ISSN 2409-9295 (print)

УДК 621.314 DOI: http://doi:10.20998/2409-9295.2019.20.22

НОВИЙ СПОСІБ КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМ СИЛОВИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОЇ P-Q-R ТЕОРІЇ ПОТУЖНОСТІ

***Д. В. ТУГАЙ*[1*], *Г. Г. ЖЕМЕРОВ*[2], *С. І. КОРНЕЛЮК*[1], *О. О. ШКУРПЕЛА*[1]**

[1] *кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна*
[2] *кафедра промислової та біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, Україна*
[*] *e-mail: tugaydmytro@gmail.com*

АНОТАЦІЯ. *В роботі розкрито основні переваги використання p-q-r теорії миттєвої потужності для побудови швидкодіючих систем керування силовими активними фільтрами, що дозволяють реалізувати як квазісталі так й динамічні режими роботи електроенергетичних об'єктів з активними фільтрокомпенсуючими пристроями, що живляться від трифазної чотирипровідної промислової мережі. В той самий час показано, що використання перетворень p-q-r теорії миттєвої потужності пов'язано зі значною кількістю математичних обчислень, що виконуються мікроконтролером в реальному часі і потребують значної швидкодії апаратної частини системи керування. Запропоновано новий спосіб керування паралельним силовим активним фільтром, що поєднує універсальну p-q-r теорію потужності з крос-векторною теорією. Запропонований спосіб доцільно використовувати в системах керування силовими активними фільтрами, що працюють в трифазних чотирипровідних системах електропостачання з електричним навантаженням любого типу, а також у гібридних системах, коли силова частина перетворювача може використовуватись не тільки в якості фільтрокомпенсуючого пристрою, але й у якості інвертора напруги. Показано, що використання запропонованого способу дозволяє суттєво зменшити кількість математичних обчислювань, які виконуються мікроконтролером системи керування для реалізації сигналів управління силовими транзисторними модулями. Для перевірки працездатності способу синтезовано Matlab-модель реального об'єкту електропостачання з паралельним силовим активним фільтром. Співставлення результатів моделювання для трьох алгоритмів керування силовим активним фільтром дозволило оцінити якість роботи останнього алгоритму, що запропонований у роботі, і підтвердити не тільки його працездатність але й еквівалентність отриманих енергетичних характеристик характеристикам, які були отримані у разі використання універсальної p-q-r теорії миттєвої потужності.*
Ключеві слова: *p-q-r теорія потужності; крос-векторна теорія потужності; силовий активний фільтр; система керування; трифазна чотирипровідна система; спосіб керування; система електропостачання*

PARALLEL POWER ACTIVE FILTER NEW CONTROL TECHNIQUE BASED ON MODIFIED P-Q-R POWER THEORY

***D. TUGAY*[1], *G. ZHEMEROV*[2], *S. KORNELIUK*[1], *A. SHKURPELA*[1]**

[1] *Department of Alternative Power Engineering and Electrical Engineering, O.M. Beketov NUUE, Kharkiv, Ukraine*
[2] *Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine*

ABSTRACT. *The paper presents the main advantages of using the instantaneous p-q-r power theory to construct high-speed control system for power active filters. It allows to realize both quasi-static and dynamic modes of operation of electric energy consumers with active filter-compensating devices powered by a three-phase four-wire utility grid. At the same time, it has been shown that the use of p-q-r coordinate's transformations is due to the large number of mathematical calculations performed by the microcontroller in real time and require a high degree of performance of the hardware part of the control system. A new technique for controlling parallel power active filter combining the universal p-q-r power theory with cross-vector theory is proposed. The proposed technique should be used in control systems of power active filters operating for three-phase four-wire electrical systems with electrical load of any type, as well as in hybrid systems, when the power part of the converter can be used not only as a filter-compensating device, but as a voltage inverter. It is shown that the use of the proposed technique can significantly reduce the number of mathematical calculations performed by the control system microcontroller for the implementation of control signals by power transistor modules. The Matlab model of a real power supply system with a parallel power active filter to test the efficiency of the algorithm is synthesized. Comparing the simulation results for the three power active filter control technique allowed to evaluate the quality of the proposed algorithm and to confirm not only its efficiency but also the equivalence of the received power characteristics to the characteristics that were obtained when using the universal p-q-r instantaneous power theory.*
Keywords*: p-q-r power theory; cross-vector power theory; power active filter; control system; three-phase four-wire system, control technique; power supply system*

Вступ

Питання підвищення електромагнітної сумісності в трифазних системах електропостачання (СЕ) з нелінійним асиметричним навантаженням залишається актуальним впродовж багатьох років. Його вирішення дозволило створити багато підходів до компенсації електромагнітних спотворень, що виникають в СЕ внаслідок дії потужних споживачів електроенергії з нелінійними характеристиками.

© Д. В. Тугай, Г. Г. Жемеров, С. В. Котелевець, О. О. Шкурпела, 2019

Після створення у 80-х роках XX століття групою японських дослідників теорії миттєвої потужності [1] виник значний інтерес до застосування силових активних фільтрів (САФ), що на відміну від пасивних фільтрокомпенскючих пристроїв дозволили забезпечити більш високу якість електричної енергії в точці приєднання потужного споживача в динамічних режимах його роботи.

Послідуючий розвиток теорії миттєвої потужності був пов'язаний зі створенням самостійних теорій і способів керування активними фільтрокомпенсуючими пристроями на їх основі. Більшість створених теорій потужності об'єднує використання перетворень координат, завдяки яким з поточного сигналу у формі просторового вектору виділялися ортогональні складові, що несли в собі інформацію про якість електромагнітних процесів в трифазній СЕ. Із таких теорій потужності можна виділити: *p-q* терію, i_d-i_q метод, удосконалену *p-q* теорію, крос-векторну теорію, *p-q-r* теорію [2-11]. Остання теорія [2], на погляд багатьох авторів, є найбільш універсальною, з огляду на те, що може бути використана для створення алгоритмів керування САФ не тільки для трифазних трипровідних, але й для трифазних чотирипровідних СЕ.

