

## Силова електроніка

УДК 621.314

# Застосування р-q теорії для керування трифазним фільтро- компенсуючим перетворювачем

Миколаєць Д. А., к.т.н., ORCID [0000-0002-9152-8593](https://orcid.org/0000-0002-9152-8593)e-mail [dmytri\\_m@ukr.net](mailto:dmytri_m@ukr.net)Мацюк М. О., ORCID [0000-0003-4697-9958](https://orcid.org/0000-0003-4697-9958)e-mail [maxim00-01@ukr.net](mailto:maxim00-01@ukr.net)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Київ, Україна

**Реферат**—В роботі досліджено роботу трифазного фільтро-компенсуючого перетворювача паралельного типу із застосуванням р-q теорії. Отримані співвідношення, які дозволяють виразити струми компенсатора в  $\alpha\beta$  системі координат. Отримані рівняння задавальних струмів з врахуванням умови забезпечення постійної напруги накопичувальної ємності. Побудована Matlab/Simulink модель з системою керування, що синтезована на основі р-q теорії. Проаналізований гармонічний склад струму, що споживається з мережі, та ефект від використання фільтро-компенсуючого перетворювача.

Бібл. 11, рис. 5.

**Ключові слова** — Трифазний фільтро-компенсуючий перетворювач; р-q теорія; Matlab модель, THD.

### I. ВСТУП

У сучасних умовах гостро стоїть питання забезпечення якості електричної енергії в розподільних мережах у зв'язку з широким впровадженням силових електроніки, як найбільш ефективного засобу забезпечення необхідних режимів роботи електромеханічних і технологічних комплексів. В той же час в електричних мережах постійно зростає питома вага нелінійних та швидкозмінних навантажень, що призводить до зниження якісних показників електричної енергії та відхилення їх від норм, регламентованих в ДСТУ EN 50160:2014. Погіршення якості електричної енергії веде до зниження надійності та ефективності роботи електрообладнання.

В опублікованих роботах питанням поліпшення якості електричної енергії та впливу неактивної потужності на якість електроенергії займаються провідні вчені різних країн [1]–[4]: Akagi H., Czarneski L., Peng F., Розанов Ю.К. Великий внесок в практичну реалізацію засобів електромагнітної сумісності та активної фільтрації внесли вітчизняні наукові школи під керівництвом академіка НАН України Шидловського А.К., членів-кореспондентів НАН України Волкова І.В., Жаркіна А.Ф., професорів Жемерова Г. Г., Жуйкова В.Я., Артеменка М. Ю., Михальського В. М. та ін. [5]–[8].

Для вирішення раніше вказаних задач перспективним є застосування фільтро-компенсуючих перетворювачів (ФКП), що дозволить знизити генерацію вищих гармонік в мережу [9]–[11]. Тому актуальною задачею є створення систем автоматичного керування трифазними ФКП та алгоритмів їх роботи.

Ця стаття присвячена застосуванню теоретичних положень та експериментальних досліджень, спрямованих на подальший розвиток побудови трифазних систем компенсації реактивної потужності та нелінійних спотворень з використанням р-q теорії. Виведені вирази для розрахунку задавальних струмів компенсатора та проведено схемотехнічне моделювання.

### II. ТРИФАЗНИЙ ФКП

На рис. 1 представлена спрощена схема трифазного фільтро-компенсуючого перетворювача паралельного типу, підключеного в систему 3-фазна мережа – нелінійне навантаження.

Представлена схема трифазного ФКП складається з накопичувальної ємності  $C$  та мостового перетворювача, до складу якого входять шість ключів  $S1-S6$ , та індуктивності  $L_a, L_b, L_c$ .



