

# ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

## TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 621.314

DOI 10.20535/1813-5420.1.2026.352969

В.П. Грудська<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-7775-6397

Г.Г. Большаков<sup>1</sup>, аспірант, ORCID 0009-0002-3339-7625

<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ТИРИСТОРНИЙ КОМПЕНСАТОР ПОСТІЙНОЇ СКЛАДОВОЇ У СПЕКТРІ МЕРЕЖНОГО СТРУМУ НЕЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

*Стрімкий науково-технічний прогрес практично в усіх сферах людської життєдіяльності призвів до появи великої кількості споживачів електроенергії зі специфічними характеристиками і швидкозмінними графіками споживання струму. Як правило, використання таких пристроїв зумовлює їх негативний вплив на функціонування систем електропостачання, знижує ефективність і термін служби електрообладнання, а в деяких випадках унеможливує паралельне підключення споживачів до однієї електромережі. Поширеним способом підвищення якості електроенергії у системах з нелінійним навантаженням є використання у вузлах навантаження коригуючих пристроїв, зокрема різноманітних фільтрів, які забезпечують електромагнітну сумісність споживачів та оптимізують режим роботи електричної мережі. На даний час найбільш ефективними вважаються фільтри, в яких відбувається частотне перетворення енергії, що відбирається від джерела напруги неосновної гармоніки у мережі (режим фільтрації) або від зовнішнього реактивного елемента (режим компенсації). У даній роботі досліджені функціональні можливості компенсатора постійної складової та субгармонік, які виникають у мережному струмі за підключення ряду нелінійних навантажень. Компенсатор побудований на вентильному комутаторі у вигляді мостового тиристорного безпосереднього перетворювача частоти, що працює у режимі дільника на два частоти мережі. У принцип роботи закладена комутація тиристорами струму реактора, індуктивний опір якого на основній частоті у сотні разів перевищує активний. Пристрій підключається паралельно нелінійному навантаженню і генерує у мережу таку саму за значенням, але протилежну за знаком постійну складову, що й навантаження. У роботі наведено графіки мережного струму компенсатора, напруги і струму реактора, а також регульовальну характеристику. Даному компенсатору притаманні важливі для практики функціональні властивості: простота регулювання компенсованого параметра, можливість паралельної роботи з фільтрами вищих гармонік, незалежність від частоти коливань мережі живлення, невибагливість до технологічних відхилень індуктивності реактора за необхідності його заміни, використання у перетворювачі тиристорів з природною комутацією, що спрощує систему управління тощо.*

**Ключові слова:** компенсатор, перетворювач частоти, реактор, тиристор, фільтр, постійна складова струму, субгармоніка.

#### Вступ

Широке впровадження у сучасні технологічні процеси і побут електроспоживачів різного призначення зі специфічними характеристиками (нелінійними, несиметричними, швидкозмінними у часі тощо) призводить до погіршення якості електроенергії та техніко-економічних показників системи електропостачання, а також до зменшення її пропускної спроможності. Підключення таких споживачів до мережі спричиняє виникнення у струмі гармонік з частотою, відмінною від частоти  $\omega_1$  основної гармоніки, а в деяких випадках появу постійної складової ( $\omega = 0$ ). Відповідно спотворенню струму мережі відбувається спотворення її напруги в залежності від співвідношення потужностей мережі та зазначених споживачів.

Ці фактори не тільки знижують надійність і економічність системи електропостачання, але й негативно впливають на роботу усіх споживачів: з'являються додаткові втрати потужності в

електрообладнанні, скорочується термін служби електричних машин і освітлювальної апаратури, можливий збій функціонування електронних та автоматичних пристроїв [1, 2].