Недоліком *p-q-r* теорії миттєвої потужності є значна кількість математичних обчислювань, що обумовлена каскадним перетворенням систем координат, які повинна виконувати процесорна частина системи керування силовим активним фільтром в реальному часі [8]. Тому, зазвичай, в реальних системах керування, використання знайшли інші більш швидкодіючі способи обчислення струмів завдання для напівпровідникових компенсаторів. Інший недолік *p-q-r* теорії миттєвої потужності, притомний також всім іншим теоріям потужності, є обмеженість їх застосування для СЕ з трифазними джерелом живлення, напруги якого мають несинусоїдальну форму або є асиметричними [5].

Зважаючи на вищезазначене, на сьогодні залишається актуальною проблема пришвидшення ефективності алгоритмів керування силовими активними фільтрами на основі *p-q-r* теорії миттєвої потужності, за рахунок зменшення математичних обчислювань, і їх розповсюдження на більш загальний випадок існуючих СЕ, в яких джерело живлення відрізняється від ідеального.

Мета роботи

Створення нового способу керування силовим активним фільтром для трифазних чотирипровідних систем електропостачання на базі модифікованої *p-q-r* теорії миттєвої потужності з меншою кількістю математичних обчислювань, який здатний забезпечити високу якість компенсації.

Спосіб керування САФ на основі *p-q-r* теорії миттєвої потужності

P-q-r теорія потужності була запропонована в роботі [2]. Її перевагою над вже існуючими теоріями потужності стала можливість практично повної компенсації протікання струму у нульовому проводі трифазної чотирипровідної системи. Відомі публікації освітлюють два принципово схожих підходи до створення алгоритмів керування САФ на основі *p-q-r* теорії миттєвої потужності. Вони відрізняються обчисленням струмів [3, 14, 15] або миттєвих потужностей [7, 12, 13] за осями обертової просторової координатної системи *pqr*. Використання цих обчислень під час синтезу систем керування САФ не змінює принципів побудови алгоритму. Розглянемо алгоритм керування на основі *p-q-r* теорії миттєвої потужності, де використано перший з двох способів.

На рисунку 1 представлено структурну схему системи керування САФ на основі *p-q-r* теорії миттєвої потужності. Для реалізації системи потрібно отримувати інформацію про миттєві фазні величини, що формують узагальнені просторові вектори:

– просторовий вектор напруги мережі живлення

$$\vec{u}_S = \left[\vec{i}\,u_{sa} \quad \vec{j}u_{sb} \quad \vec{k}u_{sc}\right]^T, \qquad (1)$$

де u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} – миттєві значення фазних напруг джерела живлення (трансформатора); $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орти, що спрямовані за осями a,b,c просторової системи координат;

– просторовий вектор струму навантаження

$$\vec{i}_L = \left[\vec{i}\,i_{La} \quad \vec{j}i_{Lb} \quad \vec{k}i_{Lc}\right]^T, \qquad (2)$$

де i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} – миттєві значення фазних струмів навантаження;

– просторовий вектор струму компенсатора

$$\vec{i}_C = \left[\vec{i}\,i_{ca} \quad \vec{j}i_{cb} \quad \vec{k}i_{cc}\right]^T, \qquad (3)$$

де i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} – миттєві значення фазних струмів САФ.

Після надходження вимірювальної інформації з датчиків напруги і струму для просторових векторів напруги і струму навантаження здійснюється перехід від системи координат *abc* до просторової нерухомої системи $\alpha\beta 0$, за рахунок чого відбувається переорієнтація векторів у просторі:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}, \qquad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}. \qquad (5)$$

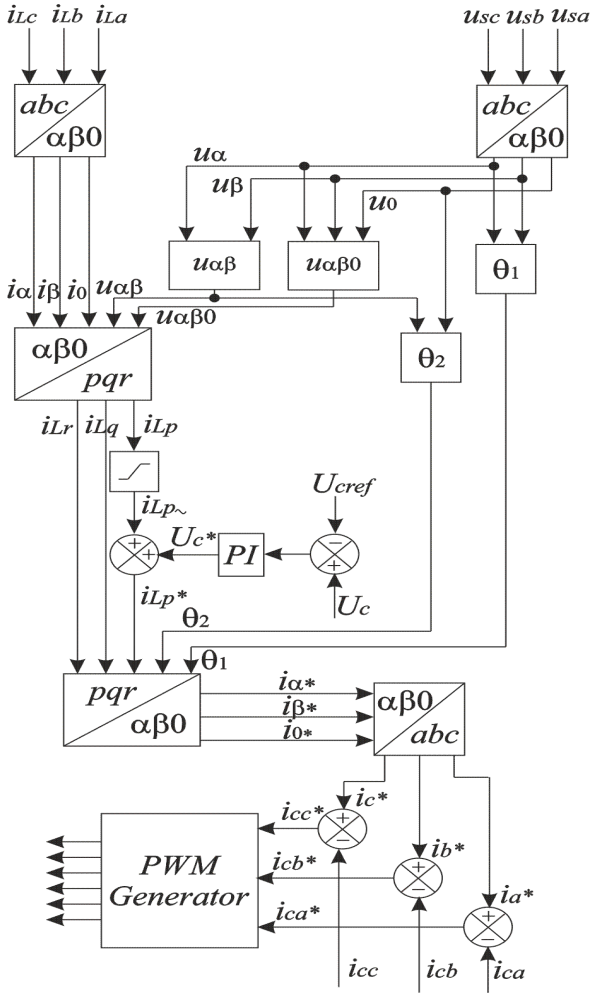

Рис. 1 – Структурна схема системи керування САФ на основі p-q-r теорії миттєвої потужності

Далі для просторового вектора струму навантаження здійснюється перехід до просторової обертової системи координат *pqr*, яка обертається навколо осі 0 з кутовою швидкістю мережі ω_0, для чого спочатку розраховуються модуль вектора напруги мережі живлення

$$u_s = |\vec{u}_s| = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2}\ , \qquad (6)$$

і модуль проекції вектора напруги на площину $\alpha\beta$:

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}\ , \qquad (7)$$

тоді

$$\begin{bmatrix} i_{Lp} \\ i_{Lq} \\ i_{Lr} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & -\dfrac{u_{\alpha\beta 0} u_\beta}{u_{\alpha\beta}} & \dfrac{u_{\alpha\beta 0} u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} \\ u_{\alpha\beta} & -\dfrac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} & -\dfrac{u_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \qquad (8)$$

За допомогою фільтра високих частот з проекції вектора струму навантаження на вісь *p* виділяється змінна складова струму $i_{p\sim}$, до якої додається сигнал з виходу *PI*-регулятора, що розраховує неузгодженість сигналу завдання за напругою на конденсаторі в ланці постійного струму САФ U_{cref} з виміряним значенням напруги конденсатора U_c. Таким чином отримаємо сигнали завдання за струмами САФ в *pqr*-координатах i_p^*, i_q^*, i_r^*.

