

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТРИФАЗНОГО ПОСЛІДОВНОГО СИЛОВОГО ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧОГО ПРИСТРОЮ**С. С. Бондаренко, М. А. Беззуб, О. В. Бялобржеський**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: sergj1994@gmail.com

Для підтримки якості електроенергії створюються силові активні фільтрокомпенсуючі пристрої. У разі спотворення напруги живлення використовують послідовний фільтрокомпенсуючий пристрій, який підключається до мережі через вольтододаточний трансформатор. При роботі вольтододаточного трансформатора послідовного активного фільтрокомпенсуючого пристрою, струм навантаження впливає на напругу компенсації, що негативно впливає на компенсаційні властивості фільтрокомпенсуючого пристрою. Для мінімізації впливу вольтододаточного трансформатора створена система автоматичного регулювання в якій за допомогою регуляторів напруги та струму забезпечується виведення напруги компенсації на заданий рівень. Для визначення структури та параметрів регуляторів струму та напруги був використаний відомий принцип підпорядкованого регулювання. Синтезована система регулювання напруги трифазного послідовного фільтрокомпенсуючого пристрою. У віртуальному середовищі створена імітаційна модель системи автоматичного регулювання в складі послідовного трифазного фільтрокомпенсуючого пристрою. В результаті дослідження роботи моделі встановлено, що використання пропонованого технічного рішення, призводить до зменшення рівня гармонійного спотворення напруги на 12,3%.

Ключові слова: якість електроенергії, послідовний активний фільтрокомпенсуючий пристрій, система автоматичного регулювання, регулятор.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**С. С. Бондаренко, М. А. Беззуб, О. В. Бялобржеський**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: sergj1994@gmail.com

Для поддержания качества электроэнергии создаются силовые активные фильтрокомпенсирующие устройства. В случае искажения напряжения используют последовательное подключение фильтрокомпенсирующего устройства, которое подключается к сети через вольтодобавочного трансформатора. При работе вольтодобавочного трансформатора последовательного активного фильтрокомпенсирующего устройства, ток нагрузки влияет на напряжение компенсации, что негативно влияет на компенсационные свойства фильтрокомпенсирующего устройства. Для минимизации влияния вольтодобавочного трансформатора создана система автоматического регулирования в которой с помощью регуляторов напряжения и тока обеспечивается вывод напряжения компенсации на заданный уровень. Для определения структуры и параметров регуляторов тока и напряжения был использован известный принцип подчиненного регулирования. Синтезирована система подчиненного регулирования координат трехфазного последовательного фильтрокомпенсирующего устройства. В виртуальной среде создана имитационная модель системы автоматического регулирования в составе последовательного трехфазного фильтрокомпенсирующего устройства. В результате исследования работы модели установлено, что использование предлагаемого технического решения, приводит к уменьшению уровня гармоничного искажения напряжения на 12,3%.

Ключевые слова: качество электроэнергии, последовательный активный фильтрокомпенсирующие устройство, система автоматического регулирования, регулятор.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Показники якості електроенергії нормуються ДСТУ 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». Стандарт визначає вимоги до якості електричної енергії, що є одним з головних умов нормальної роботи електроприймачів.

В процесі роботи електроприймачів характер навантаження в мережі може залишатися незмінним, змінюватися в окремих або всіх фазах, супроводжуватися появою вищих гармонік струму або напруги [1]. У зв'язку з цим виникає необхідність компенсації негативного впливу роботи електроприймачів [2].

Найбільш ефективними технічними рішеннями для компенсації неактивних складових потужностей навантаження в трифазній мережі змінного струму є керувані силові активні фільтри [3]. Силові схеми активних фільтрів будуються на основі трифазних інверторів на IGBT транзисторах [4]. Для компенсації спотворень струму використовують паралельне підк-

лючення силового активного фільтру. В разі спотворення напруги мережі використовують послідовне підключення силового активного фільтру [5], таке підключення досягається шляхом використання вольтододаточного трансформатора. Застосування такої структури дозволяє пристрою швидко реагувати на погіршення якості напруги електричної енергії.

При роботі вольтододаточного трансформатора послідовного активного фільтру, струм навантаження впливає на напругу компенсації, що негативно позначається на компенсаційних властивостях послідовного активного фільтру [8]. Для мінімізації даного впливу створена система автоматичного управління в якій за допомогою регуляторів напруги та струму забезпечується виведення напруги компенсації на заданий рівень.

Мета роботи – розробка системи автоматичного регулювання напруги трифазного послідовного силового активного фільтру.

МАТЕРІАЛІ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Функціональна схема трифазного послідовного силового активного фільтра наведена на (рис. 1). На рисунку мережа представлена блоком (Source) до якої через первинну обмотку трансформатора, який представлений блоком (Transformer), підключене навантаження

представлене блоком (Load). До вторинної обмотки трансформатора через LC- фільтр, який складається з реакторів $L_{fa,b,c}$ та конденсаторів $C_{fa,b,c}$, підключається трифазний інвертор. Для контролю параметрів схеми використані датчики напруги та струму.