Для покращення якості електроенергії використовують фільтри, сучасна класифікація яких виконана фахівцями Інституту електродинаміки НАН України і наведена на рис. 1. Найбільш численною і дослідженою є група пасивних фільтрів (ПФ), побудованих на основі комбінаторики реакторів та конденсаторів [3, 4, 5]. Оскільки реактивні опори цих елементів є частотозалежними, то при коливаннях частоти в системах електропостачання фільтрація гармонік погіршується. На ефективність роботи таких фільтрів негативно впливають також коливання температури зовнішнього середовища, старіння діелектрика у процесі експлуатації і особливо заміна пошкоджених реакторів і конденсаторів новими через дискретність допустимих технологічних відхилень індуктивності та ємності від номінальних значень. Використання цих фільтрів може спричинити виникнення резонансних явищ у мережі, тому при виході з ладу одного фільтра доводиться відключати і всі інші або мати 100% резерв фільтрів. Для запобігання перенапруг фільтри вищих гармонік слід вмикати у порядку зростання номерів гармонік, а відключати – у зворотному порядку. Крім того, у перехідних режимах нелінійних навантажень ефективність фільтрації знижується порівняно з усталеним режимом; при цьому термін служби фільтрів зменшується. На даний час можливості суттєвого поліпшення коефіцієнта фільтрації та точності налаштування таких фільтрів вважаються практично вичерпаними.

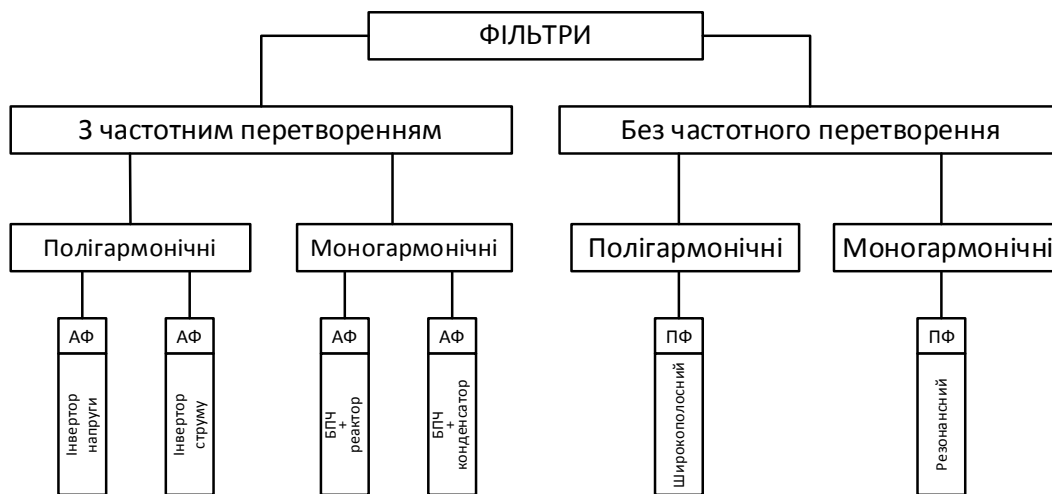


Рисунок 1 – Сучасна класифікація силових фільтрів

Найбільш перспективними є активні фільтри (АФ), побудовані на основі безпосереднього перетворювача частоти (БПЧ), рівень вихідної напруги якого регулюється вентилями зі штучною комутацією [6, 7, 8]. У принцип їх дії закладено дві опції: 1) випрямлення напруги однієї з неосновних гармонік у спектрі напруги мережі; 2) подача випрямленої напруги на згладжувальний реактор, у якого активний опір у сотні-тисячі разів менше за індуктивний. Таким чином, відносно фільтрованої гармоніки вентильний фільтр являє собою регульований випрямляч, що працює у режимі, наближеному до короткого замикання, а відносно основної гармоніки мережі – помножувача частоти з коефіцієнтом  $1 - \nu$ , де  $\nu$  – номер гармоніки.

Ці фільтри мають низку важливих переваг:

- легко налаштовуються на певну гармоніку і так само легко перелаштовуються на іншу шляхом зміни частоти імпульсів управління вентилями БПЧ;
- забезпечують потрібну точність обмеження амплітуди фільтрованої гармоніки шляхом зсуву за фазою імпульсів управління вентилями БПЧ;
- дозволяють виконувати комутацію паралельно працюючих фільтрів у будь-якому порядку і без стрибків струму.