Для виконання зворотних перетворень необхідно розрахувати значення кутів θ_1 і θ_2

$$\theta_1 = arctg\,\frac{u_\beta}{u_\alpha}\ , \qquad (9)$$

$$\theta_2 = arctg\,\frac{u_0}{u_{\alpha\beta}}\ . \qquad (10)$$

Зворотне перетворення також виконується у два етапи. Спочатку для розрахованих значень струму компенсатора здійснюється перехід від *pqr* до *αβ0* координат

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \\ i_0^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 & -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \\ \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 & \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p^* \\ i_q^* \\ i_r^* \end{bmatrix}, \qquad (11)$$

а потім виконується зворотне перетворення Clarke:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\dfrac{1}{\sqrt{3}} \\ -\dfrac{1}{2} & \dfrac{\sqrt{3}}{2} & \dfrac{1}{\sqrt{2}} \\ -\dfrac{1}{2} & -\dfrac{\sqrt{3}}{2} & \dfrac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \\ i_0^* \end{bmatrix}. \qquad (12)$$

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

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a^* - i_{ca} \\ i_b^* - i_{cb} \\ i_c^* - i_{cc} \end{bmatrix}. \qquad (13)$$

Детальний підрахунок показує, що для реалізації способу керування САФ на основі *p-q-r* теорії миттєвої потужності необхідно виконати 113 математичних операцій.

Спосіб керування САФ на основі модифікованої *p-q-r* теорії миттєвої потужності

На рисунку 2 наведено структурну схему системи керування, що реалізована на основі модифікованої *p-q-r* теорії миттєвої потужності. Модифікація *p-q-r* теорії, що пропонується в цій роботі в перше, заснована на усуненні недоліку класичного способу, коли розраховані в просторових обертових координатах проекції вектору струму навантаження за осями *q* й *r* (i_{Lq}, i_{Lr}) без зміни пропускаються в блоки зворотних перетворень, на що використовуються зайві математичні операції.

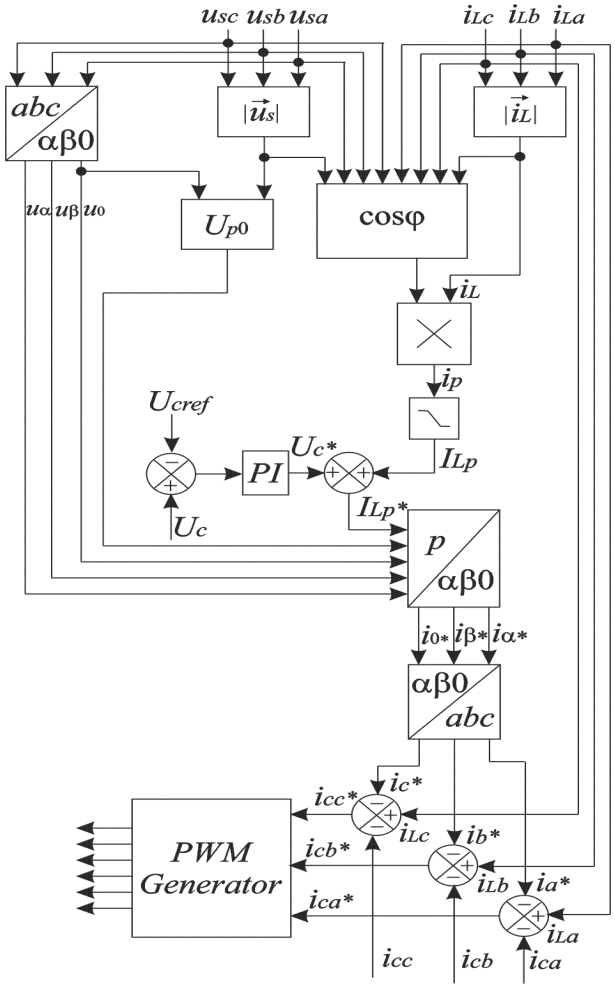

Рис. 2 – Структурна схема системи керування САФ на основі модифікованої p-q-r теорії миттєвої потужності

Для усунення цього недоліку на перших етапах реалізації способу пропонується скористатися положеннями крос-векторної теорії потужності. Спочатку за виміряними значеннями миттєвих напруг мережі живлення і струмів навантаження розраховуються модулі відповідних просторових векторів:

$$u_s = |\vec{u}_s| = \sqrt{u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2}\ , \qquad (14)$$

$$i_L = |\vec{i}_L| = \sqrt{i_{La}^2 + i_{Lb}^2 + i_{Lc}^2}\ , \qquad (15)$$

а також знаходиться миттєве значення косинусу кута зсуву між цими векторами

$$\cos\varphi = \frac{u_{sa}}{|\vec{u}_s|}\cdot\frac{i_{La}}{|\vec{i}_L|} + \frac{u_{sb}}{|\vec{u}_s|}\cdot\frac{i_{Lb}}{|\vec{i}_L|} + \frac{u_{sc}}{|\vec{u}_s|}\cdot\frac{i_{Lc}}{|\vec{i}_L|}\ . \qquad (16)$$

Пряме перетворення Clarke з *abc* до *αβ*0 координат виконується тільки для вектора напруги відповідно до співвідношення (4).