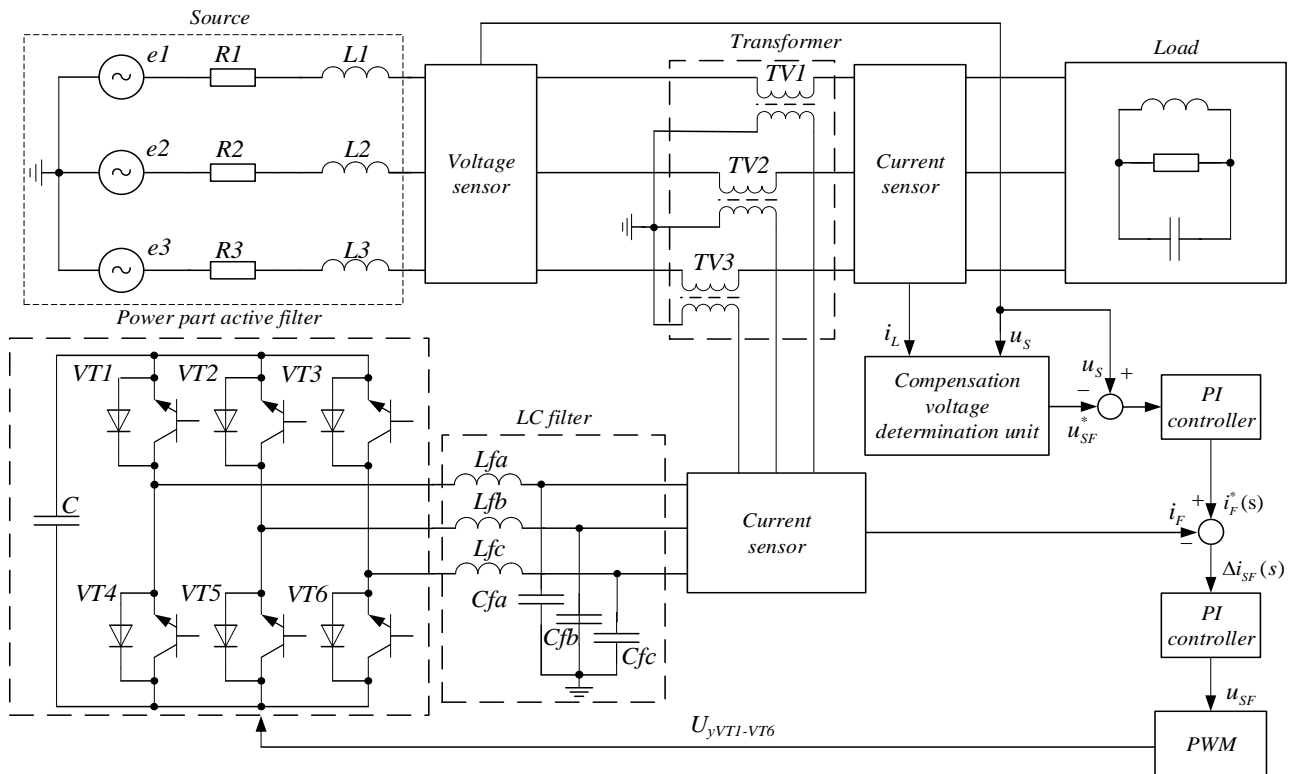


Рисунок 1 -- Функціональна схема трифазного послідовного силового активного фільтра

У блоці визначення заданої напруги компенсації, використовуючи алгоритм, виконується розрахунок напруги компенсації [5, 7]. Розрахована напруга компенсації поступає на блок системи автоматичного управління. У системі відбувається регулювання напруги для підтримки її на заданому рівні з урахуванням поточної напруги та струму фільтра. Блок формування імпульсів створює імпульси управління, які подаються на керуючий вхід транзисторного перетворювача [6]. Для створення системи автоматичного регулювання (САР) скористаємось відомим принципом визначення структури регуляторів [5]. При цьому представимо силову частину пристрою структурною схемою. В схемі виділимо контур струму (рис. 2) та контур напруги (рис. 3).

Як зазначає [9], передаточна функція активного фільтрокомпенсуючого пристрою (ФКП) за струмом має такий вигляд:

$$W_{Fi}(s) = \frac{i_F(s)}{u_m(s)} = \frac{U_c}{2L_f U_{tmax} s} = \frac{1}{K_{Fi} s}, \quad (1)$$

де i_F – струм силовій частині ФКП, u_m – напруга мережевої частини перетворювача, L_f – індуктивність реактора пасивного LC-фільтра, U_c – напруга на шині постійного струму, U_{tmax} – амплітуда опорної напруги широтно-імпульсної модуляції, $K_{Fi} = 2LU_{tmax} / U_c$ – коефіцієнт передачі за струмом.