Однак їм притаманний суттєвий недолік: у процесі випрямлення напруги  $\nu$ -тої гармоніки такий АФ, як звичайний випрямляч, генерує у мережу вищі гармоніки з частотами  $\nu$  раз більшими, ніж при випрямленні основної гармоніки ( $\nu = 1$ ).

Фахівцями Інституту електродинаміки НАНУ розроблено моногармонічні АФ на основі сполучення послідовного резонансного  $R-L-C$  контура і вентильного комутатора [7]. Принцип їх дії полягає у тому, що струм фільтра формується з вільної складової струму  $R-L-C$  контура, яка виникає за одноразового увімкнення його на змінну напругу. Для отримання практично незгасаючих синусоїдних коливань з частотою  $\nu \omega_1$  (що й потрібно від АФ) автори доповнили  $R-L-C$  контур вентильним комутатором, який

багаторазово переключає обкладки конденсатора або затискачі реактора. Основними умовами здійснення режиму активної фільтрації є: 1) вибір резонансної частоти  $R-L-C$  контуру рівною частоті фільтрованої гармоніки  $\omega_0 = \nu \omega_1$ , або у відносних одиницях  $\nu = \omega_0/\omega_1 = 1/(\omega_1\sqrt{LC})$ ; 2) управління ключами комутатора з певною частотою  $f_y$ , яка при практичній реалізації фільтрів даного типу визначається за формулою  $f_y = (\nu + 1)f_1/2$  або для мережі частотою  $f_1 = 50$  Гц,  $f_y = 25(\nu + 1)$  [6,7]. При цьому дослідним шляхом встановлено, що у випадках, коли отримане значення  $f_y$  буде рівним або меншим за частоту мережі  $f_1$  у ціле число раз, тобто  $f_y = f_1/a$ , де  $a = 1,2,3 \dots$  можлива поява у контурі перенапруг або надструмів залежно від варіанту підключення комутатора.

Як правило, у споживаному струмі значної кількості нелінійних навантажень (нульові схеми випрямлячів, зварювальна апаратура, люмінесцентне обладнання і т.п.) спостерігається наявність постійної складової ( $\omega = 0$ ), однак для усунення її негативного впливу розроблено значно менше схемних рішень, ніж для фільтрації вищих гармонік.

Одним з дієвих способів зменшення рівня або повного усунення постійної складової є підключення паралельно нелінійному навантаженню пристрою, що генерує у мережу таку саму за значенням, але протилежну за знаком постійну складову.

#### Мета роботи

Дослідження функціональних можливостей регульованого тиристорного компенсатора постійної складової у спектрі мережного струму нелінійних навантажень різних типів для підвищення їх техніко-економічних показників і поліпшення роботи усіх ланок системи електропостачання.

#### Матеріал досліджень

Досліджуваний компенсатор є окремим випадком активних фільтрів, розроблених фахівцями Інституту електродинаміки НАН України. Його структуру (рис. 2) складають:

- однофазний БПЧ матричного типу, побудований на тиристорних ключах К1–К4;
- реактор з великим індуктивним опором  $L$ , що слугує навантаженням БПЧ;
- система управління, в яку входять: датчик постійної складової (ДПС) струму мережі; генератор імпульсів управління тривалістю  $180^\circ$  і частотою  $\Omega = \omega_1/2$ , а також фазозсувний пристрій, що виконує фазовий зсув на кут  $\theta$  імпульсів управління відносно напруги мережі.