Якщо трифазна система напруг джерела живлення є несиметричною додатково розраховується дійсне значення модуля узагальненого вектора напруги після часткового послаблення складової нульової послідовності [16]

$$U_{p0} = \sqrt{\frac{1}{T}\cdot\int_t^{t+T}\left(u_s^2 - \sigma_0\cdot u_0^2\right)dt}\ , \qquad (17)$$

де

$$\sigma_0 = \frac{3\cdot R_n}{R_s + 3\cdot R_n}\ - \qquad (18)$$

коефіцієнт оптимального послаблення складової нульової послідовності [17]; R_s, R_n – активні опори фазного і нульового проводу відповідно. За симетричної системи напруг $U_{p0} = u_s$.

Множення модуля вектора струму навантаження на значення косинусу кута зсуву дозволяє розраховувати значення модуля вектора струму навантаження вздовж осі *p* просторової обертової декартової системи *pqr*

$$i_{Lp} = i_L\cdot\cos\varphi\ . \qquad (19)$$

При синусоїдних симетричних напругах мережі живлення напрям вектора $\vec{i}_{Lp}$ співпадає з напрямом вектора $\vec{u}_s$. Після усереднення траєкторії струму i_{Lp} на періоді повторюваності *T* отримаємо середнє значення струму навантаження за віссю *p*

$$I_{Lp} = \frac{1}{T}\int_t^{t+T} i_{Lp}\ , \qquad (20)$$

що відповідає незмінному потоку енергії від джерела живлення до навантаження.

Середнє значення струму навантаження представляється в αβ0 координатах

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \\ i_0^* \end{bmatrix} = \frac{I_{Lp}}{U_{p0}}\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix}, \qquad (21)$$

після чого виконується зворотне перетворення Clarke (12).

Після пофазного віднімання струмів завдання від струмів навантаження з урахуванням зворотного зв'язку за струмами САФ, отримаємо сигнали завдання за струмами компенсатора

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{La} - i_a^* - i_{ca} \\ i_{Lb} - i_b^* - i_{cb} \\ i_{Lc} - i_c^* - i_{cc} \end{bmatrix}. \qquad (22)$$

Для реалізації способу керування САФ на основі модифікованої *p-q-r* теорії миттєвої потужності необхідно виконати 63 математичних операцій у разі симетричних напруг джерела живлення і 75 математичних операції у разі несеметричних напруг. Таким чином, застосування модифікованої *p-q-r* теорії миттєвої потужності дозволяє зменшити кількість обчислювань на 50 і 38 математичні операції відповідно.

Matlab-модель для перевірки отриманих результатів

Для перевірки коректності запропонованого алгоритму керування способу Matlab-модель СЕ з паралельним САФ, яку зображено на рис. 3. Модель складається з наступних блоків: мережі живлення Utility Grid, чотирипровідної лінії електропередачі Line, лінійного (Linear Load) й нелінійного (Nonlinear Load) навантаження та паралельного САФ. САФ виконаний на основі трифазного інвертора напруги на IGBT модулях зі зворотними діодами (блок PAF), вхідного мережевого фільтра Lf1-Cf-Lf2 і ланки постійного струму, яка утворюється двома послідовно включеними конденсаторами Cd1, Cd2 і реактором Ld, що підключається між їх загальною точкою і нейтральним провідником. В таблиці 1 наведено параметри елементів силової схеми СЕ з САФ.

Таблиця 1 – Параметри елементів СЕ з САФ

Параметр	Позн.	Значення
Мережа живлення		
Діюче значення лінійної напруги	$U_л$	380 V
Частота	f	50 Hz
Індуктивність	L_s	28μH
Активний опір	R_s	0.36 mΩ
Лінія		
Активний опір	R_{Line}	0.015 Ω
Індуктивність	L_{Line}	1 μH
Лінійне навантаження		
Активна потужність фази A	P_{La}	50 kW
Активна потужність фази B	P_{Lb}	75 kW
Активна потужність фази C	P_{Lb}	30 kW
Реактивна потужність фази A	Q_{La}	30 kVAr
Реактивна потужність фази B	Q_{Lb}	5 kVAr
Реактивна потужність фази C	Q_{Lc}	15 kVAr
Нелінійне навантаження		
Номінальна потужність	P_{LH}	300 kW
Індуктивність вхідного реактора	L	75 μH
Силовий активний фільтр		
Напруга в ланці постійного струму	U_c	770 V
Ємність конденсатора в ланці постійного струму	C_{d1} C_{d2}	25 mF 25 mF
Індуктивність вихідного реактора	L_d	250 μH
Індуктивність фази вхідного фільтра	L_{f1} L_{f2}	21 μH 54 μH
Ємність фази вхідного фільтра	C_f	54 μF
Активний опір снабера	R_{sn}	24.6 Ω
Ємність снабера	C_{sn}	0.1 μF
Опір у відкритому стані	R_{on}	1.5 m Ω
Пряме падіння напруги транзистора	U_f	1 V
Пряме падіння напруги діода	U_{fd}	1 V