Передаточна функція датчика струму визначається за формулою [9]:

$$W_{Ti}(s) = \frac{K_{Ti}}{T_{Ti} s + 1}, \quad (2)$$

де K_{Ti} – коефіцієнти передачі датчика струму, T_{Ti} – постійна часу датчика струму.

Як зазначено в [9] передаточна функція замкнутого контуру струму, налаштованого на симетричний оптимум має вигляд:

$$W_i(s) = \frac{1}{K_{Ti}} \cdot \frac{4T_{Ti} s + 1}{8T_{Ti}^3 s^3 + 8T_{Ti}^2 s^2 + 4T_{Ti} s + 1}, \quad (3)$$

Передаточна функція розімкненого контуру струму, налаштованого на симетричний оптимум має вигляд:

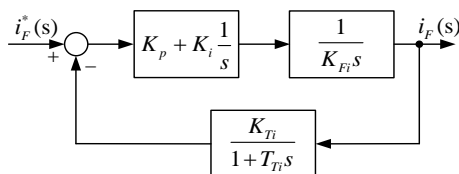


Рисунок 2 - Схема контуру регулювання струму

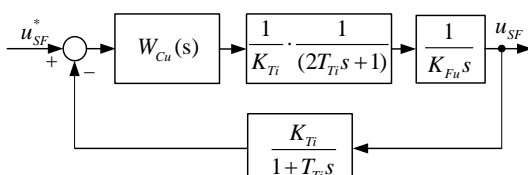


Рисунок 3 - Схема контуру регулювання напруги

$$W_{di}(s) = \frac{4T_{Ti}s + 1}{8T_{Ti}^2s^2(T_{Ti}s + 1)}; \quad (4)$$

Передаточна функція регулятора струму розраховується за формулою:

$$W_{di}(s) = W_{ci}(s) \cdot \frac{K_{Fi}}{1} \cdot \frac{T_{Ti}s + 1}{K_{Ti}}. \quad (5)$$

В результаті отримуємо:

$$W_{Ci}(s) = K_{Pi} + K_{Ii} \frac{1}{s}. \quad (6)$$

де K_{Pi} – коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора струму; K_{Ii} – коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора струму, які визначаються за формулами:

$$K_{Pi} = \frac{K_{Fi}}{2T_{Ti}K_{Ti}}; \quad (7)$$

$$K_{Ii} = \frac{K_{Fi}}{8T_{Ti}^2K_{Ti}}. \quad (8)$$

Передаточна функція по напрузі силового активного ФКП має вигляд:

$$W_{Fu}(s) = \frac{U_F(s)}{I_F(s)} = \frac{3U_A}{\sqrt{2}CU_{cm}s} = \frac{1}{K_{Fu}s}, \quad (9)$$

де U_F – напруга силової частини фільтра, C – ємність конденсатора, U_A – амплітудне значення напруги, $K_{Fu} = \sqrt{2}CU_{cm}/3U_A$ – коефіцієнт передачі перетворювача за напругою, U_{cm} – середнє значення напруги на конденсаторі.

Передаточна функція датчика напруги [9]:

$$W_{Tu}(s) = \frac{K_{Tu}}{T_{Tu}s + 1}, \quad (10)$$

де K_{Tu} – коефіцієнт передачі датчика напруги, T_{Tu} – постійна часу датчика напруги.

Функція замкнутого контуру напруги налаштованого на симетричний оптимум має вигляд:

$$W_i(s) = \frac{1}{K_{Tu}} \cdot \frac{4T_{Tu}s + 1}{8T_{Tu}^3s^3 + 8T_{Tu}^2s^2 + 4T_{Tu}s + 1}, \quad (11)$$

Поточна функція розімкнутого контуру напруги налаштованого на симетричний оптимум має вигляд:

$$W_{du}(s) = \frac{4T_{Tu}s + 1}{8T_{Tu}^2s^2(T_{Tu}s + 1)}; \quad (12)$$

Поточна функція регулятора напруги має вигляд:

$$W_{du}(s) = W_{cu}(s) \cdot \frac{K_{Fu}}{1} \cdot \frac{T_{Tu}s + 1}{K_{Tu}}. \quad (13)$$

В результаті отримуємо:

$$W_{cu}(s) = K_{Pu} + K_{Iu} \frac{1}{s}, \quad (14)$$

де K_{Pu} – коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора напруги; K_{Iu} – коефіцієнт підсилення інтегральної частини регулятора напруги, які визначаються за формулами відповідно:

$$K_{Pu} = \frac{K_{Ti}K_{Fu}}{2T_{Tu}K_{Tu}} \quad (15)$$

$$K_{Iu} = \frac{K_{Fu}K_{Ti}}{8T_{Tu}^2K_{Tu}} \quad (16)$$

де $K_{Fu} = \sqrt{2}CU_{cm}/3U_A$ – коефіцієнт передачі перетворювача.