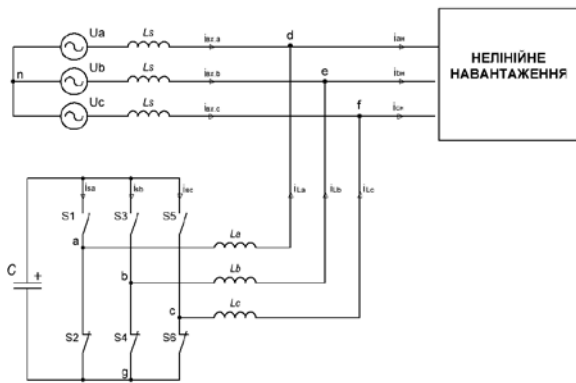


Рис. 1 Спрощена схема ФКП

У 1983 році Akagi та співавторами [3] було запропоновано «узагальнену теорію миттєвої реактивної потужності в трифазних ланцюгах», також відому як теорію миттєвої потужності, або *p-q* теорію. Ця теорія полягає в алгебраїчному перетворенні (трансформація Кларка) з трьох фазних напруг і струмів у *abc* системі координат до *αβ0* координати, де *α* і *β* ортогональні. Струми компенсатора, з використанням даного перетворення, описуються наступним виразом [3]:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \times \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

де  $T_{\alpha\beta 0}$  – матриця переходу від системи координат *abc* до *αβ0*.

Матрицю  $T_{\alpha\beta 0}$  можна використати для модуляції необхідних вихідних струмів фільтро-компенсуючого перетворювача, для цього співвідношення (1) перепишемо у наступному вигляді:

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0}^{-1} \times \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \\ i_0^* \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $i_{\alpha}^*$ ,  $i_{\beta}^*$ ,  $i_0^*$  – задавальні струми ФКП,  $T_{\alpha\beta 0}^{-1}$  – обернена матриця переходу від площини *αβ* до простору вихідних змінних.

Для простішого розуміння запишемо (2) через систему рівнянь:

$$\begin{cases} i_{La} = i_{\alpha}^* + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot i_0^*; \\ i_{Lb} = -\frac{1}{2} \cdot i_{\alpha}^* + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{\beta}^* + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot i_0^*; \\ i_{Lc} = -\frac{1}{2} \cdot i_{\alpha}^* - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{\beta}^* + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot i_0^*. \end{cases} \quad (3)$$

Отже, отримана система (3) при використанні трансформації Кларка для опису змінних трифазного фільтро-компенсуючого перетворювача паралельного типу не вимагає додаткових математичних операцій при переході від задавальних струмів у *αβ* системі координат до просторових вихідних струмів компенсатора.

### III. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАДАВАЛЬНИХ СТРУМІВ ФКП

В трифазній системі електроживлення потужність, що підводиться до навантаження від джерела, визначається з виразу:

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t),$$

де  $u_a(t)$ ,  $u_b(t)$ ,  $u_c(t)$  – миттєві фазні напруги навантаження,  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$  – миттєві струми навантаження.

Використавши перетворення Кларка до напруг електричних мереж і струмів навантаження, отримуються наступні вирази:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{n.a} \\ i_{n.b} \\ i_{n.c} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В *αβ* координатах миттєвої активної потужності трифазної електричної системи визначається як:

$$p = u_{\alpha}i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta}. \quad (6)$$

Миттєва реактивна потужність визначаються наступним чином:

$$q = u_{\beta}i_{\alpha} - u_{\alpha}i_{\beta}. \quad (7)$$

Миттєва активна та реактивна потужності розкладаються на постійну і осцилюючу складові:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p}; \\ q = \bar{q} + \tilde{q}. \end{cases} \quad (8)$$

де  $\bar{p}$ ,  $\bar{q}$  – відповідно постійні складові миттєвої активної та реактивної потужності,  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$  – осцилюючі складові миттєвої активної та реактивної потужності.

Такий поділ в *p-q* теорії на компоненти потужностей може бути отриманий з використанням аналогових або цифрових фільтрів, в залежності від типу системи керування.

Для розрахунку задавальних струмів компенсації в  $\alpha\beta$ -координатах використовується наступне рівняння:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & -u_{\beta} \\ u_{\beta} & u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ q_x \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де  $i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*$  – задавальні струми компенсатора в  $\alpha\beta$ -координатах,  $p_x, q_x$  – значення миттєвої активної та реактивної потужності, які повинен відпрацювати ФКП.