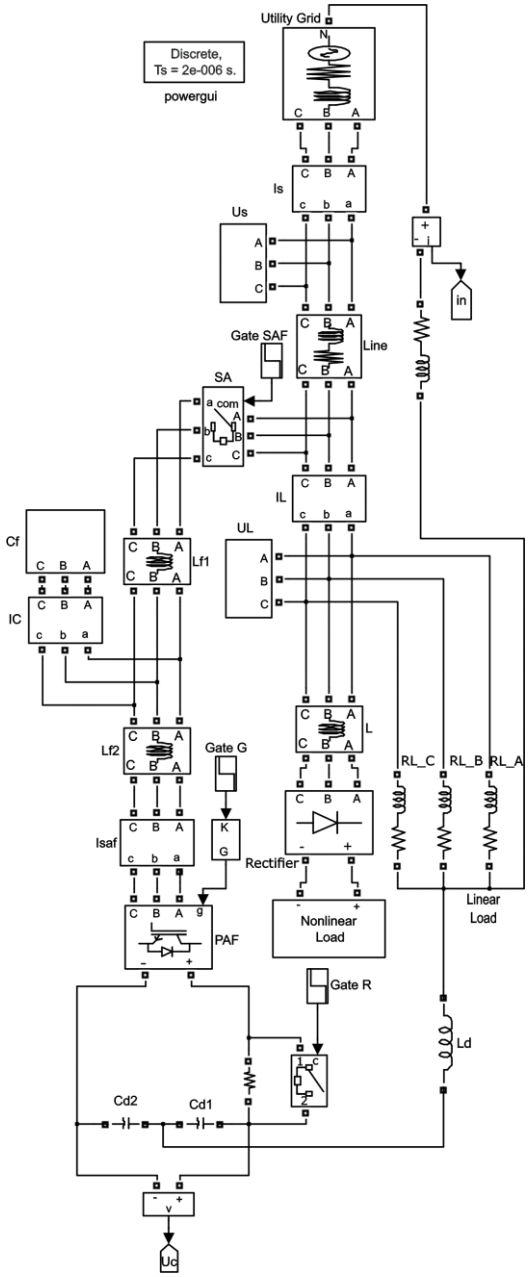

Рис. 3 – Matlab-модель СЕ з паралельним САФ

Вимірювання напруг і струмів для обчислення завдань за струмами компенсатора і аналізу енергетичних процесів в СЕ здійснюється відповідними датчиками: US, UL, IS, IL, Isaf, Uc, in.

Перевірка запропонованого способу керування здійснювалась співставленням кількісних і якісних енергетичних характеристик СЕ для трьох систем керування, що були синтезовані на основі кросвекторної теорії, *p-q-r* теорії і модифікованої *p-q-r* теорії миттєвої потужності. Результати порівняння наведено в таблиці 2. За допомогою обчислювальних можливостей моделі були виміряні:

– діючі значення фазних напруг мережі живлення U_{sa}, U_{sb}, U_{sc};

– діючі значення основної гармоніки мережевих струмів I_{sa1}, I_{sb1}, I_{sc1};

– діючі значення основної гармоніки струмів навантаження I_{La1}, I_{Lb1}, I_{Lc1};

– діючі значення струмів САФ I_{ca}, I_{cb}, I_{cc};

– діюче значення струму в нульовому проводі I_n;

– коефіцієнти нелінійних спотворень фазних напруги мережі THD_{Ua}, THD_{Ub}, THD_{Uc};

– коефіцієнти нелінійних спотворень мережевих струмів THD_{Ia}, THD_{Ib}, THD_{Ic};

– коефіцієнти нелінійних спотворень струмів навантаження THD_{ILa}, THD_{ILb}, THD_{ILc};

– середнє значення напруги на конденсаторній батареї в ланці постійного струму U_c;

– середнє значення активної потужності мережі живлення P_s;

– середнє значення реактивної потужності мережі живлення Q_s;

– середнє значення коефіцієнту зсуву мережі живлення $\cos\varphi_s$;

– середнє значення ККД η.

З таблиці 2 видно, що у разі симетричного джерела використання модифікованої *p-q-r* теорії миттєвої потужності забезпечує такі самі результати щодо якісних показників електропостачання, як і використання класичної *p-q-r* теорії. Зважаючи на значно меншу кількість математичних операцій, які потрібно виконати під час обчислення завдань за струмами компенсатора, необхідно віддати перевагу саме модифікованій теорії. Використання крос-векторної теорії забезпечує трохи гірші значення коефіцієнтів нелінійних спотворень мережевих струмів (збільшення THD > 1% в порівнянні з *p-q-r* теорією), що вказує на зниження якості компенсації синтезованих на її основі алгоритмів для трифазних чотирипровідних СЕ.

В таблиці 3 представлені результати обчислювань для трьох зазначених алгоритмів керування, виконаних за допомогою Matlab-моделі СЕ з САФ, у разі несиметрії мережі живлення. Дані таблиці 3 вказують на підвищення (в порівнянні з класичною *p-q-r* теорією) якості компенсації мережевих струмів у разі застосування в алгоритмі керування на основі модифікованої *p-q-r* теорії миттєвої потужності часткового послаблення нульової послідовності напруги (17).

Використання крос-векторної теорії потужності в разі несиметрії напруги живлення трифазної чотирипровідної СЕ призводить до ще більшого зниження якості компенсації і вже є неприйнятним з позиції дотримання вимог стандартів щодо якості електроенергії (*THD* перевищує 5%).

На рисунку 4 наведено осцилограми фазних напруг і струмів мережі, що демонструють роботу паралельного САФ до і після його підключення до СЕ з використанням алгоритму на основі модифікованої *p-q-r* теорії миттєвої потужності. Перед підключенням САФ конденсаторна батарея у ланці постійного струму САФ попередньо заряджається через діоди IGBT модулів до амплітудного значення напруги мережі живлення. Після чого (t = 0.35 s на рис. 4) здійснюється подача імпульсів керування на силові ключі компенсатора. З рис. 4 видно, що перехідний процес триває не більше одного періоду напруги мережі живлення. Форма мережевих струмів після підключення САФ майже синусоїдальна, а криві струмів синфазні з відповідними напругами мережі, що вказує на близький до одиниці коефіцієнт потужності.

Таблиця 2 – Співставлення результатів моделювання у разі симетричного джерела живлення