Передаточна функція однофазного вольтодобавочного трансформатора, покладаючи Т-подібну схему заміщення, має вигляд:

$$W_{TV}(s) = \frac{K_1(T_1s + 1)}{T_2s + 1} \quad (17)$$

де $K_1 = R_3/k(R_1 + R_3)$ – коефіцієнт, R_1 – активний опір первинної обмотки, R_3 – активний опір обмотки намагнічування, k – коефіцієнт трансформації, $T_1 = (L_1 + L_3)/(R_1 + R_3)$ – постійна часу, L_1 – індуктивність первинної обмотки, L_3 – індуктивність обмотки намагнічування, $T_2 = L_3/R_3$ – постійна часу.

Використовуючи принцип підлеглого регулювання, синтезована структурна схема САР силового активного ФКП (рис. 4).

В віртуальному середовищі була створена модель системи автоматичного регулювання. Параметри системи автоматичного управління: $U_{max}=10$ В, $K_{Fi}=4,28 \cdot 10^{-5}$, $U_{cm}=700$ В, $U_A=311$ В, $K_{Tu}=0,0125$, $K_{Fu}=3,3 \cdot 10^{-3}$, $K_{Ti}=1$, $T_{Tu}=T_{Ti}=1 \cdot 10^{-5}$ с, $K_{Pi}=2,1 \cdot 10^{-5}$, $K_{Ii}=53475$ с⁻¹, $K_{Pu}=0,146$, $K_{Iu}=8,1$ с⁻¹.

В результаті дослідження роботи моделі були отримані осцилограми спрацювання контуру струму (рис. 5) та контуру напруги (рис. 6). При стрибкоподібному завданні струму в 0,01 с, час спрацювання контуру струму складає 0,00015 с. При стрибкоподібному завданні напруги в 0,01с, час спрацювання контуру струму складає 0,0011с.

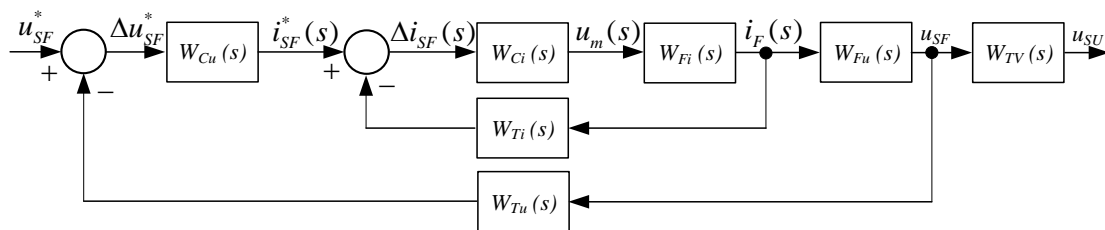


Рисунок 4 – Схема системи автоматичного управління

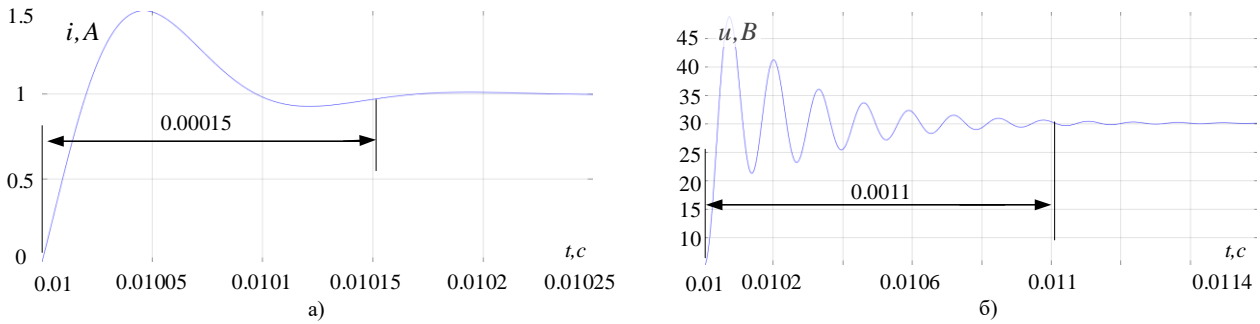


Рисунок 5 – Осцилограми: а) регулювання струму; б) регулювання напруги

Після відпрацювання системою автоматичного регулювання заданої напруги фільтру сигнал надходить на блок формування імпульсів. Де використовуючи метод широтно-імпульсної модуляції відбувається формування керуючих імпульсів. Блок-схема ШІМ наведена на (рис. 6).