Оскільки корисною є тільки складова  $\bar{p}$ , у більшості випадків необхідно компенсувати складові потужності  $\bar{p}, \bar{q}, \bar{q}$ . Проте для нормальної роботи фільтро-компенсуючого перетворювача необхідно врахувати напругу ланки постійного струму, яка повинна бути в межах відповідних рівнів. Розрахунки з використанням  $p$ - $q$  теорії дозволяють забезпечити регулювання цієї напруги, врахувавши при розрахунках задавальних струмів компенсатора енергію, необхідну для підтримання постійної напруги на конденсаторі. Врахувавши все вищесказане, можна записати вираз, з якого обчислюється необхідне значення  $p_x$ :

$$p_x = \bar{p} - p_{peg}, \quad (10)$$

де  $p_{peg}$  – потужність, необхідна для підтримання постійної напруги в ємності.

Виходячи із цього, під  $p_x$  та  $q_x$  розуміється наступне:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ q_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} - p_{peg} \\ \bar{q} + \bar{q} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Обрахувати  $p_{peg}$  можна із наступного виразу:

$$p_{peg} = K \cdot (U_{ref} - U_{ен}), \quad (12)$$

де  $K$  – пропорційний коефіцієнт підсилення (можливе використання ПІ-регулятора),  $U_{ref}$  – необхідна напруга в ланцюзі постійного струму, що являє собою середню напругу конденсатора.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Моделювання фільтро-компенсуючого перетворювача було проведено в програмному комплексі MATLAB®. З використанням графічного середовища Simulink, що входить в даний програмний комплекс, реалізована модель трифазної системи, до якої підключено трифазний ФКП паралельного типу (рис. 2) та модель мікропроцесорної системи керування (рис. 3). Для оцінки ефективності роботи пристрою розглянемо модель, де реалізоване нелінійне навантаження, що дозволяє оцінити якість фільтрації кривої струму навантаження.

У якості елементів моделі використовуються компоненти бібліотеки *SimPowerSystems*. До складу віртуальної моделі входять наступні елементи:

- блок *Three-Phase Source* імітує роботу трифазної мережі промислової частоти;
- *Measurements 1* призначений для вимірювання миттєвих значень фазних струмів та напруг мережі;
- *Measurements 2* призначений для вимірювання миттєвих значень фазних струмів та напруг навантаження;

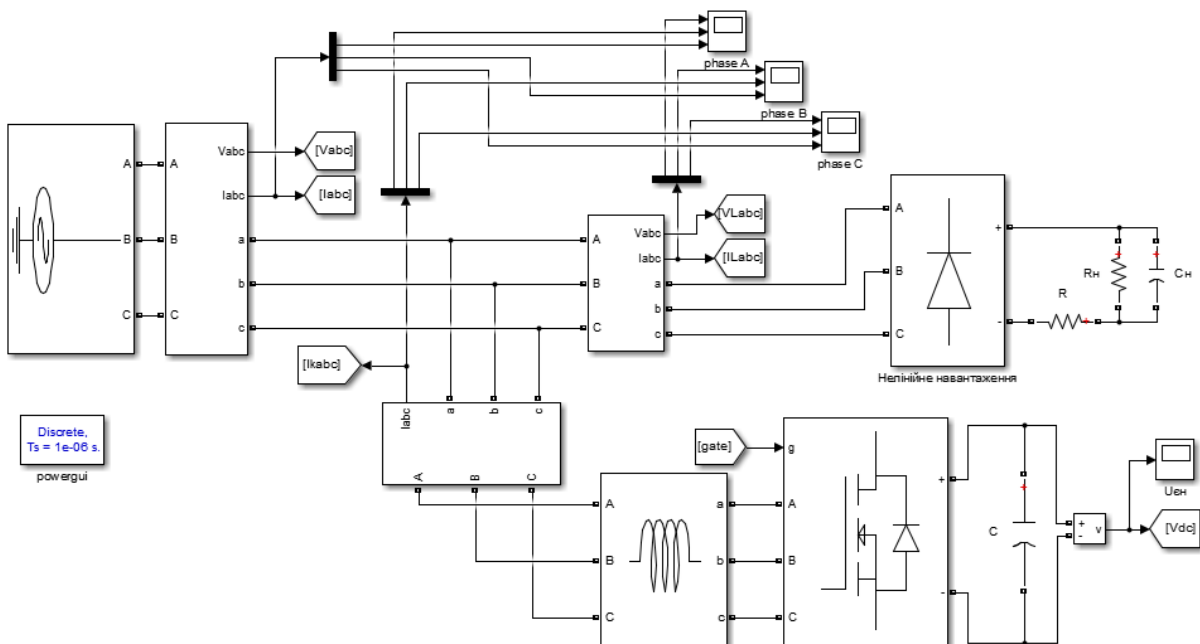


Рис. 2 Модель силових частини фільтро-компенсуючого перетворювача в програмному пакеті Simulink®

