

19. Singh B., Pandey R. Improved power quality buck-boost converter fed LLC resonant converter for induction heater. *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, 2016, pp. 1-6. doi:10.1109/ICPES.2016.7584248.
20. Zhang G., Zeng J., Yu S.Sh., Xiao W., Zhang Bo, Chen Si-Zhe, Zhang Y. Control Design and Performance Analysis of a Double-Switched LLC Resonant Rectifier for Unity Power Factor and Soft-Switching. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 44511-44521. doi:10.1109/ACCESS.2020.2978030.
21. Resonant LLC Converter Available at: [www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/resonant-llc-converter.html](http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/resonant-llc-converter.html) (accessed 15 May 2021).
22. Haque A. Valley-Fill Circuit for Power Quality Improvement. *IJRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2016, vol. 2, iss. 09, pp. 223-227.

Рецензент: О.В. Лаврова  
д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 01.10.2021

УДК 621.316.716.2

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.16

© Беззуб М.А.<sup>1</sup>, Бялобржеський О.В.<sup>2</sup>, Тодоров О.В.<sup>3</sup>, Рева І.В.<sup>4</sup>

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПОСЛІДОВНОГО СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА ЗА УМОВИ РІЗНИХ ПОКАЗНИКІВ ВІДХИЛЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

У роботі проведено дослідження функціонування послідовного силового активного фільтра за умови дії відхилень певних показників якості електричної енергії в мережевій напрузі. Для виявлення спотворення напруги використано підхід, заснований на процедурі перетворення Парка, реалізовано модель відповідної підсистеми. Формування імпульсів керування транзисторами послідовного силового активного фільтра виконано зі застосуванням методу релейного регулювання. Для дослідження ефективності запропонованого порядку компенсації з урахуванням функціонування силової частини послідовного силового активного фільтра синтезовано модель. Система забезпечує стабілізацію напруги при перевищенні, зниженні та коливаннях напруги відносно заданого рівня. За умови реалізації процесу симетрування відзначено істотне погіршення властивостей запропонованого рішення у разі наявності складових нульової послідовності. У процесі дослідження несинусоїдальності встановлено, що фільтрація короткочасних імпульсів напруги не виконується, оскільки спектр таких імпульсів дуже широкий.

**Ключові слова:** послідовний силовий активний фільтр, якість електроенергії, компенсація, релейне регулювання, перетворення Парка.

**M.A. Bezzub, O.V. Bialobrzheskyi, O.V. Todorov, I.V. Reva. Series active power filter functioning study under conditions of different indicators of power quality deviation. The purpose of the work is to develop a series active power filter control system to ensure**

<sup>1</sup> аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-5595-4464, [bezzubmax@gmail.com](mailto:bezzubmax@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0003-1669-4580, [seemal@kdu.edu.ua](mailto:seemal@kdu.edu.ua)

<sup>3</sup> аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0001-5703-6790, [olehtodorov@gmail.com](mailto:olehtodorov@gmail.com)

<sup>4</sup> аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-0005-6499, [cgdizainer@gmail.com](mailto:cgdizainer@gmail.com)

*the higher harmonics level reduction, asymmetry and short-term deviations of the current voltage value. Results: By means of the visual programming environment, a subsystem for determining the compensation voltage has been created and time diagrams of the distorted voltage and the compensated voltage have been obtained. Also, by means of visual programming environment, a simulation model of the power supply system node has been created. As a result, the time diagrams of the series power active filter with certain deviations in the quality of electrical energy have been obtained. Originality. A control system of a series power active filter has been proposed to ensure the reduction of the level of higher harmonics, asymmetry and short-term deviations of the current voltage value. The formation order of the compensation voltage of a series power active filter differs from the known ones; it using the Park transformation to determine the average values of the projections of the generalized voltage vector on the  $d$  and  $q$  axes corresponding to the sinusoidal symmetric system of three-phase voltages. The use of a filter-compensating device makes it possible to reduce asymmetry, the level of harmonic distortions and short-term deviations of the current voltage value. Practical meaning. The control system of the series active power filter to reduce the level of voltage high harmonics, asymmetry and short-term deviations of the current voltage value has been developed using an approach based on the Park transformation procedure. The analysis of the series active power filter operation under the conditions of deviation of different indicators of the electric power quality demonstrated the efficiency of the filter-compensating device.*

**Key words:** series active power filter, power quality, compensation, relay control, Park transformation.

**Постановка проблеми.** Проблема покращення якості та зменшення додаткових втрат електричної енергії, викликаних відхиленнями від допустимих значень показників якості електричної енергії, зумовлених споживачами з нелінійним навантаженням, є актуальною на промислових підприємствах. Негативна дія нелінійного навантаження полягає в тому, що воно призводить до несинусоїдальності, несиметрії, коливань та відхилень напруги.

Основні показники якості електроенергії встановлюються ДСТУ EN 50160. Стандарт визначає норми якості електричної енергії, виконання яких є однією з головних умов нормальної роботи споживачів. Для виконання цих норм використовують цільові пристрої, що забезпечують підвищення якості електричної енергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для компенсації вищих гармонік найбільш поширеними є резонансні фільтри, які забезпечують комплексне вирішення задачі підвищення якості електроенергії в мережі живлення. В умовах несиметрії вищих гармонік симетричні фільтруючі пристрої як резонансні фільтри, так і смугові фільтри, втрачають властивості ефективної фільтрації [1]. Отже, необхідна розробка нових пристроїв, здатних в умовах несиметрії вищих гармонік напруги здійснювати їхню ефективну фільтрацію.