Вимірювана величина	Значення вимірюваної величина			
	Без САФ	Крос-векторна теорія	*p-q-r* теорія	Модиф. *p-q-r* теорія
U_{sa}, V	217.8	219.5	219.4	219.4
U_{sb}, V	217.5	219.3	219.4	219.4
U_{sc}, V	217.3	219.4	219.4	219.4
I_{sa1}, A	703	689	683.3	683.8
I_{sb1}, A	778	684.4	678.3	678.9
I_{sc1}, A	601	666.5	678.5	678.4
I_{La1}, A	703	718	716.7	716.6
I_{Lb1}, A	778	789.1	778.7	789.6
I_{Lc1}, A	601	611.7	612.6	612.7
I_{ca}, A	–	368.7	359.8	359.4
I_{cb}, A	–	291.6	298	298.1
I_{cc}, A	–	319.4	323.1	322.7
I_n, A	246.8	24.94	25.46	26.06
THD_{Ua}, %	3.46	3.25	3.27	3.32
THD_{Ub}, %	3.39	3.09	3.06	3.15
THD_{Uc}, %	3.52	3.15	3.22	3.19
THD_{Ia}, %	21.42	4.14	3.7	3.82
THD_{Ib}, %	18.61	3.79	3.46	3.48
THD_{Ic}, %	24.94	4.78	3.9	3.9
THD_{ILa}, %	21.42	29	29	28.94
THD_{ILb}, %	18.61	26.45	26.3	26.4
THD_{ILc}, %	24.94	34	33.9	33.85
U_c, V	–	770	767.8	770.1
P_s, kW	434.3	447	447.1	447.3
Q_s, kVAr	141.7	23.8	24	23.7
$\cos\varphi_s$	0.958	0.995	0.995	0.9951
η	0.948	0.9534	0.9534	0.9534

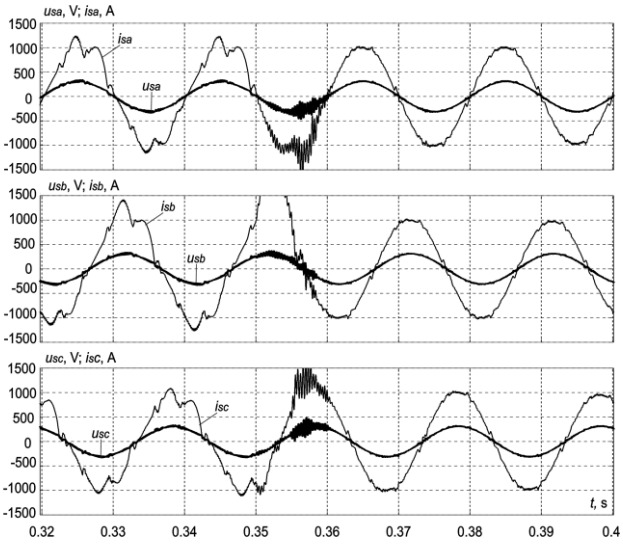

Рис. 4 – Осцилограми фазних напруг і струмів мережі

Таблиця 3 – Співставлення результатів моделювання у разі несиметричного джерела живлення

Вимірювана величина	Значення вимірюваної величина			
	Без САФ	Крос-векторна теорія	*p-q-r* теорія	Модиф. *p-q-r* теорія
U_{sa}, V	218.1	220.3	220	220.1
U_{sb}, V	240.6	241.7	242.1	242
U_{sc}, V	195.9	198.3	198.2	198.1
I_{sa1}, A	657.7	729.2	700.9	697.3
I_{sb1}, A	856.3	754.9	745.7	759.7
I_{sc1}, A	595.4	559.9	639.5	625.9
I_{La1}, A	657.7	682.2	673.8	675.2
I_{Lb1}, A	856.3	856.6	864.7	865.2
I_{Lc1}, A	595.4	605.2	607.4	605.3
I_{ca}, A	–	393.5	355.7	360.4
I_{cb}, A	–	254.4	301.9	293.9
I_{cc}, A	–	346.8	343.9	331.2
I_n, A	275.5	104.6	111.6	111.3
THD_{Ua}, %	3.67	4.41	4.46	4.3
THD_{Ub}, %	3.15	3.66	3.66	3.57
THD_{Uc}, %	3.71	4.54	4.44	4.38
THD_{Ia}, %	24.59	7.09	4.39	3.93
THD_{Ib}, %	18.27	5	4.1	2.97
THD_{Ic}, %	25.55	11.07	4.27	4.01
THD_{ILa}, %	24.59	35.14	35.91	35.84
THD_{ILb}, %	18.27	23.25	24.91	24.9
THD_{ILc}, %	25.55	32.65	32.14	32.11
U_c, V	–	770	668.5	770
P, kW	447.9	460.1	460.6	460.6
Q, kVAr	134.1	27.2	26.6	26.6
$\cos\varphi_s$	0.9636	0.9949	0.9952	0.9952
η	0.9441	0.9519	0.9521	0.9522

Висновки

Запропоновано модифіковану *p-q-r* теорію миттєвої потужності, а також новий спосіб (і алгоритм на його основі) побудови системи керування паралельним силовим активним фільтром, заснований на використанні цієї теорії. Алгоритм враховує недоліки класичної *p-q-r* теорії миттєвої потужності і дозволяє на 50 математичних операцій зменшити кількість обчислювань під час розрахунку завдань за струмами компенсатора. Крім того, введення в послідовність розрахунків облік часткового послаблення складової нульової послідовності напруги мережі дозволило поліпшити якість компенсації в режимах роботи СЕ з несиметричним джерелом живлення. Коефіцієнт нелінійних спотворень мережевого струму зменшується на 0.5-1%.

Перевірка коректності запропонованого способу керування на створеній Matlab-моделі підтвердила його працездатність і швидкодію. Час перехідного процесу після підключення САФ не перевищує періоду напруги мережі живлення.