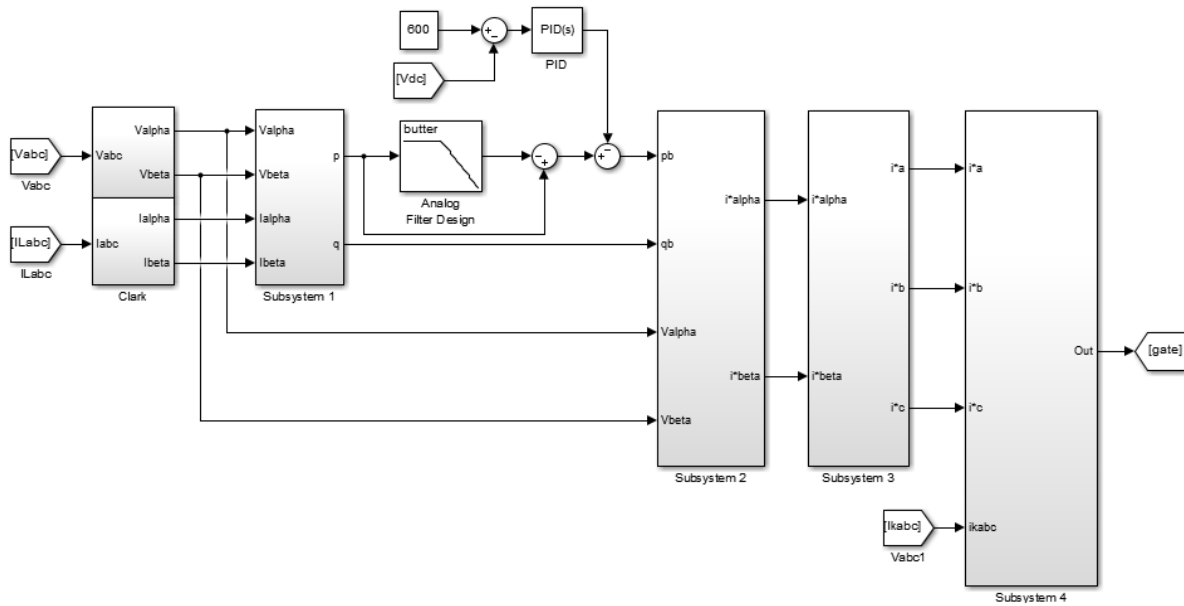


Рис. 3 Модель системи керування фільтро-компенсуючого перетворювача в програмному пакеті Simulink®

- *Measurements 3* призначений для вимірювання миттєвих значень фазних струмів фільтро-компенсуючого перетворювача;
  - блоки *Scope (phase A, phase B, phase C)* призначені для спостереження форми струмів: вхідного, навантаження та компенсатора для відповідної фази;
  - блок *Universal Bridge* у зв'язці з блоком *RC Branch* є нелінійним навантаженням;
  - *Three-phase series L branch* – це послідовна індуктивність ФКП;
  - *Three-phase inverter* – силовий трифазний мостовий перетворювач, побудований на IGBT-ключах;
  - блок *Demux* призначений для розділення сигналів;
  - вихідна накопичувальна ємність ФКП представлена блоком *C Branch*.
- Далі слідують блоки, які входять до складу моделі системи керування компенсуючого перетворювача:
- у блоці *Clark* здійснюється перетворення Кларка за виразами (1) та (5).

