

## ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА

**В.Я. Жуйков\***, докт.техн.наук, **Д.А. Миколаєць\*\***, канд.техн.наук  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.  
E-mail: [valery.zhuikov@gmail.com](mailto:valery.zhuikov@gmail.com), [dmytri\\_m@ukr.net](mailto:dmytri_m@ukr.net)

*Розглянуто геометричний підхід із застосуванням матриці переходу від незалежних змінних у трикоординатному просторі до залежної системи з двома незалежними змінними. Отримано співвідношення, яке дає змогу виразити вихідні змінні через вхідні. Побудовано простір векторів вхідних та вихідних змінних. Бібл. 9, табл. 1, рис. 3.*

**Ключові слова:** силовий активний фільтр, геометричний підхід, компенсація реактивної потужності.

**Вступ.** Аналіз використання геометричного підходу для опису схем автономних багатофазних інверторів напруги в [1] дає змогу визначити деякі його загальні принципи. Геометричний підхід застосовується у випадках, коли доцільно і можливо виділити окремі вектори, що визначаються конкретним видом електричних схем силових пристроїв. Розмірності просторів вхідних і вихідних напруг перетворювача залежать від кількості плечей перетворювача. Використання даного методу дає змогу представити трифазну напругу трьома незалежними векторами, які при проєкції на площину утворюють звичайну трифазну систему. Ідея керування перетворювачами з використанням додаткового ступеня свободи вбачається цікавою для застосування в компенсаторах реактивної потужності для отримання необхідної форми споживаного струму. Найбільш розповсюдженим сімейством активних пристроїв компенсації реактивної потужності на сьогодні можна вважати силові активні фільтри (САФ), які також називають фільтро-компенсуючими перетворювачами (ФКП) [2-8]. Вони характеризуються високими технічними показниками і дають змогу придушувати вищі гармоніки струму всього спектра, регламентованого як вітчизняними, так і зарубіжними стандартами. При використанні геометричного підходу з даним типом перетворювачів постає проблема, пов'язана з тим, що на відміну від напруги джерела, яка є незалежною величиною, всі струми в колах є залежними, тому на початковому етапі необхідно задатися джерелом

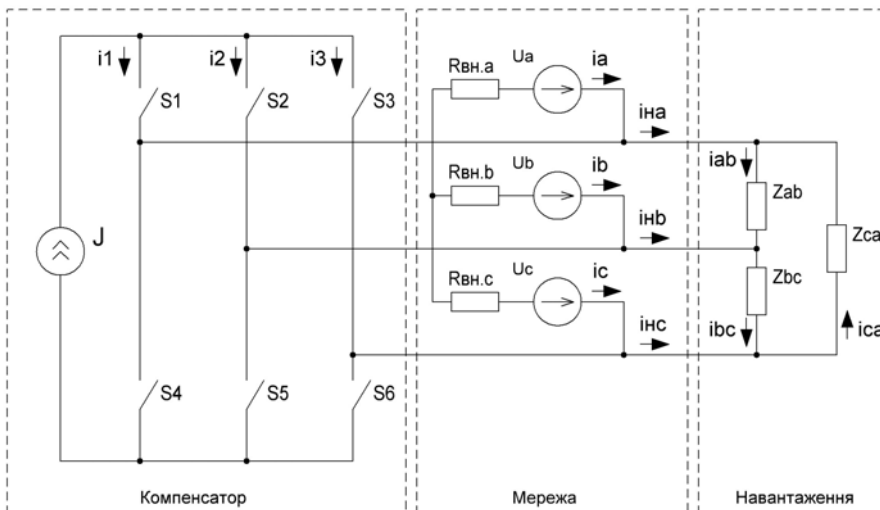


Рис. 1

струму, що може бути отримане з застосуванням відповідної індуктивності та ємнісного накопичувача САФ, які в моделі розглядаються як окреме джерело енергії (рис. 1).

На рис. 1 показано спрощену схему паралельного активного фільтра, що працює на нелінійне навантаження, підключене до трифазної мережі. При цьому опори навантаження  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  та  $Z_{ca}$  на декілька порядків більші, ніж внутрішні опори джерел живлення  $R_{вн.а}$ ,  $R_{вн.б}$  та  $R_{вн.с}$ . **Мета роботи** – показати застосування геометричного підходу при формуванні струму споживання системи силовий активний фільтр–нелінійне навантаження.