Пристрої для симетрування підрозділяються на декілька категорій [2]. Перша – конденсаторні та електромагнітні шунтосиметруючі пристрої. Недолік – висока ціна реактора. Друга категорія – компенсаційні симетруючі пристрої, які працюють за рахунок підключення нульового проводу трансформатора до компенсаційної обмотки симетруючого пристрою. Недоліком останніх є малий діапазон симетрування. Як перші, так і другі, втрачають властивість за умови зміни рівня несиметрії.

Для усунення коливань та суттєвих відхилень напруги в електричних мережах використовують метод поділу навантажень. Найбільш проста схема для поділу навантажень заснована на використанні здвоєного реактора [3].

В останні роки широкого розповсюдження набули силові активні фільтри. Широкі можливості силових активних фільтрів дозволяють використовувати їх для вирішення більшості завдань покращення якості електроенергії – фільтрація гармонік, керування реактивною потужністю для корекції  $\cos \varphi$ , регулювання напруги, балансування несиметрії навантаження, зниження дози флікери та інші [4].

Характеристикам силових активних фільтрів присвячено багато досліджень, в ході виконання яких покращувався рівень компенсації порушень якості електричної енергії, підвищувалась швидкодія та удосконалювались методи керування фільтрокомпенсуючими пристроями.

Зокрема в роботі [5] автори ставлять за мету покращення якості напруги за допомогою послідовного силового активного фільтра на основі рq-теорії миттєвих потужностей. Результати роботи показують, що за умови функціонування запропонованого послідовного силового активного фільтра при провалах та коливаннях напруги відбувається покращення якості напруги. Недоліком використовуваного методу є визначення напруги компенсації за функцією струму, що може призвести до некоректної роботи комплексу послідовного силового активного фільтра в умовах спотворення струму.

Покращення якості напруги, спотвореної вищими гармоніками, за допомогою послідовного силового активного фільтра висвітлено також в роботі [6]. В результаті робота послідовного силового активного фільтра при наявності вищих гармонік в напрузі призводить до зменшення загальних гармонійних спотворень (англ. total harmonic distortion – THD). Але автори проводять дослідження для умов дії гармонік певного порядку. Не досліджена ефективність роботи фільтрокомпенсуючого пристрою при інших відхиленнях якості електричної енергії.

Також дослідження підвищення якості напруги за допомогою послідовного силового активного фільтра виконано в роботі [7]. Формування заданої напруги відбувається фактично за струмом, який автори визначають за теорією потужності Фрізе. Додатково в задану напругу компенсації вводять складові зворотної та нульової послідовностей. В обох випадках використовують невизначені коефіцієнти пропорційності. Наведені в [7] часові діаграми показують ефективність пристрою, який значно зменшує спотворення напруги, що викликані гармонічними складовими. Але діаграми ілюструють порушення компенсації напруги з несиметричним характером. Не відмічена ефективність пристрою при компенсації високочастотних складових напруги. При цьому в певних дослідженнях [8] встановлено, що під час роботи фільтрокомпенсуючого пристрою струм навантаження створює додаткове падіння напруги в обмотці трансформатора, що призводить до некоректної роботи фільтруючого комплексу. Через конструктивні особливості пристрою неможливо оцінити ефективність послідовного силового активного фільтра за умови несиметрії напруги.

Аналізуючи ефективність уніфікованого кондиціонера якості електроенергії, в роботі [9] виявлено зменшення спотворень напруги та струму навантаження. Короткочасні імпульси напруги та струму залишилися, оскільки послідовно з'єднаний трансформатор має значну індуктивність обмоток, що погіршує загальні показники якості.

Таким чином, комплексна задача підвищення якості електричної енергії послідовним силовим активним фільтром в умовах несинусоїдальності, несиметрії та суттєвих коливань напруги залишається актуальною.

**Мета статті** – розробка системи управління послідовним силовим активним фільтром для забезпечення зниження рівня вищих гармонік, несиметрії та короткотривалих відхилень діючого значення напруги навантаження.

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення показників спотворення напруги використовують різноманітні способи виявлення рівня спотворення, ґрунтуючись на існуючих нормах [10]. Зважаючи на мету поставленої задачі, необхідно визначити опорну напругу, яка була б максимально наближена до симетричної та синусоїдальної. В такому випадку раціонально використати підхід, який ґрунтується на процедурі перетворення Парка [9]. Перевагою такого підходу є його простота, оскільки розрахунки проводяться лише в двох координатах та не вимагають великої кількості операцій, що зменшує навантаження на обчислювальну систему.

Алгоритм визначення напруги компенсації реалізують в наступному порядку. За допомогою датчиків напруги вимірюють поточну напругу мережі  $\mathbf{u}_{S,abc} = [u_{S,a} \ u_{S,b} \ u_{S,c}]^T$ . Виконують трансформацію сигналу напруги мережі з координат  $abc$  до  $\alpha\beta$ :

$$\mathbf{u}_{S,\alpha\beta} = \mathbf{T}_{\alpha\beta}^{abc} \mathbf{u}_{S,abc} = [u_{S,\alpha} \ u_{S,\beta}]^T, \quad (1)$$

де  $\mathbf{T}_{\alpha\beta}^{abc}$  – матриця трансформації  $abc$  до  $\alpha\beta$ :

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta}^{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Визначають поточну фазу напруги основної частоти:

$$\omega_1 t = \theta = \arctg \frac{u_{S,\alpha}}{u_{S,\beta}}, \quad (3)$$

Виконують трансформацію сигналу напруги мережі з координат *abc* до *dq* координат:

$$\mathbf{u}_{S,dq} = \mathbf{T}_{dq}^{abc} \mathbf{u}_{S,abc} = [u_{S,d} \ u_{S,q}]^T, \quad (4)$$