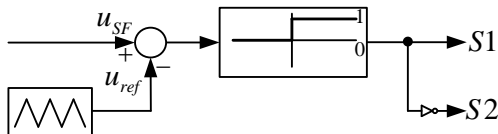


Рисунок 6 – Блок-схема реалізації методу ШІМ

Для дослідження роботи САР трифазного послідовного активного ФКП в середовищі візуального програмування [10] створена модель (рис. 7). На рисунку джерело живлення (*Three-phase source*) основної гармоніки напруги послідовно з'єднано з додатковими джерелами (*h3_A, B, C*) вищої гармоніки, спотворюючи результуючу напругу.

Послідовно з джерелами з'єднаний блок трансформаторів (*Transformer*). На (рис 8) приведена підсистема блоку (*Transformer*) яка складається з трьох однофазних вольтододаточних трансформаторів (*Linear Transformer 1-3*), які первинною обмот-

кою послідовно підключені до мережі та навантаження (*Reactor*). Вторинною обмоткою трансформатори підключені до пасивного *LC*-фільтра, який складається з конденсаторів (*Crf A, B, C*) та реакторів (*Lrf A, B, C*) та інвертора напруги, до якого підключений накопичувальний конденсатор *C*. Підтримка напруги на заданому рівні здійснюється блоком системи автоматичного регулювання (*SAR*). Управління перетворювачем здійснюється блоком широтно-імпульсної модуляції (*PWM*). Блоками (*Sine Wave A, B, C*) генерується компенсуюча напруга для кожної фази та відповідний її фазовий зсув.

Блок *SAR* (рис. 9) синтезований для кожної фази згідно з блок-схемою (рис. 4). Система складається з контурів напруги та контурів струму. Контур струму включає *PI*-контролер (*PI Controller 2,4,6*), датчики струму (*Multimeter 1,3,5*), блок передаточних функцій датчиків струму (*DT2,4,6*). Контур напруги включає *PI*-контролер (*PI Controller 1,2,3*), датчики струму (*Multimeter 2,4,6*), блок передаточних функцій датчиків струму (*DT2,4,6*). Блок *PWM* (рис. 10) синтезований для кожної фази згідно з блок-схемою (рис. 7). На (рис.11) приведена підсистема інвертора напруги (*3-phase IGBT converter*). Параметри моделі наведені у табл. 1.