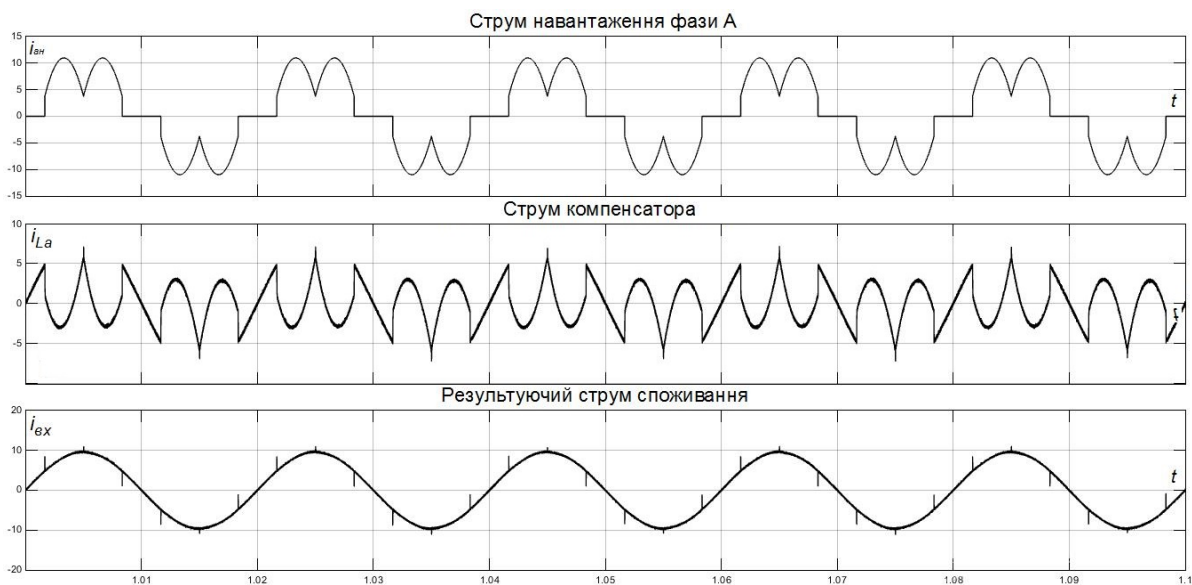


Рис. 4 Часові діаграми струмів системи



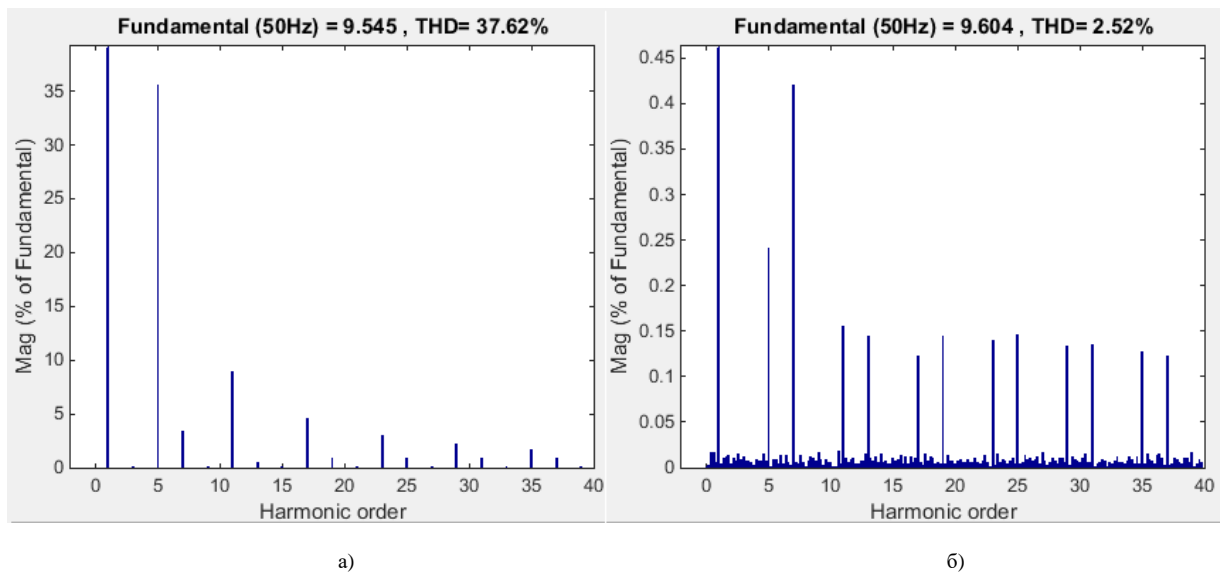


Рис. 5 Спектрограми струму навантаження та вхідного струму

- в підсистемі *Subsystem 1* здійснюється обрахунок значень миттєвих потужностей навантаження за виразами (6) та (7).
- блок *Analog Filter Design* призначений для виділення постійної складової миттєвого значення сигналу активної потужності.
- блок *PID* реалізує алгоритми керування для забезпечення сталої напруги в ланці постійного струму.
- *Subsystem 2* обчислює задавальні струми компенсатора за виразом (9).
- *Subsystem 3* відповідає за знаходження сигналу, за яким здійснюється модуляція вихідного струму компенсатора за виразом (3).
- в підсистемі *Subsystem 4* здійснюється формування імпульсів керування (рис. 3).