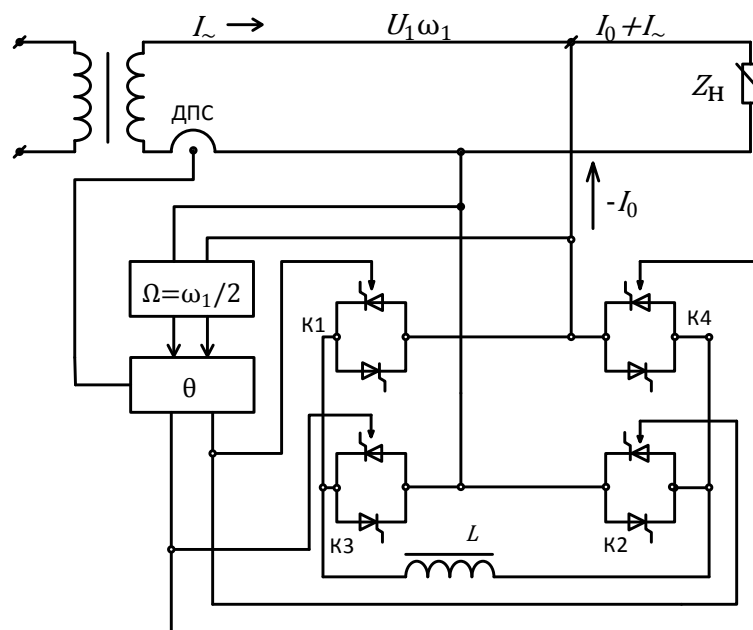


Рисунок 2 – Структурна схема компенсатора постійної складової струму

Компенсатор підключається паралельно однофазному нелінійному навантаженню  $Z_H$ .

У [6] встановлено, що управління ключами БПЧ даного типу має здійснюватися з частотою  $f_y$ , яка у загальному випадку описується формулою:

$$f_y = |\nu \pm 1|f_1/Km,$$

де коефіцієнт  $K$  – дискретне число ( $K = 1,2,3 \dots$ );  $m$  – число фаз, з яких формується крива напруги на виході БПЧ (реакторі); знак “+” відповідає максимальному значенню частоти  $f_y$ , знак “-” – мініимальному.

Теоретично пристрій може працювати за будь-якого значення частоти управління  $f_y$  у діапазоні  $f_{y\max} - f_{y\min}$ , однак при практичній реалізації цього способу фільтрації вибирають  $f_y = f_{y\max}$  і коефіцієнт  $K = 1$ . У нашому випадку однофазного компенсатора постійної складової струму  $v = 0$ ,  $m = 1$ ,  $K = 1$ , відповідно  $f_y = f_{y\max} = f_1/2$  і БПЧ працює у режимі дільника частоти напруги мережі на два.

Роботу даного компенсатора ілюструють графіки напруги мережі  $u_1$  та реактора  $u_p$  за кута зсуву фаз імпульсів управління  $\theta = -45^\circ$  (рис. 3) і графіки струмів реактора  $i_p$  та мережного  $i_1$  при  $\theta = -45^\circ$ ,  $\theta = -15^\circ$ , побудовані у відносних одиницях (рис. 4).

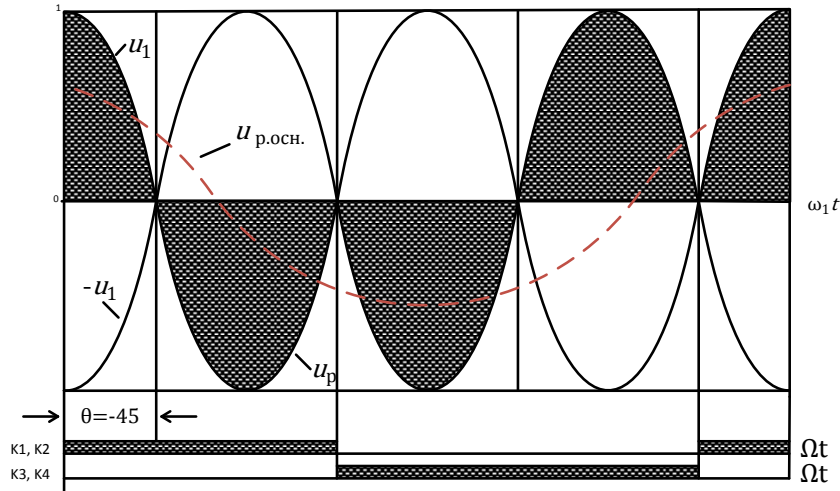


Рисунок 3 – Графіки напруги мереж  $u_1$  та напруги реактора  $u_p$

З рис. 4б видно, що в кривій мережного струму  $i_1$  є дві складові – змінна та постійна, тому рівняння струму  $i_1$  можна записати у вигляді:

$$i_1 = i_{1\sim} - I_{10} = \frac{U_{1m}}{\omega_1 L} \sin \omega_1 t - \frac{U_{1m}}{\omega_1 L} \sin 2\theta$$