де  $\mathbf{T}_{dq}^{abc}$  – матриця трансформації *abc* до *dq*:

$$\mathbf{T}_{dq}^{abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} -\sin(\omega_1 t) & -\sin(\omega_1 t - 120^\circ) & -\sin(\omega_1 t + 120^\circ) \\ \cos(\omega_1 t) & \cos(\omega_1 t - 120^\circ) & \cos(\omega_1 t + 120^\circ) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

За сутністю, при зазначеному перетворенні координат, проекції напруги на осі *dq* є векторами з постійною довжиною. В умовах несинусоїдальності та несиметрії проекції напруги на осі *dq* системи координат є складними періодичними функціями. Тому наступним кроком визначають постійні складові напруги мережі в координатах *dq* шляхом усереднення на періоді повторюваності  $T_c$ :

$$\bar{u}_{S,d} = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t u_{S,d} dt; \quad (6)$$

$$\bar{u}_{S,q} = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t u_{S,q} dt, \quad (7)$$

В результаті визначають амплітуду узагальненого вектора напруги мережі в координатах *dq*:

$$U_{S,dq} = \sqrt{\bar{u}_{S,d}^2 + \bar{u}_{S,q}^2}. \quad (8)$$

Зважаючи на наявність сталих відхилень напруги від номінального її значення, співвідносять амплітуду вектора напруги мережі в координатах *dq* з її номінальним наперед заданим значенням  $U_{S,dq}^{nom}$ :

$$U_{S,dq}^* = U_{S,dq}^{nom} / U_{S,dq}. \quad (9)$$

Визначають номінальну миттєву напругу мережі основної частоти прямої послідовності в координатах *abc*:

$$\mathbf{u}_{S,abc1+} = \mathbf{T}_{abc}^{dq-1} [\bar{u}_{S,d} \ \bar{u}_{S,q}]^T U_{S,dq}^* = \mathbf{T}_{abc}^{dq-1} \bar{\mathbf{u}}_{S,dq} U_{S,dq}^* = [u_{S,a1+} \ u_{S,b1+} \ u_{S,c1+}]^T. \quad (10)$$

Визначають задану напругу компенсації:

$$\mathbf{u}_{SF,abc}^* = -(\mathbf{u}_{S,abc} - \mathbf{u}_{S,abc1+}) = [u_{SF,a} \ u_{SF,b} \ u_{SF,c}]^T \quad (11)$$

На підставі запропонованого рішення за виразами (1-11) в середовищі візуального програмування Matlab Simulink створено підсистему визначення напруги компенсації (рисунок 1).

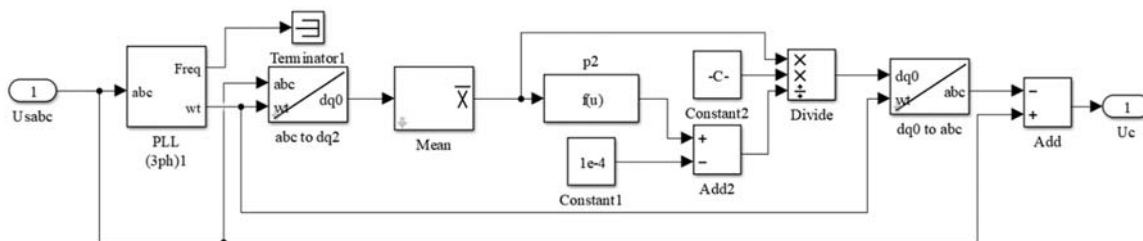


Рис. 1 – Візуальна модель системи визначення напруги компенсації

Проведено експеримент, в ході якого на вхід моделі (блок  $U_{sabc}$ ) подається спотворена напруга з певним рівнем несиметрії (рис. 2а) [9]. Після проведених обчислень модель на виході

формує напругу компенсації. При сполученні спотвореної напруги з напругою компенсації отримано компенсовану напругу, в якій повністю відсутні зазначені спотворення (рис. 2б).

