuits with non-sinusoidal voltage and current. *Przegląd Elektrotechniczny*. 1931. № 7-8. Pp. 193 – 203.
5. Polishchuk S.Y., Artemenko M.Yu., Mykhalskyi V.M., Batrak L.M., Shapoval I.A. Shunt active filter control strategy with partial decrease of zero-sequence voltage in three-phase four-wire system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 3. Pp. 12 – 19. (Ukr)

Надійшла 28.02.2020  
Остаточний варіант 31.03.2020