За допомогою розробленої моделі проведена оцінка якості фільтрації кривої струму. Діаграми зміни струму навантаження, обрахованого струму компенсатора та результуючого струму споживання для однієї з фаз представлені на рис. 4.

Якість компенсації вищих гармонік можна оцінити за коефіцієнтами спотворення синусоїдальності кривої струму, тому було проведено спектральний аналіз струму навантаження (рис. 5а) та струму, що споживається з мережі (рис. 5б).

Як видно із результатів моделювання, THD споживаного струму при використанні ФКП зменшується до 2,52%, що повністю задовольняє вимоги існуючих стандартів.

#### ВИСНОВКИ

- 1) Отримані на основі р-q теорії співвідношення необхідні для розробки алгоритмів керування ФКП.
- 2) На основі викладених математичних співвідношень побудована модель трифазного фільтро-компенсуючого перетворювача при роботі на випрямляч з активно-ємнісним навантаженням. При керуванні компенсатором за законами, описаними в статті, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму склав 2-3%, що показує адекватність теоретичних викладок.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] L. S. Czarnecki, "On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 3, pp. 828–836, 2004, DOI: [10.1109/TPEL.2004.826500](https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.826500).
- [2] Fang Zheng Peng, G. W. Ott, and D. J. Adams, "Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for 3-phase 4-wire systems," in *PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Formerly Power Conditioning Specialists Conference 1970-71. Power Processing and Electronic Specialists Conference 1972, 1997*, vol. 2, pp. 1089–1095, DOI: [10.1109/PESC.1997.616880](https://doi.org/10.1109/PESC.1997.616880).
- [3] H. Akagi, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits," in *International Power Electronics Conference*, 1983.
- [4] Y. K. Rozanov, M. V. Ryabchynsky, and A. A. Kvasnyuk, "Sovremennyye metodyi regulirovaniya kachestva elektroenergii sredstvami silovoy elektroniki [Modern methods of regulating the quality of electric power by means of power electronics]," *Elektrotehnika*, no. 4, pp. 28–32, 1999.
- [5] V. Y. Zhuykov and L. T. Nguen, "Uslovie kompensatsii reaktivnoy moschnosti vyisokochastotnyim preobrazovatelem parallelnogo tipa [The condition for reactive power compensation by a high-frequency converter of a parallel type]," *Electron. Commun.*, vol. 14, no. 5, pp. 82–85, 1998.
- [6] A. K. Shidlovskiy and A. F. Zharkin, *Vyisshie garmoniki v nizkovolnykh elektricheskikh setyah [Higher harmonics in low-*