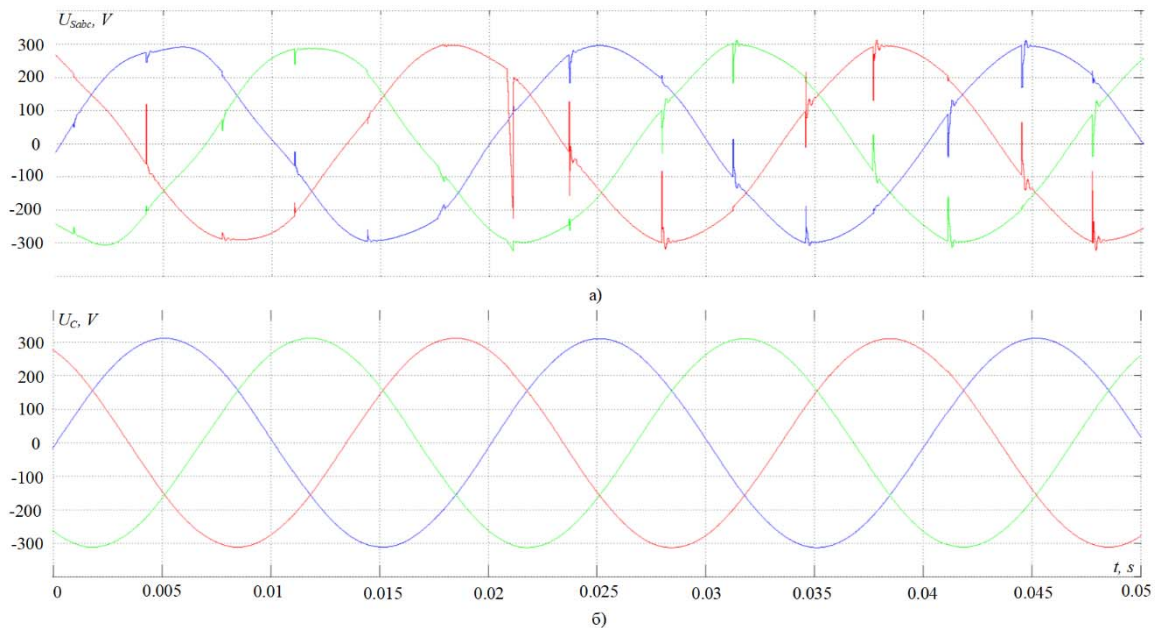


Рис. 2 – Часові діаграми: а) – спотворена напруга, б) – скомпенсована напруга

Для дослідження ефективності пропонованого порядку компенсації, з урахуванням функціонування силової частини активного фільтра, синтезовано відповідну модель. Як правило, в структурі послідовного силового активного фільтра виділяють такі блоки [11]: блок визначення напруги компенсації; блок регулювання; блок формування імпульсів управління; керований напівпровідниковий перетворювач; вольтодобатні трансформатори; згладжуючі фільтри.

Для перетворення напруги компенсації в сигнал керування трифазним напівпровідниковим перетворювачем використовують блок формування імпульсів управління. Серед методів формування імпульсів управління транзисторами силового активного фільтра найпоширеніші два: широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) з постійною частотою та релейне регулювання (РР) [12].

Метод ШІМ реалізується шляхом порівняння опорного сигналу з похибкою параметру регулювання. За допомогою пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора відбувається підсилення похибки. Параметри регулятора розраховують у відповідності з абсолютним значенням критерію оптимальності. Недоліком ШІМ є те, що налаштування параметрів регулятора відбувається в залежності від режиму роботи навантаження.

РР виконує перемикання силових ключів в момент, коли похибка перевищує зону гістерезису. Тому частота перемикання силових ключів змінна. Перевагою РР є його простота. Недоліком даного способу є субгармоніки, які виникають при зміні частоти комутації. В порівнянні з ШІМ метод РР має більш просту будову, зокрема, відсутні складні налаштування ПІ-регулятора, має кращі показники регулювання при роботі з різними сигналами напруги мережі [13]. Зважаючи на зазначені переваги РР, для подальших досліджень обрано систему керування силовим активним фільтром з РР.

Для дослідження фільтрокомпенсаційних властивостей послідовного силового активного фільтра в середовищі візуального програмування створено імітаційну модель вузла системи електропостачання (рис. 3). Модель складається з джерела напруги (*Source*)  $U_s = 300$  В,  $f = 50$  Гц; вольтодобатного трансформатора (*Transformers Block*)  $U_{L1} = 380$  В,  $U_{L2} = 380$  В,  $R_1 = 0,072$  Ом,  $R_2 = 0,072$  Ом,  $L_1 = 0,0022$  Гн,  $L_2 = 0,0022$  Гн; навантаження (*Load*)  $U_L = 380$  В,  $f = 50$  Гц,  $P_L = 5000$  Вт; блоку визначення напруги компенсації (*Compensation voltage*); інвертора (*Inverter*); конденсатора (С)  $C = 1500$  В; блоку датчика напруги мережі ( $U_s$ ).

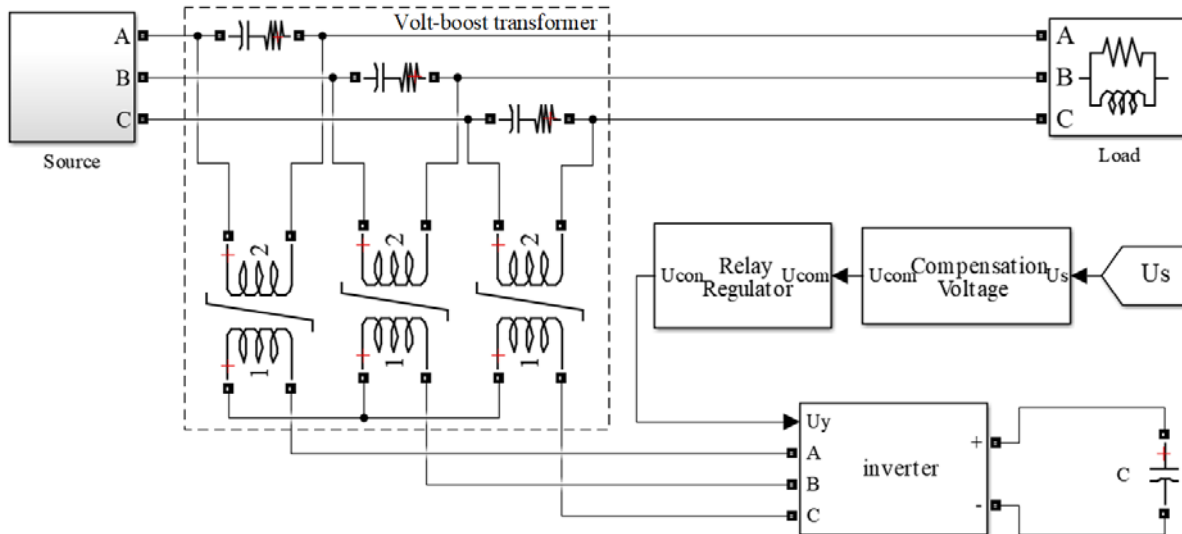


Рис. 3 – Візуальна модель послідовного силового активного фільтра

В першу чергу досліджено роботу пристрою за умови незначних спотворень. На рис. 4 наведено часові діаграми напруги мережі при її збільшенні (0,05-0,15 с), при провалі (0,15-0,25 с) та коливаннях (0,3-0,45 с). В даному випадку пристрій забезпечує стабілізацію напруги (рис. 4б) з діючим значенням за кожною з фаз  $U_{rms} = 300$  В. Додатково виконано контроль напруги конденсатора в колі знакопостійної напруги. Напруга на конденсаторі залишається майже незмінною (відхилення не перевищує 0,1%).