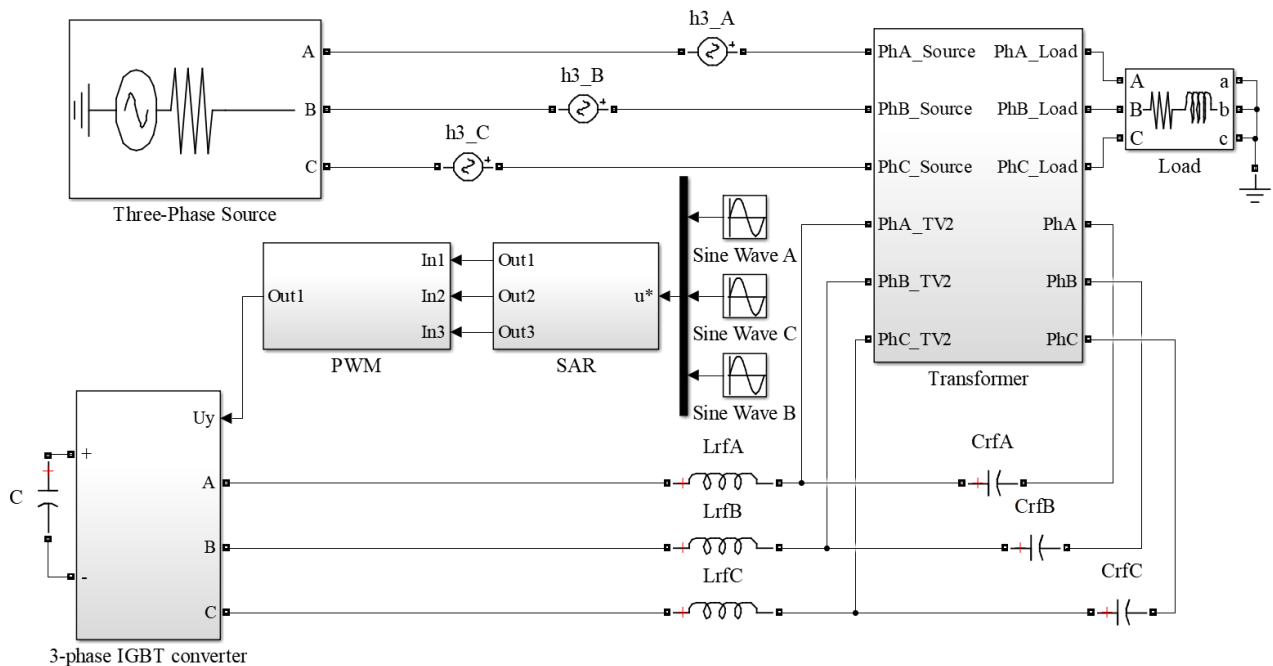


Рисунок 7 – Модель трифазного послідовного силового активного фільтра

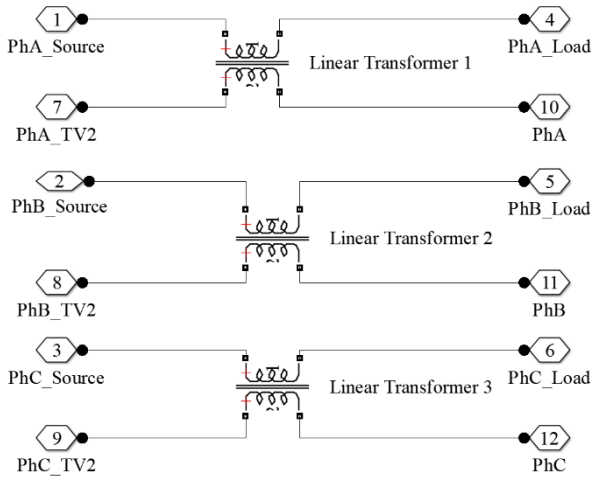


Рисунок 8 - Підсистема блоку *Transformer*

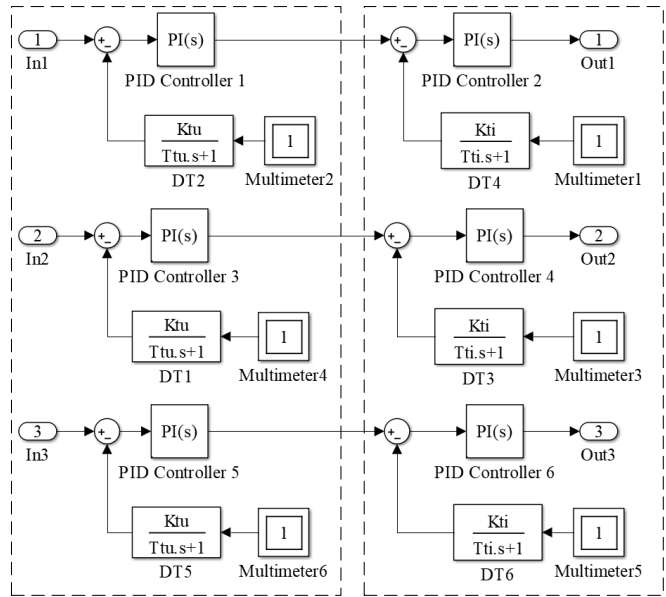


Рисунок 9 - Підсистема блоку *SAR*

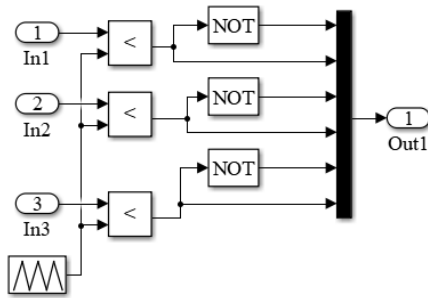


Рисунок 10- Підсистема *PWM*

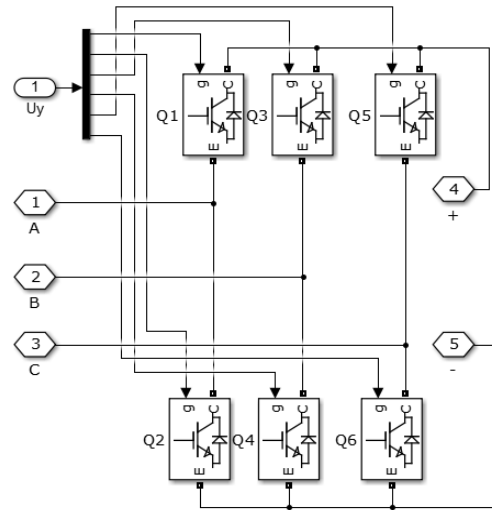


Рисунок 11 - Підсистема інвертора напруги

Таблиця 1 – Параметри досліджуваної моделі

Source	U, B	220
	$f, Гц$	50
AC voltage source1-3	U, B	20
	$f, Гц$	150
Reactor	$R, Ом$	2
	$L, Гн$	0,001
LC- фільтр	$L_{rfl-3}, Гн$	0,0025
	$C_{rfl-3}, Ф$	0,0005
Transformer	$P, Вт$	1000
	U_1, B	110
	U_2, B	380
	$R_1, Ом$	0,057
	$L_1, Гн$	0,00029
	$R_2, Ом$	0,67
	$L_2, Гн$	0,000353
	$R_3, Ом$	21,361
$L_3, Гн$	0,221	

Для дослідження роботи послідовного ФКП був проведений експеримент, суть якого в порівнянні спотворення напруги без фільтрокомпенсуючого пристрою та з його використанням (рис. 12-13). Для спотворення синусоїдальної форми напруги використано джерело третьої гармоніки.