Список літератури

1. **Akagi, H.** Generalized theory of the instantaneous reactive power in three phase circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // Int. Power Electronics Conf. Tokyo. Japan. – 1983. – pp. 1375–1386.
2. **Kim, H. S.** The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames / H. S. Kim, H. Akagi // Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No.99TH8475). – 1999. – pp. 422–427. – doi: 10.1109/PEDS.1999.794600.
3. **Kim, H.** Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory / H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, I. Choi // IEEE Trans.Power Elektronics. – 2002. – vol.17. – no. 5. – pp. 701-710. – doi: 10.1109/TPEL.2002.802185.
4. **Czarnecki, L. S.** On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. On Power Electronics. – 2004. – vol. 19. – no. 3. – pp. 828–836. – doi: 10.1109/TPEL.2004.826500.
5. **Depenbrock, M. A.** Concise Assessment of original and Modified Instantaneous Power Theory Applied to FourWire Systems / M. A. Depenbrock // Proceedings of the References. Power Conversion Conference. Osaka. Japan. – 2002. – vol.1. – pp. 60–67. – doi: 10.1109/PCC.2002.998513.
6. **Soares, V.** An instantaneous active and reactive current component method for active filters / V. Soares, P. Verdelho, G. D. Marques // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – vo l. 15. – no. 4. – pp. 660-669. – doi: 10.1109/63.849036.
7. **Aredes, M.** Comparisons Between the p-q and p-q-r Theories in Three-Phase Four-Wire Systems / M. Aredes, H. Akagi, E. H. Watanabe, E. H. Salgado, L. F. Encarnacao // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – vol. 24. – no. 4. – pp. 924-933. – doi: 10.1109/TPEL.2008.2008187.
8. **Rachmildha, T. D.** Comparison of Direct Power Control with Hybrid Approach on 3-Phase 4-Wire Active Power Filter between p-q-0 and p-q-r Power Theory / T. D. Rachmildha, A. Llor, M. Fadel, P. A. Dahono, Y. Haroen // ISIE 2008, Cambridge. – 2270-2275 – doi: 10.1109/ISIE.2008.4677282.
9. **Depenbrock, M.** A theoretical investigation of original and modified instantaneous power theory applied to four-wire systems / M. Depenbrock, V. Staudt, H. Wrede // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2003. – vol. 39. – no. 4. – pp. 1160-1167. – doi: 10.1109/TIA.2003.814553.
10. **Salmern, P.** Practical application of the instantaneous power theory in the compensation of four-wire three-phase systems / P. Salmern, J. C. Montao, J. R. Vzquez, J. Prieto, A. Prez // Proc. IEEE 28th Annu. Conf. IECON. – 2002. – vol. 1. – pp. 650-655. – doi: 10.1109/IECON.2002.1187584.
11. **Haley, P.** Limitations of cross vector generalized p-q theory / P. Haley // Proc. Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC). 15-18 June. – 2015. – pp. 1-5. – doi: 10.1109/ISNCC.2015.7174707.

12. **Abu, H. A. S.** Comparative study of different PWM control scheme for three-phase three-wire shunt active power filter / H. A. S. Abu, M. H. N. Talib, Z. Ibrahim // In 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia. – 2012. – pp. 119-123. – doi: 10.1109/PEOCO.2012.6230846.
13. **Zhao, C.** A New Method for Voltage Quality Evaluation Based on p-q-r Theory / C. Zhao, X. Zhao// in Proc. 2004 International Conference Power System Technology. – 2004. – pp. 21-24. – doi: 10.1109/ICPST.2004.1460175.
14. **Hyosung, K.** Novel topology of a line interactive UPS using PQR instantaneous power theory / K. Hyosung, Ji. Jun-Keun, K. Jang-Hwan, S.Seung-Ki, K. Kyung- Hwan // in Proc. IEEE Industry Applications Conference. – 2004, vol.4. – pp.2232-2238. – doi: 10.1109/IAS.2004.1348786.
15. **Ozdemir, A.** Digital current control of a three-phase four-leg voltage source inverter by using p-q-r theory / A. Ozdemir, Z. Ozdemir // IET Power Electron. – 2014. – vol. 7. – no. 3. – pp. 527-539. – doi: 10.1049/iet-pel.2013.0254.
16. **Жемеров, Г. Г.** Развитие современных теорий мощности трехфазных четырехпроводных систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Електротехніка і електромеханіка. – Х.: НТУ «ХПІ». Спеціальний випуск до XXII Міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка та енергоефективність», том І, 2016. – № 4(1). – С. 11-19.
17. **Поліщук, С. Й.** Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі / С. Й. Поліщук, М. Ю. Артеменко, В. М. Михальський, Л. М. Батрак, І. А. Шаповал // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 12–19.

References (transliterated)

1. **Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A.** Generalized theory of the instantaneous reactive power in three phase circuits. Int. Power Electronics Conf. Tokyo. Japan, 1983, 1375–1386.
2. **Kim, H. S., Akagi, H.** The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No.99TH8475), 1999, 422–427, doi: 10.1109/PEDS.1999.794600.
3. **Kim, H., Blaabjerg, F., Bak-Jensen, B., Choi, I.** Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory IEEE Trans.Power Elektronics, 2002, **17(5)**, 701-710, doi: 10.1109/TPEL.2002.802185.
4. **Czarnecki, L. S.** On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory. IEEE Trans. On Power Electronics, 2004, **19(3)**, 828–836, doi: 10.1109/TPEL.2004.826500.
5. **Depenbrock, M. A.** Concise Assessment of original and Modified Instantaneous Power Theory Applied to FourWire Systems. Proceedings of the References. Power Conversion Conference. Osaka. Japan, 2002, **1,** 60–67, doi: 10.1109/PCC.2002.998513.
6. **Soares, V., Verdelho, P., Marques, G. D.** An instantaneous active and reactive current component method for active filters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, **15(4)**, 660-669, doi: 10.1109/63.849036.
7. **Aredes, M., Akagi, H., Watanabe, E. H., Salgado, E. H., Encarnacao, L. F.** Comparisons Between the p-q and p-q-r Theories in Three-Phase Four-Wire Systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, **24(4)**, 924-933, doi: 10.1109/TPEL.2008.2008187.
8. **Rachmildha, T. D., Llor, A., Fadel, M., Dahono, P. A., Haroen Y.** Comparison of Direct Power Control with Hybrid Approach on 3-Phase 4-Wire Active Power Filter between p-q-0 and p-q-r Power Theory. ISIE 2008, Cambridge, 2270-2275, doi: 10.1109/ISIE.2008.4677282.
9. **Depenbrock, M., Staudt, V., Wrede H.** A theoretical investigation of original and modified instantaneous power theory applied to four-wire systems. IEEE Trans. Ind. Appl., 2003, **39(4)**, 1160-1167, doi: 10.1109/TIA.2003.814553.
10. **Salmern, P., Montao, J. C., Vzquez, J. R., Prieto, J., Prez A.** Practical application of the instantaneous power theory in the compensation of four-wire three-phase systems. Proc. IEEE 28th Annu. Conf. IECON, 2002, **1**, 650-655, doi: 10.1109/IECON.2002.1187584.
11. **Haley, P.** Limitations of cross vector generalized p-q theory. Proc. Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC). 15-18 June, 2015,1-5, doi: 10.1109/ISNCC.2015.7174707.
12. **Abu, H. A. S., Talib, M. H. N., Ibrahim, Z.** Comparative study of different PWM control scheme for three-phase three-wire shunt active power filter. In 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia, 2012, 119-123, doi: 10.1109/PEOCO.2012.6230846.
13. **Zhao, C., Zhao, X.** A New Method for Voltage Quality Evaluation Based on p-q-r Theory. In Proc. 2004 International Conference Power System Technology, 2004, 21-24, doi: 10.1109/ICPST.2004.1460175.
14. **Hyosung, K., Jun-Keun, Ji., Jang-Hwan, K., Seung-Ki, S., Kyung- Hwan, K.** Novel topology of a line interactive UPS using PQR instantaneous power theory. In Proc. IEEE Industry Applications Conference, 2004, **4**, 2232-2238, doi: 10.1109/IAS.2004.1348786.
15. **Ozdemir, A., Ozdemir, Z.** Digital current control of a three-phase four-leg voltage source inverter by using p-q-r theory. IET Power Electron, 2014, **7(3)**, 527-539, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0254.
16. **Zhemerov, G. G., Tugay, D. V.** Razvitiye sovremennykh teoriy moshchnosti trekhfaznykh chetyrekhprovodnykh sistem elektrosnabzheniya s nelineynoy nagruzkoy [Development of the modern power theories of three-phase four wire energy supply systems with non-linear loads]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika* [*Electrical engineering & electromechanics*]. Kharkov: NTU «KhPI», 1, 2016, **4(1)**. 11-19.
17. **Polishchuk, S. Y., Artemenko, M. Yu., Mykhalskyi, V. M., Batrak, L.M., Shapoval, I.A.** Stratehiya keruvannya paralel′nym aktyvnym fil′trom z chastkovym poslablennyam skladovoyi nul′ovoyi poslidovnosti napruh tryfaznoyi