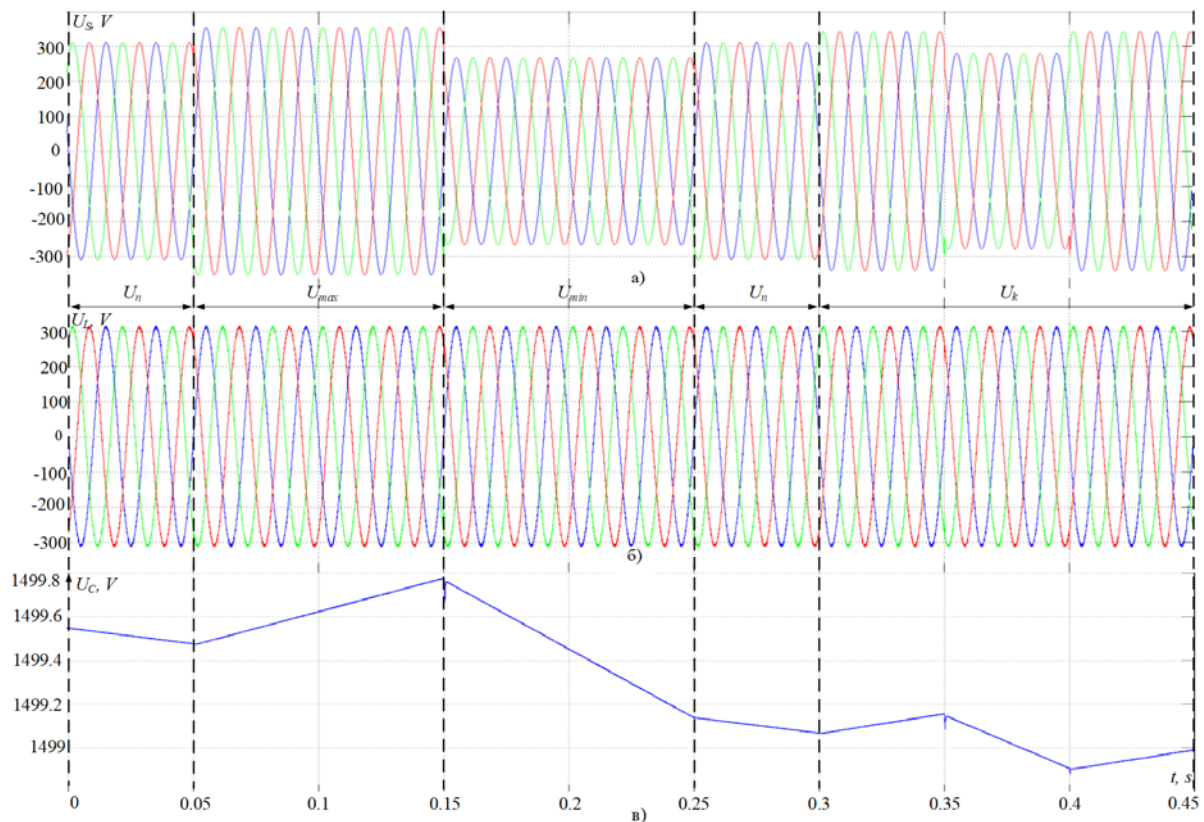


Рис. 4 – Осцилограми: а) перенапруга, провал та коливання напруги; б) скомпенсована напруга; в) напруги конденсатора інвертора

Проведено дослідження функціонування схеми пристрою (рис. 3) в умовах несиметрії. Введено до напруги мережі складові зворотної та нульової послідовностей відповідно до виразу:

$$\begin{cases} u_a = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \theta_{U_1}) + \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t + \theta_{U_0}) + \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + \theta_{U_2}); \\ u_b = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_{U_1}) + \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t + \theta_{U_0}) + \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_{U_2}); \\ u_c = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_{U_1}) + \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t + \theta_{U_0}) + \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_{U_2}), \end{cases} \quad (12)$$

де  $u_a, u_b, u_c$  – напруга фаз  $A, B, C$ , відповідно,  $U_1, U_2, U_0$  – діюче значення напруги прямої, зворотної та нульової послідовності, відповідно,  $\theta_{U_1}, \theta_{U_2}, \theta_{U_0}$  – початкова фаза напруги прямої, зворотної та нульової послідовності, відповідно.

Для дослідження режиму з несиметрією напруги проведено три досліді. В першому досліді введено в напругу мережі складову зворотної послідовності (таблиця 1) на рівні 5%.