В результаті аналізу гармонічного складу напруги при відсутності фільтрокомпенсуючого пристрою рівень спотворення напруги складає 12,83%. При використанні фільтрокомпенсуючого пристрою рівень спотворення напруги складає 0,53%.

Для оцінки ефективності запропонованого рішення був проведений експеримент з зміною номеру спотворюючих гармонік напруги та струму. Результати дослідження занесені до табл.і 2.

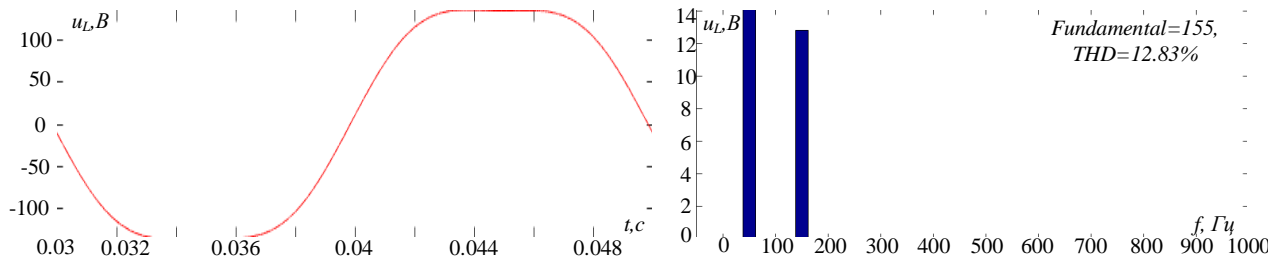


Рисунок 12 - Гармонічний склад без використання фільтрокомпенсуючого пристрою

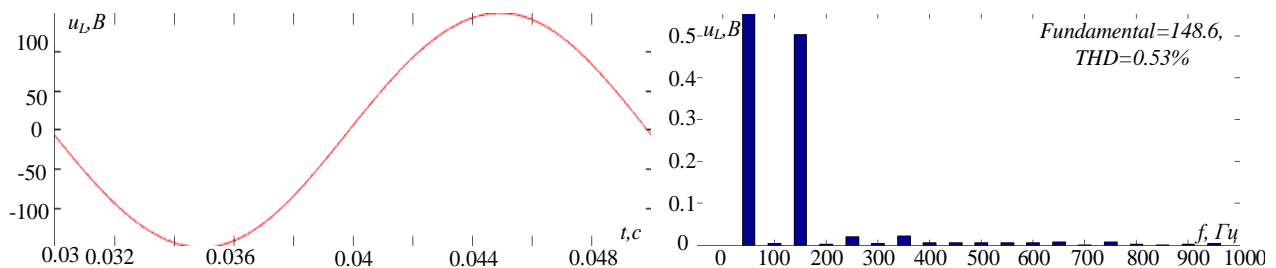


Рисунок 13 - Гармонічний склад з використанням фільтрокомпенсуючого пристрою

Таблиця 2 – Результати дослідження ефекту фільтрації зі зміною номеру спотворюючих гармонік

h_n	3	5	7	9	11
THD, %	0,53	0,93	1,41	1,92	2,46
Fundamental	148,6	148,6	148,6	148,6	148,6

В результаті дослідження роботи розробленої системи автоматичного регулювання в складі трифазного послідовного активного ФКП, було виявлено, що при зміні номерів спотворюючих гармонік напруги та струму THD знаходиться в діапазоні 0.53% – 2.46%.

ВИСНОВКИ. Використовуючи методи побудови систем автоматичного регулювання та принципу підлеглого регулювання розроблена САР для стабілізації та підтримці на заданому рівні напруги та струму трифазного послідовного активного ФКП. У середовищі візуального програмування розроблено модель пристрою з системою регулювання. В результаті серії експериментів виявлено, що використання запропонованого технічного рішення, призводить до зменшення рівня гармонічного спотворення напруги на 12,3%.

ЛІТЕРАТУРА

1. B. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad Power Quality: Problems and Mitigation Techniques, Wiley, New Jersey, 2015, 596 p. DOI: 10.1002/9781118922064
2. Ahmed F. Zobaa, Shady H. E. Abdel Aleem Power Quality in Future Electrical Power Systems,

Institution of Engineering and Technology, Stevenage, 2016, 421 p. DOI: 10.1049/PBPO092E

3. S. Mikkili, A. K. Panda, Power Quality Issues: Current Harmonics, CRC Press, Florida, 2018, 160 p. DOI 10.1201/9781315222479

4. Vlasenko R. V., Bialobrzheski O. V. “Limitations of current of the three-phase active power filter in the conditions of overload and short circuit”, Electrical engineering & electromechanics, 2018, no. 1, pp. 29-34. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.1.04

5. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning, IEEE Press, Piscataway, 2017, 454 p.