**Компенсатор із джерелом струму.**  $n$ -плечовому перетворювачу притаманні  $n$  вхідних змінних, які утворюють  $n$ -вимірний простір, а вихідні змінні утворюють  $(n-1)$ -вимірний простір. Перехід від вхідних змінних перетворювача до вихідних змінних здійснюється за формулою

$$i_{вих} = T i_{вх}, \quad (1)$$

де  $T$  – матриця коефіцієнтів перетворення, що дає змогу здійснити цей перехід,  $i_{вх}$  та  $i_{вих}$  – вектори вхідних і вихідних струмів компенсатора відповідно. Оскільки вихідні змінні отримують із проєкцій вхідних, які утворюють тривимірну ортогональну систему координат, то простір вихідних змінних буде двовимірним, де неза-

лежними будуть лише дві змінні. При використанні як незалежних змінних напруг знаходження проєкцій вхідних величин у тривимірному просторі на двовимірний простір вихідних величин, при цьому зберігши співвідношення довжин векторів вихідних величин до вхідних, яке повинне дорівнювати  $2/3$ , справедливо тільки при з'єднанні навантаження зіркою. При аналізі за струмами навантаження необхідно з'єднати трикутником (рис. 1). За вхідні величини прийнято струми через вентиля анодної групи, за вихідні – струми через фази навантаження. В даній системі можуть бути замкнені лише один вентиль анодної групи та один вентиль катодної. Таким чином, виключивши стани, при яких будуть протікати наскрізні струми, складаємо таблицю станів ключів і протікаючих струмів.

S	i1	i2	i3	iab	ibc	ica
S1, S5	$J$	0	0	$2J/3$	$-J/3$	$-J/3$
S1, S6	$J$	0	0	$J/3$	$J/3$	$-2J/3$
S2, S4	0	$J$	0	$-2J/3$	$J/3$	$J/3$
S2, S6	0	$J$	0	$-J/3$	$2J/3$	$-J/3$
S3, S4	0	0	$J$	$-J/3$	$-J/3$	$2J/3$
S3, S5	0	0	$J$	$J/3$	$-2J/3$	$J/3$

нат, які називають первинними векторами струму, оскільки всі інші вектори струму можуть бути утворені з комбінації цих трьох векторів. Очевидно, що вхідні струми перетворювача в просторі вихідного струму проєктуються як три вектори однакового розміру в двовірній площині. Вісім кутів «куба» представляють собою вектори восьми станів перемикання, причому два з них дорівнюють нулю і відповідають станам вентилів, при яких струм не протікає через навантаження. В результаті аналізу струмів при відповідних станах переключення компенсатора отримуємо матрицю переходу, яка дозволяє визначити вихідні змінні через вхідні

$$\begin{bmatrix} iab \\ ibc \\ ica \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} = T \times \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Слід зауважити, що при розгляді струму як задаючої, а значить, незалежної величини, струм споживання буде формуватися наведеною вище комбінацією ввімкнення ключів.

Для переходу від трикутника до зірки використовується матриця переходу [9]

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

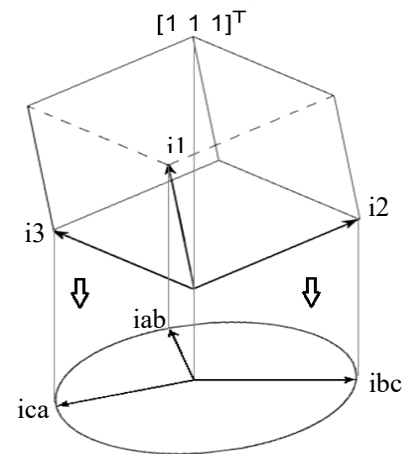


Рис. 2

Струми, що споживає навантаження, визначаються таким чином:

$$\begin{bmatrix} ina \\ inb \\ inc \end{bmatrix} = C \times \begin{bmatrix} iab \\ ibc \\ ica \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Підставивши вираз (4) у (2), отримуємо

$$\begin{bmatrix} ina \\ inb \\ inc \end{bmatrix} = C \times T \times \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Струм, що споживає система компенсатор–навантаження, описується відповідно до першого закону Кірхгофа

$$\begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} = C \times T + \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} = [C \times T + \mathbf{1}] \times \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де  $\mathbf{1}$  – одинична матриця, а  $[C \times T + \mathbf{1}]$  – матриця перетворення струмів компенсатора у вхідні струми  $ia$ ,  $ib$  та  $ic$ .