- voltage electrical networks]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2005.
- [7] A. V. Volkov, "Kompensatsiya moschnosti iskazheniy posredstvom aktivnogo filtra s prognoziruemyim releynym upravleniem [Compensation of distortion power through active filter with predictive relay control]," *Elektrotehnika*, no. 3, pp. 2–10, 2008.
- [8] M. Y. Artemenko, L. M. Batrak, V. M. Mykhalskiy, and S. Y. Polishchuk, "Optymizatsiia enerhetychnykh kharakterystyk tryfaznoi chotyryprovodnoi systemy zhyvleniia z paralelnym aktivnym filtrom u nesymetrychnomu synusoidnomu rezhymi [Energy performance optimization of the three phase four wire power supply system with a parallel active filter in the unbalanced sinusoidal mode]," *Tech. Electrodyn.*, no. 2, pp. 30–37, 2015, URL: [http://techned.org.ua/2015\\_2/st4.pdf](http://techned.org.ua/2015_2/st4.pdf).
- [9] I. S. Yamnenko, T. O. Tereshchenko, and D. A. Mykolaets, "Fil'tro-kompensuyuchy peretvoryuvach z systemoyu Надійшла до редакції 19 червня 2017 р.
- zaryadu/rozryadu akumulyatornoyi batareyi [Active Power Line Conditioner with Battery Charge]," *Tech. Electrodyn.*, no. 5, pp. 16–20, 2015, URL: [http://techned.org.ua/2015\\_5/st3.pdf](http://techned.org.ua/2015_5/st3.pdf).
- [10] D. A. Mykolaets and V. I. Mykytiuk, "Intervalni strumy v filtro-kompensuiuchomu peretvoriuvachi z kompensatsiieiu strumu samorozriadu akumulatora [Interval Currents in the Active Power Line Conditioner with Self-Discharge Current of the Battery Compensation]," *Tech. Electrodyn.*, no. 4, pp. 75–77, 2014, URL: [http://techned.org.ua/2014\\_4/st25.pdf](http://techned.org.ua/2014_4/st25.pdf).
- [11] D. Mikolaiets, "The calculating algorithm of active power line conditioner with uninterruptible power supply function," in *2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2015, pp. 534–538, DOI: [10.1109/ELNANO.2015.7146945](https://doi.org/10.1109/ELNANO.2015.7146945).

УДК 621.314

## Использование р-q теории для управления трехфазным фильтро- компенсирующим преобразователем

Миколаец Д. А., к.т.н., ORCID [0000-0002-9152-8593](https://orcid.org/0000-0002-9152-8593)e-mail [dmytri\\_m@ukr.net](mailto:dmytri_m@ukr.net)Мацюк М. А., ORCID [0000-0003-4697-9958](https://orcid.org/0000-0003-4697-9958)e-mail [maxim00-01@ukr.net](mailto:maxim00-01@ukr.net)

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Киев, Украина

**Реферат**—В работе исследована работа трехфазного фильтро-компенсирующего преобразователя параллельного типа с использованием р-q теории. Получены соотношения, которые позволяют выразить токи компенсатора в  $\alpha\beta 0$  системе координат. Получены выражения задающих токов с учетом условия обеспечения постоянного напряжения накопительной емкости. Построена Matlab/Simulink модель с системой управления, синтезированная на основе р-q теории. Проанализирован гармонический состав тока, потребляемого из сети, и эффект от использования фильтро-компенсирующего преобразователя.

Библ. 11, рис. 5.

**Ключевые слова** — Трехфазный фильтро-компенсирующий преобразователь; р-q теория; Matlab модель, THD.

UDC 621.314

## The use of a p-q theory for controlling a three-phase active power line conditioner



D. A. Mykolaiets, PhD, ORCID [0000-0002-9152-8593](https://orcid.org/0000-0002-9152-8593)

e-mail [dmytri\\_m@ukr.net](mailto:dmytri_m@ukr.net)

M. O. Matsiuk, ORCID [0000-0003-4697-9958](https://orcid.org/0000-0003-4697-9958)

e-mail [maxim00-01@ukr.net](mailto:maxim00-01@ukr.net)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—This paper is devoted to development of theoretical positions and experimental research aimed at further development of the theory of calculating the three-phase systems for reactive power compensation and harmonic distortion. Simplified scheme of a three-phase parallel type active power line conditioner, connected to the system 3-phase network-nonlinear load are presented. The work of a parallel-type three-phase active power line conditioner with using a p-q theory is investigated in this paper. A method is described that allows one to move from the abc to the  $\alpha\beta 0$  coordinate system with using a transition matrix. Expressions of the reference with taking into account the condition of ensuring a constant voltage of the storage capacity are obtained. Defined expressions needed to calculate the power consumed by the compensator for stabilizing the voltage at the capacitive storage with using a Clark conversion. A MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> model is constructed with a control system synthesized on the basis of the p-q theory. With the help of the developed model evaluated the quality of the filtration current curve. The diagrams of the load current, the estimated current of the compensator and the resulting current of system consumption for one phase presented. The harmonic composition of the current consumed from the network and the effect of using a filter-compensating converter are analyzed.

Ref. 11, fig. 5.

**Keywords** — *Three-phase active power line conditioner; p-q theory; MATLAB<sup>®</sup>-model, THD.*