Таблиця 1

Напруга навантаження та мережі при введенні в останню складових зворотної, нульової послідовності та їх комбінації

	Пряма послідовність	Зворотна послідовність	Нульова послідовність	Зворотна та нульова послідовність
Напруга мережі	$U_1=310$ В	$U_1=311$ В	$U_1=310$ В	$U_1=310$ В
	$U_2=0$ В	$U_2=15$ В	$U_2=0$ В	$U_2=15$ В
	$U_0=0$ В	$U_0=0$ В	$U_0=15$ В	$U_0=15$ В
Напруга навантаження	$U_1=310$ В	$U_1=310$ В	$U_1=310$ В	$U_1=310$ В
	$U_2=0$ В	$U_2=0.05$ В	$U_2=5$ В	$U_2=4$ В
	$U_0=0$ В	$U_0=0$ В	$U_0=14$ В	$U_0=14$ В

З отриманих даних видно, що після компенсації рівень напруги зворотної послідовності зменшився з 15 В до 0,05 В. Таким чином, рівень несиметрії не перевищує 1%.

Другий дослід виконаний при введенні в напругу мережі складової нульової послідовності (таблиця 1) на рівні 5%.

Отримані дані показують зміну рівня напруги нульової послідовності з 15 В до 14 В, при цьому також зростає рівень напруги зворотної послідовності до 5 В. Таким чином, симетрування зазначеної складової є незадовільним.

Для визначення комбінованого впливу напруг зворотної та нульової послідовності виконаний третій дослід, отримані дані показані в таблиці 1.

Аналіз даних показує, що компенсація напруги зворотної послідовності погіршилась з 15 В до 4 В, за умови фактично відсутності компенсації напруги нульової послідовності – з 15 В до 14 В. Таким чином, компенсація складових нульової послідовності відсутня, що може бути спричинене двома факторами: схемою з'єднання вольтодобатних трансформаторів або відсутністю складових нульової послідовності в порядку визначення напруги компенсації.

Розглянемо функціонування пристрою в умовах наявності вищих гармонік, що генеруються нелінійними елементами сторонніх потужних навантажень та спотворюють напругу мережі. Ефективність компенсації вищих гармонік дослідимо шляхом завдання в складі мережевої напруги п'ятої гармоніки:

$$u = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \theta_{U_1}) + \sqrt{2}U_5 \sin(5\omega t + \theta_{U_5}), \quad (13)$$

де  $U_1, U_5$  – діюче значення напруги основної та п'ятої гармоніки, відповідно;  $\theta_{U_1}, \theta_{U_5}$  – початкова фаза напруги основної та п'ятої гармоніки, відповідно. Прийmemo  $U_1 = 300$  В,  $U_5 = 30$  В. В результаті роботи схеми забезпечується зниження коефіцієнту загальних гармонійних спотворень напруги мережі (рис. 5) з  $THD_{U_s} = 9.67\%$ , до  $THD_{U_s} = 1.07\%$ . В напрузі з'являються гармоніки високого порядку, які зумовлені режимом імпульсної модуляції транзисторного перетворювача. Додатково проведено дослідження за умови дії мережевої напруги, спотвореної короткочасними імпульсами, зумовленими комутаційними процесами сторонніх споживачів (на схемі не наведені) (рис. 6).

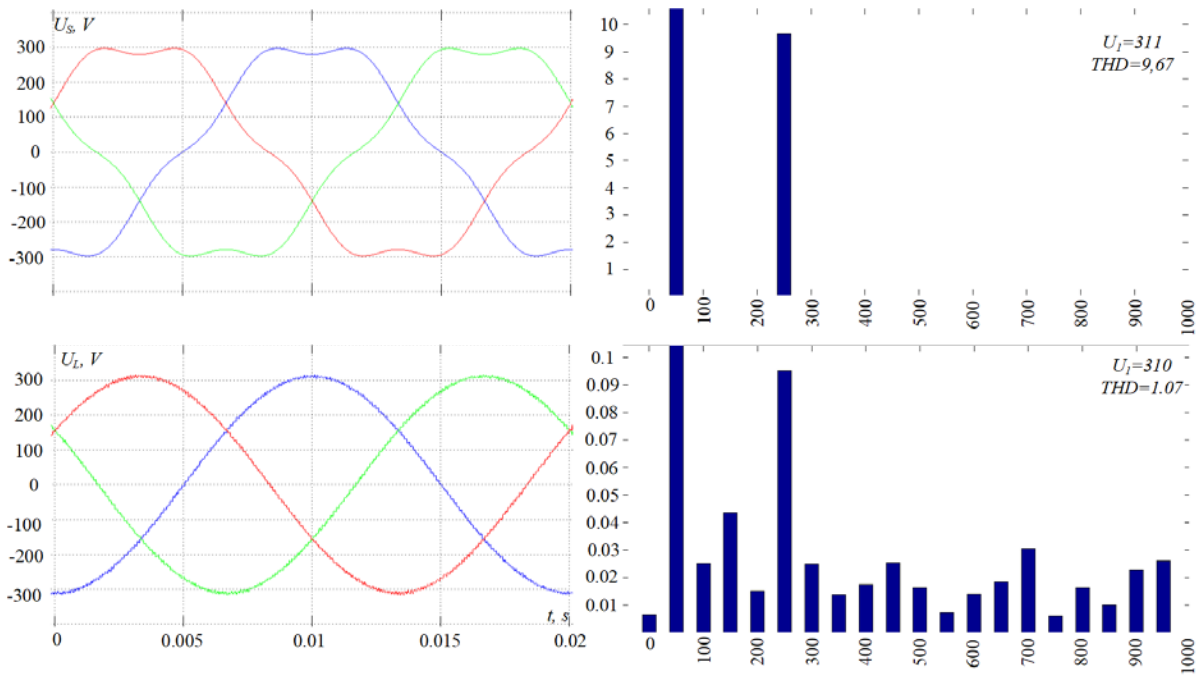


Рис. 5 – Осцилограми напруги мережі та на навантаженні при наявності в ній п'ятої гармоніки