На рис. 3 показано результати моделювання роботи компенсатора в програмному забезпеченні Matlab Simulink.

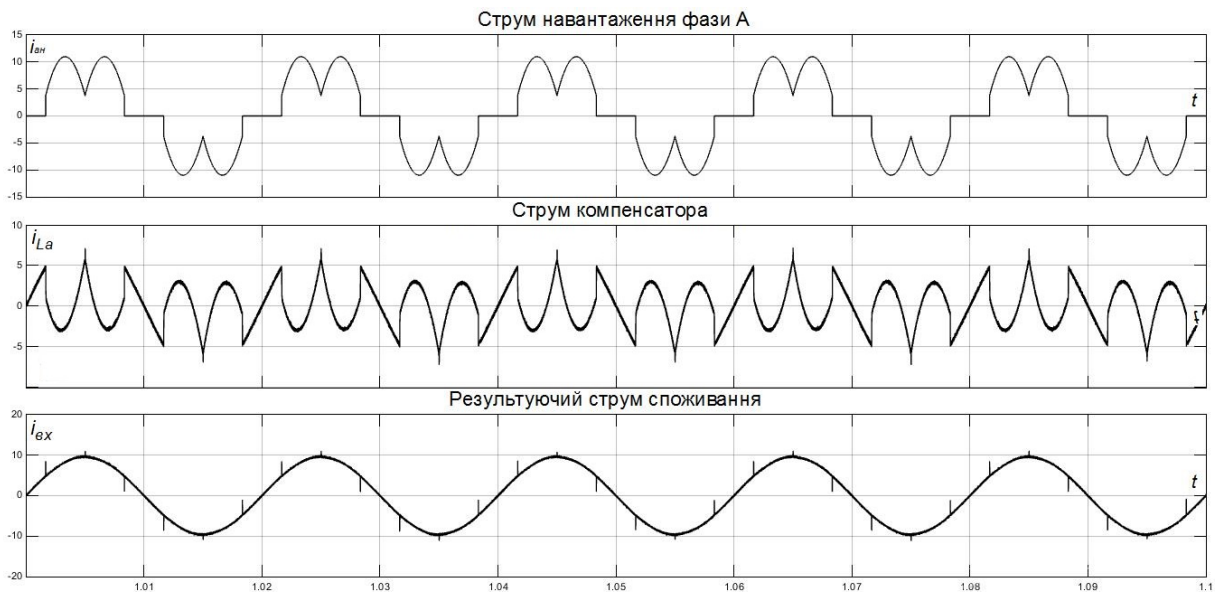


Рис. 3

Коефіцієнт нелінійних спотворень, отриманий для кривої на рис. 3, менше 6%, проте результуючий струм споживання має деякі викиди, пов'язані зі зміною напрямку протікання струму. Такі спотворення струму придушуються низькочастотним фільтром, що забезпечує ще більш низький коефіцієнт нелінійних спотворень.

**Висновки.** У роботі для джерела струму отримано матрицю переходу від тривимірного простору вхідних змінних до двовимірного простору вихідних та матрицю переходу для струмів силового активного фільтра, які дають змогу проводити розрахунки струмів та в подальшому забезпечувати керування перетворювачем із використанням додаткового ступеня свободи.

1. Ryan M.J., Lorenz R.D., De Doncker R.W. Modeling of Multilevel Sine-Wave Inverters: A Geometric Approach. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 1999. Vol. 46. No 6. Pp. 1187-1198.
2. Cadaval E.R., Gonzalez F.B., Montero M.I.M. Active power line conditioner based on two parallel converters topology. *Compatibility in Power Electronics*. 2005, Gdynia, Poland. IEEE, June 1. Pp. 134 - 140.
3. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Составляющие мощности суммарных потерь электрической энергии в пространственных ррр координатах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 2. С. 11-19.
4. Ямненко Ю.С., Терещенко Т.О., Миколаєць Д.А. Фільтро-компенсуючий перетворювач з системою заряду/розряду акумуляторної батареї. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 16-20.
5. Михальський В.М., Соболев В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А. Стратегія мінімізації небажаних складових миттєвої потужності із застосуванням різних топологій паралельних активних фільтрів. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 1. С. 41-50.
6. Артеменко М.Ю., Батрак Л.М., Михальський В.М., Поліщук В.Й. Оптимізація енергетичних характеристик трифазної чотирипровідної системи живлення з паралельним активним фільтром у несиметричному синусоїдному режимі. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 2. С. 30-37.
7. Жуйков В.Я., Нгуен Лыхай Тунг. Условие компенсации реактивной мощности высокочастотным преобразователем параллельного типа. *Електроніка і зв'язь*. 1998. № 5. С. 82-85.
8. Миколаєць Д.А., Микитюк В.І. Інтервальні струми в фільтро-компенсуючому перетворювачі з компенсацією струму саморозряду акумулятора. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 75-77.
9. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1964. 772 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ТРЕХФАЗНОГО СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА