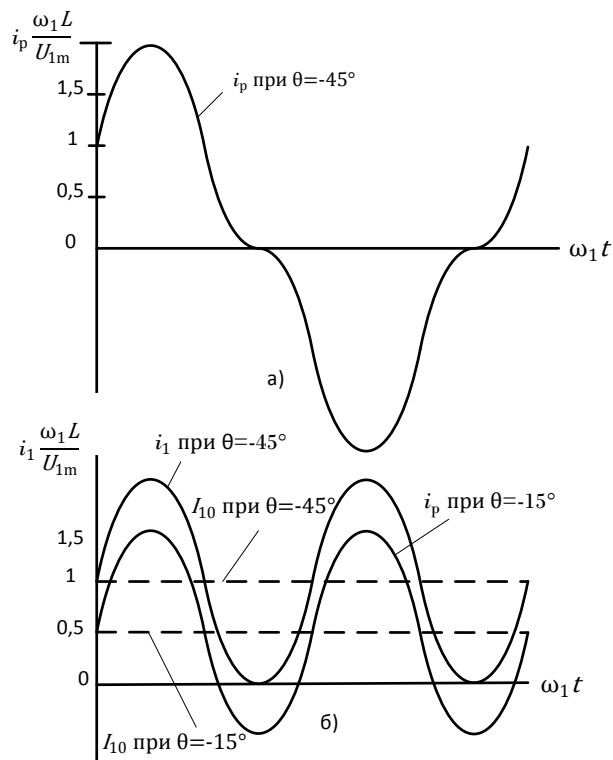


Рисунок 4 – Графіки струмів реактора (а) і мережі (б)

Змінна складова  $\frac{U_{1m}}{\omega_1 L} \sin \omega_1 t$  не залежить від кута  $\theta$  зсуву фаз імпульсів управління і визначається напругою мережі та індуктивним опором реактора на частоті  $\omega_1$  мережі; рівень і знак постійної складової  $\frac{U_{1m}}{\omega_1 L} \sin 2\theta$  залежить тільки від однієї змінної – кута  $\theta$ , що підтверджують результати побудов.

Регульовальну характеристику компенсатора – залежність рівня постійної складової мережного струму від фазового зсуву імпульсів управління  $I_{10} = f(\theta)$  – показано на рис. 5.

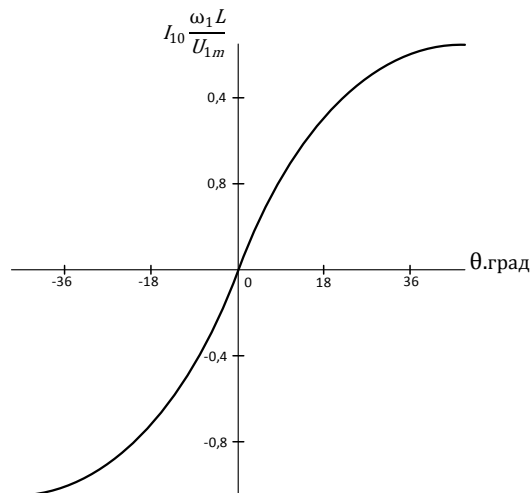


Рисунок 5 – Регульовальна характеристика компенсатора

За зміни кута  $\theta$  у межах  $-45^\circ \dots +45^\circ$  рівень постійної складової змінюється від від’ємного до додатного максимумів. При  $\theta = 0$  у мережному струмі буде тільки змінна складова індуктивного характеру, яку нескладно усунути компенсуючими конденсаторами, встановленими на вході пристрою.