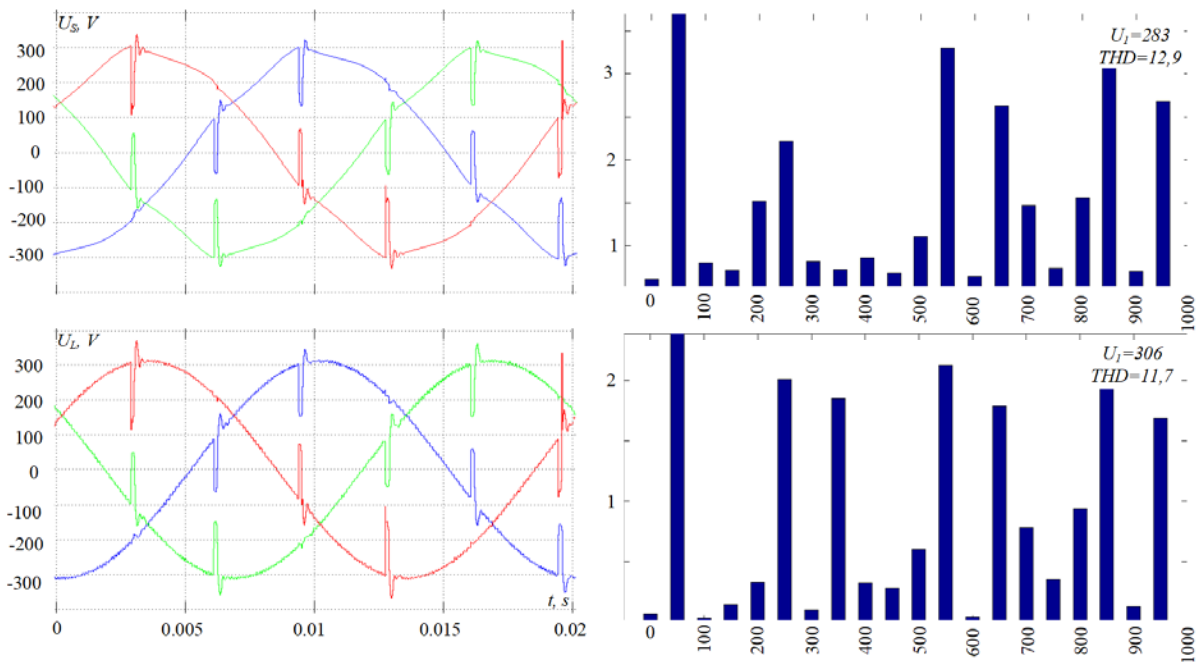


Рис. 6 – Осцилограми напруги мережі та на навантаженні при наявності в ній широкого спектру гармоніки

В режимі фільтрації загальна форма напруги наблизилась до синусоїди, зменшилися гармоніки напруги 5, 11, 13, 15, 17. Особливої уваги вартий спектр мережевої напруги з позиції розподілу гармонік, порядок яких перевищує 17. Це широкий спектр обумовлений імпульсами низької тривалості. В результаті рівень загальних гармонійних спотворень напруги зменшився з  $THD_{U_s} = 12.9\%$  до  $THD_{U_s} = 11.7\%$ . Це вказує на те, що пропонуване рішення реалізації пристрою за умови електромагнітної інерційності вольтододатного трансформатора не забезпечує компенсацію спотворення такого характеру.



**Висновки**

1. Розроблено порядок формування напруги компенсації послідовного силового активного фільтру, який відрізняється від відомих використанням перетворення Парка для визначення середніх значень проєкцій узагальненого вектора напруги на осі  $d$  та  $q$ , які відповідають синусоїдальній симетричній системі трифазних напруг.

2. При перенапругах, провалах та коливаннях напруги запропонована схема силового активного фільтру забезпечує стабілізацію напруги на заданому рівні зі незначним впливом пульсацій напівпровідникового перетворювача. У випадку чергування коливань напруги мережі на пруга накопичувального конденсатора змінюється зневажливо мало.

3. За умови реалізації процесу симетрування відзначено суттєве погіршення симетруючих властивостей запропонованого рішення у разі наявності складових нульової послідовності. Зазначене явище потребує введення в процедуру визначення напруги компенсації складових нульової послідовності та/або визначення впливу схеми з'єднання вольтододатних трансформаторів.

4. За умови введення в склад мережевої напруги складової п'ятої гармоніки спостерігається суттєва її компенсація, це супроводжується незначним ростом високочастотних гармонік, зумовленим режимом напівпровідникового перетворювача керованого релейними регуляторами напруг фаз. Встановлено, що фільтрація короткочасних імпульсів напруги не виконується, тому що спектр таких імпульсів дуже широкий.