chotyryprovidnoyi merezhi [Shunt active filter control strategy with partial decrease of zero-sequence voltage in three-phase four-wire system]. *Tekhnichna elektrodynamika* [*Technical electrodynamics*], 2013, **3**, 12–19

Відомості про авторів (About authors)

Тугай Дмитро Васильович – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2617-0297; e-mail: tugaydmytro@gmail.com.

Dmytriy Tugay – D.Sc., Docent, Head of the Chair of Alternative Power Engineering and Electrical Engineering, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2617-0297; e-mail: tugaydmytro@gmail.com.

Жемеров Георгій Георгійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислової і біомедичної електроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3469-0121; e-mail: zhemerov@gmail.com.

George Zhemerov – D.Sc, Professor, Head of the Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3469-0121; e-mail: zhemerov@gmail.com.

Корнелюк Сергій Іванович – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, аспірант кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки; м. Харків, Україна; e-mail: seigerkornelyuk@gmail.com.

Serhii Korneliuk – P.G. of Alternative Power Engineering and Electrical Engineering, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine; e-mail: seigerkornelyuk@gmail.com.

Шкурпела Олександр Олександрович – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, асистент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки; м. Харків, Україна; e-mail: 447Alexashka@gmail.com.

Alexandr Shkurpela – P.G.of Alternative Power Engineering and Electrical Engineering, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine; e-mail: 447Alexashka@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Тугай, Д. В. Новий спосіб керування паралельним силовим активним фільтром на основі модифікованої p-q-r теорії потужності / **Д. В. Тугай, Г. Г. Жемеров, С. В. Котелевець, О. О. Шкурпела** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 152-160. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.22.

Please cite this article as:

Tugay, D., Zhemerov, G., Kotelevets, S., Shkurpela, A. Parallel power active filter new control technique based on modified p-q-r power theory. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 152-160, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.22.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Тугай, Д. В. Новый способ управления параллельным силовым активным фильтром на основе модифицированной p-q-r теории мощности / **Д. В. Тугай, Г. Г. Жемеров, С. В. Котелевец, А. А. Шкурпела** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 152-160. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.22.

АННОТАЦИЯ. *В работе раскрыты основные преимущества использования p-q-r теории мгновенной мощности для построения быстродействующих систем управления силовыми активными фильтрами, позволяющих реализовать как квазиустановившиеся так и динамические режимы работы электроэнергетических объектов с активными фильтрокомпенсирующими устройствами, которые питаются от трехфазной четырехпроводной промышленной сети. В то же время показано, что использование преобразований p-q-r теории мгновенной мощности связано со значительным количеством математических вычислений, выполняемых микроконтроллером в реальном времени и потребует значительного быстродействия аппаратной части системы управления. Предложен новый способ управления параллельным силовым активным фильтром, сочетающий универсальную p-q-r теорию мощности с кросс-векторной теорией. Предложенный способ целесообразно использовать в системах управления силовыми активными фильтрами, работающими в трехфазных четырехпроводных системах электроснабжения с электрической нагрузкой любого типа, а также в гибридных системах, когда силовая часть преобразователя может использоваться не только в качестве фильтрокомпенсирующие устройства, но и в качестве инвертора напряжения. Показано, что использование предложенного способа позволяет существенно уменьшить количество математических вычислений, выполняемых микроконтроллером системы управления для реализации сигналов управления силовыми транзисторными модулями. Для проверки работоспособности способа управления синтезирована Matlab-модель реального объекта электроснабжения с параллельным силовым активным фильтром. Сопоставление результатов моделирования для трех алгоритмов управления силовым активным фильтром позволило оценить качество работы предлагаемого алгоритма и подтвердить не только его работоспособность, но и эквивалентность полученных энергетических характеристик характеристикам, которые были получены при использовании универсальной p-q-r теории мгновенной мощности.*

Ключові слова: *p-q-r теория мощности; кросс-векторная теория мощности; силовой активный фильтр; система управления; трехфазная четырехпроводная система, алгоритм управления, система електроснабжения*

Надійшла (received) 08.07.2019