**В.Я. Жуйков**, докт.техн.наук, **Д.А. Миколаец**, канд.техн.наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

E-mail: [valery.zhuikov@gmail.com](mailto:valery.zhuikov@gmail.com), [dmytri\\_m@ukr.net](mailto:dmytri_m@ukr.net)

*Рассмотрен геометрический подход с применением матрицы перехода от независимых переменных в трикоординатном пространстве к зависимой системе с двумя независимыми переменными. Получено соотношение, позволяющее выразить выходные переменные через входные. Построено пространство векторов входных и выходных переменных. Библ. 9, табл. 1, рис. 3.*

**Ключевые слова:** силовой активный фильтр, геометрический подход, компенсация реактивной мощности.

## THE USE OF A GEOMETRIC APPROACH FOR THREE-PHASE ACTIVE POWER LINE CONDITIONER

**V.Y. Zhuikov, D.A. Mikolaiets**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: [valery.zhuikov@gmail.com](mailto:valery.zhuikov@gmail.com), [dmytri\\_m@ukr.net](mailto:dmytri_m@ukr.net)

*The geometric approach with the use of the transition matrix from independent variables in a three-coordinate space to a dependent system with two independent variables is considered in this paper. A relationship that allows to express output variables through inputs are got. The space of vectors of input and output variables is constructed.*

References 9, table 1, figures 3.

**Key words:** active power line conditioner, geometric approach reactive power compensation.

1. Ryan M.J., Lorenz R.D., De Doncker R.W. Modeling of Multileg Sine-Wave Inverters: A Geometric Approach. IEEE Transactions on industrial electronics. 1999. Vol. 46. No 6. Pp. 1187-1198.
2. Cadaval E.R., Gonzalez F.B., Montero M.I.M. Active power line conditioner based on two parallel converters topology. Compatibility in Power Electronics. 2005, Gdynia, Poland. IEEE, June 1. Pp. 134 - 140.
3. Zhemerov H.H., Tuhay D.V. Components of total electric energy losses power in pqr spatial coordinates. Electrical engineering & Electromechanics. 2016. No 2. Pp. 11-19. (Rus)
4. Yamnenko Yu.S., Tereshchenko T.O., Mykolaiets D.A. Active power line conditioner with battery charge. Tekhnichna Elektrodynamika. 2015. No 5. Pp. 16-20. (Ukr)
5. Mykhalskyi V.M., Soboliev V.M., Chopyk V.V., Shapoval I.A. The minimization strategy of undesirable instantaneous power components with different topologies of shunt active filter. Tekhnichna Elektrodynamika. 2014. No 1. Pp. 41-50. (Ukr)
6. Artemenko M.Yu., Batrak L.M., Mykhalskyi V.M., Polishchuk V.Y. Energy performance optimization of the three phase four wire power supply system with a parallel active filter in the unbalanced sinusoidal mode. Tekhnichna Elektrodynamika. 2015. No 2. Pp. 30-37. (Ukr)
7. Zhuikov V.Ya., Nguyen Hai Tung. The condition of the reactive power compensation of the parallel-type high frequency converter. Elektronika i Sviaz. 1998. Vol. 5. Pp. 82-85. (Rus)
8. Mykolayets D.A., Mykytiuk V.I. Interval currents in filter-compensating converter with battery self-discharge current compensation. Tekhnichna Elektrodynamika. 2014. No 4. Pp. 75-77. (Ukr)
9. Andre Ango. Mathematics for electrical and radio engineers. Moskva: Nauka, 1964. 772 p. (Rus)

Надійшла 05.03.2018  
Остаточний варіант 05.04.2018