6. Bialobrzheskyi O., Gladyr A. “Influence of distortion of load current on parameters of components of the parallel power active filter”. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2017, no 5, pp. 77–85.

7. Lei Wang, Man-Chung Wong, Chi-Seng Lam (2018) Adaptive Hybrid Active Power Filters, Springer, New York City, 232 p.

8. Бондаренко С. С., Бялобржеський О. В., Власенко Р. В. Дослідження впливу трансформатора послідовного активного фільтра на якість напруги. Електротехніка та електроенергетика. 2018, № 1. С. 93–101. DOI 10.15588/1607-6761-2018-1-10

9. Popescu M., Bitoleanu A., Dobriceanu M., Suru V. “Optimum control strategy of three-phase shunt active filter”, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, no. 58, 441–446p.

10. Черных I. B. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink. Москва: DMK Press, 2011, 290 с.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THREE-PHASE SERIES POWER FILTER COMPENSATING DEVICE

S. Bondarenko, O. Bialobrzheskyi, M. Bezzub

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: sergi1994@gmail.com

Purpose. Development of system of automatic control of voltage and current of three-phase series-active filter compensating device. **Methodology.** Using methods of synthesis of automatic control systems and principle of subordinate coordinate control, structures of regulators and their parameters for subordinate structure of automatic control system of three-phase series active filter compensating device are determined. **Results.** A system for automatic control of a serially active filter-compensating device with subordinate control of two-contour coordinates is developed. For experimental testing, a model of a consistent active filter-compensation device was created. The experiments resulted in a 12.3% reduction in the nonlinear distortion factor. The results formulate conclusions on the rational application of the proposed solution. **Originality.** Power active filter compensating device are created to maintain power quality. The device connection method determines the parameter to be normalized. In case of voltage distortion, a series connection of the filter compensating device is used, which is connected to the network through a voltage transformer. Transformer is connected to power part of device by primary winding to network and load, secondary winding. During operation of the voltage transformer of the series active filter compensating device, the load current affects the compensation voltage, which negatively affects the compensation properties of the filter compensating device. In order to minimize the influence of the voltage transformer, an automatic control system is created in which compensation voltage is output to a predetermined level by means of voltage and current regulators. The known principle was used to determine the structure and parameters of current and voltage regulators. As a result, a system of subordinate control of coordinates of a three-phase serial filter compensating device is obtained. **Practical value.** As a result, a system of subordinate regulation of the coordinates of a three-phase series active filter compensating device is obtained. In a virtual environment, a model of the specified system is created. As a result of a system study, it was found that the use of the proposed technical solution leads to a decrease in the level of harmonic voltage distortion by 12.3%. References 10, tables 2, figures 13.

Key words: power quality, series active filter-compensating device, automatic control system, regulator.

REFERENCES

1. B. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad (2015), *Power Quality: Problems and Mitigation Techniques*, Wiley, New Jersey, 596 p. DOI: 10.1002/9781118922064
2. Ahmed, F. Zobaa, Shady, H. E. Abdel Aleem (2016), *Power Quality in Future Electrical Power Systems*, Institution of Engineering and Technology, Stevenage, 421 p. DOI: 10.1049/PBPO092E
3. S. Mikkili, A. K. Panda, (2018) *Power Quality Issues: Current Harmonics*, CRC Press, Florida, 160 p. DOI 10.1201/9781315222479
4. Vlasenko, R. V., Bialobrzheski, O. V. (2018), "Limitations of current of the three-phase active power filter in the conditions of overload and short circuit", *Electrical engineering & electromechanics*, no. 1, pp. 29–34. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.1.04
5. Akagi, H., Watanabe, E. H., Aredes, M. (2017), *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*, IEEE Press, Piscataway, 454 p.
6. Bialobrzheskyi, O., Gladyr, A. (2017), "Influence of distortion of load current on parameters of components of the parallel power active filter". *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no 5, pp. 77–85.
7. Lei Wang, Man-Chung Wong, Chi-Seng Lam (2018) *Adaptive Hybrid Active Power Filters*, Springer, New York City., 2018, 232 p.
8. Bondarenko, S. S., Bialobrzheskyi, O. V., Vlasenko, R. V. (2018), "Investigation of the influence of the transformer of a series active filter on the quality of voltage", *Electrical Engineering and Power Engineering*, no 1, pp. 93-101. DOI 10.15588/1607-6761-2018-1-10
9. Popescu, M., Bitoleanu, A., Dobriceanu, M., Suru, V. (2009), "Optimum control strategy of three-phase shunt active filter", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, no. 58, 441–446 p.
10. Chernyh, I. V. (2011) *SimPowerSystems: Modeling of electrical devices in Matlab*, DMK Press, Moscow, 290 p.

Стаття надійшла 26.12.2019.