**Перелік використаних джерел:**

1. Півняк Г.Г. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папайка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – 2-ге вид., переробл. і допов. – Дніпро: НТУ «ДП», 2018. – 148 с.
2. Бурбело М. Умови симетрування електричних навантажень розподільних мереж за допомогою СТАТКОМ / М. Бурбело, Ю. Войтюк, Ю. Лобода // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 139-144.
3. Ivanisenko I. Methods and Algorithms of load balancing / I. Ivanisenko // Information technologies and knowledge. – 2015. – Vol. 9, № 4. – Pp. 340-375.
4. Bondarenko S. Combined voltage control system of series single-phase filter-compensating device / S. Bondarenko, O. Bialobrzheskyi, O. Todorov // IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – 2020. – Pp. 21-25. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160216>.
5. Improvement of Voltage Profile by Series Active Filter in Grid-Connected PV System / R. Senapati, S. Prajna Mishra, P. Sharma, R. Narayan Senapati, B. Dash // Advances in Electrical Control and Signal Systems. – 2019. – Vol. 12, no. 23. – Pp. 581-593. – Mode of access: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5262-5\\_43](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5262-5_43).
6. Different control strategies applied to series active filters / S.P. Litran, P. Salmerón, J.R. Vazquez, R.S. Herrera // Renewable energy & power quality journal. – 2007. – № 1. – Pp. 413-417. – Mode of access: <https://doi.org/10.24084/REPQJ05.305>.
7. Kumar K.P. Design of series active filter for power quality improvement / K.P. Kumar, K. Ilango // International Conference on Electronics, Communication and Computational Engineering (ICECCE). – 2014. – Pp. 78-82. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ICECCE.2014.7086639>.
8. Bondarenko S. Combined voltage control system of series single-phase filter-compensating device / S. Bondarenko, O. Bialobrzheskyi, O. Todorov // IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – 2020. – Pp. 21-25. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160216>.
9. Unified Power Quality Conditioner Electrical Complex for Compensation Influence of Sharply Variable Loading / M. Bezzub, O. Todorov, O. Bialobrzheskyi, I. Reva // IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – 2021. – Pp. 222-227. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570033>.
10. Standard EN 50160. Voltage Characteristics in Public Distribution Systems. – 2004. – 16 p.
11. Bitoleanu A. Shunt active power filter. Overview on the reference current methods calculation and their implementation / A. Bitoleanu, M. Popescu // 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE). – 2013. – Pp. 1-12. – Mode of access:

<https://doi.org/10.1109/ISEEE.2013.6674384>.

12. Власенко Р. Порівняння методів компенсації неактивної потужності трифазним силовим активним фільтром з адаптивним релейним регулятором струму / Р. Власенко, О. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – № 2. – С. 20-27.
13. Vlasenko R. Fuzzy-pid controller in the method pulse width modulation converter active power filter / R. Vlasenko, S. Bondarenko // *Electrical and computer systems*. – 2018. – № 28. – Pp. 8-15. – Mode of access: <https://doi.org/10.15276/eltecs.28.104.2018.01>.

#### References:

1. Pivniak G.G., Zhezhelenko I.V., Papaika Iu.A. *Energetichna efektyvnist' sistem elektropostachannia : monografiia* [Energy efficiency of power supply systems: monograph]. Dnipro, NTU «DP» Publ., 2018. 148 p. (Ukr.)
2. Burbelo M., Voitiuk Iu., Loboda Iu. Umovi simetruvannia elektrichnikh navantazhen' rozpodil'nikh merezh za dopomogoiu STATKOM [Conditions for balancing electrical loads of distribution networks with the help of STATKOM]. *Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2016, № 2, pp. 139-144. (Ukr.)
3. Ivanisenko I. *Methods and Algorithms of load balancing*. Information technologies and knowledge, 2015, vol. 9, № 4, pp. 340-375.
4. Bondarenko S., Bialobrzheskyi O., Todorov O. Combined voltage control system of series single-phase filter-compensating device. *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2020, pp. 21-25. doi:10.1109/ESS50319.2020.9160216.
5. Senapati R., Prajna Mishra S., Sharma P., Narayan Senapati R., Dash B. Improvement of Voltage Profile by Series Active Filter in Grid-Connected PV System. *Advances in Electrical Control and Signal Systems*, 2019, vol. 12, no. 23, pp. 581-593. doi:10.1007/978-981-15-5262-5\_43.
6. Litran S.P., Salmerón P., Vazquez J.R., Herrera R.S. Different control strategies applied to series active filters. *Renewable energy & power quality journal*, 2007, № 1, pp. 413-417. doi:10.24084/REPQJ05.305.
7. Kumar K.P., Ilango K. Design of series active filter for power quality improvement. *International Conference on Electronics, Communication and Computational Engineering (ICECCE)*, 2014, pp. 78-82. doi:10.1109/ICECCE.2014.7086639.
8. Bondarenko S., Bialobrzheskyi O., Todorov O. Combined voltage control system of series single-phase filter-compensating device. *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2020, pp. 21-25. doi:10.1109/ESS50319.2020.9160216.
9. Bezzub M., Todorov O., Bialobrzheskyi O., Reva I. Unified Power Quality Conditioner Electrical Complex for Compensation Influence of Sharply Variable Loading. *IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2021, pp. 222-227. doi:10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570033.
10. Standard EN 50160. Voltage Characteristics in Public Distribution Systems, 2004. 16 p.
11. Bitoleanu A., Popescu M. Shunt active power filter. Overview on the reference current methods calculation and their implementation. *4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, 2013, pp. 1-12. doi:10.1109/ISEEE.2013.6674384.
12. Vlasenko R., Bialobrzheskyi O. Porivniannia metodiv kompensatsii neaktivnoi potuzhnosti trifaznim silovim aktivnim fil'trom z adaptivnim releinim regulatorom strumu [Comparison of inactive power compensation methods with three-phase power active filter with adaptive relay current regulator]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika – Electrical Engineering and Power Engineering*, 2014, № 2, pp. 20-27. (Ukr.)
13. Vlasenko R., Bondarenko S. Fuzzy-pid controller in the method pulse width modulation converter active power filter. *Electrical and computer systems*, 2018, № 28, pp. 8-15. doi:10.15276/eltecs.28.104.2018.01.

Рецензент: В.В. Прус,  
д-р техн. наук, доц., КрНУ

Стаття надійшла 21.10.2021