Слід відмітити особливість, притаманну даному компенсатору: хоча у процесі роботи відбувається комутація тиристорами струму реактора і він має несинусоїдну форму, однак у нелінійному струмі відсутні гармоніки неосновної частоти.

Аналогічним способом можна здійснювати компенсацію субгармонік мережного струму нелінійних навантажень. На відміну від режиму компенсації постійної складової у такому режимі фаза імпульсів управління буде дискретно змінюватись в залежності від сигналу датчика. За використання тиристорів зміни фази можуть відбуватись не частіше одного разу за період напруги живлення. Тому компенсатор буде генерувати у мережу прямокутно-ступінчасту криву струму з тривалістю кожної “сходинки”, рівною періоду напруги живлення (рис. 6).

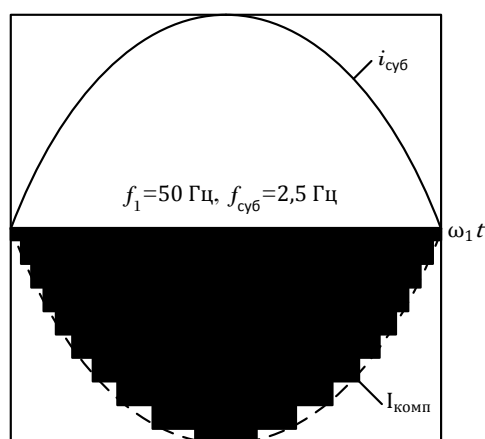


Рисунок 6 – Графік струму компенсатора субгармоніки частотою  $f_{суб} = 2,5$  Гц

Чим більше період субгармонік порівняно з періодом мережі ( $T_{суб} \gg T_1$ ), тим точніше можна здійснити апроксимацію кривої компенсаційного струму. Завдяки формуванню цього струму з окремих “сходенок” відпадає необхідність у додаткових силових пристроях, що забезпечують потрібний зсув фаз

180° між субгармоніками навантаження і компенсатора. Так само можна компенсувати і субгармонічні коливання більш складної форми.

У випадку багатозазного навантаження число компенсаторів вибирається рівним числу фаз навантаження, і кожний з них вмикається на лінійну (фазну) напругу. Датчики струму підключаються у розсічення кожної фази.

#### **Висновки**

У результаті проведених досліджень встановлені наступні особливості функціонування даного компенсатора:

- простота усунення або зменшення рівня постійної складової у спектри струму електромережі;
- можливість паралельної роботи з фільтрами вищих гармонік, причому комутувати фільтри можна у будь-якому порядку і без стрибків струму;
- можливість фільтрації субгармонік;
- незалежність від експлуатаційних коливань частоти промислових і автономних систем електропостачання;
- відсутність впливу на частотну характеристику мережі;
- усталеність роботи відносно технологічних відхилень індуктивності згладжувального реактора від номінального значення;
- можливість використання тиристорів з природною комутацією, оскільки у момент їх комутації мережний струм компенсатора проходить через 0; це суттєво спрощує систему управління.

#### **Список використаної літератури**

1. Шидловський А.К., Федій В.С. Класифікація методів і заходів зниження несинусоїдності напруг і струмів // Техн. Електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми електромагнітної сумісності силових напівпровідникових перетворювачів" – 2011. Ч.3. С. 3-9.
2. Розанов Ю.К., Рябчицький М. В., Кваснук А.А. Силова електроніка і якість електроенергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність" – 2020. – Ч. 3. С. 6-12.
3. S. Piasecki, "High order line filters for Grid Connected AC-DC Converter — Parameters selection and optimization," 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 2014, pp. 2691-2696, doi: 10.1109/ISIE.2014.6865046.
4. A. Mishra, M. Singh, A. Srivastava and K. Chatterjee, "Suppression of Harmonics in DFIG based WECS using passive LCL filter," 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), Greater Noida, India, 2018, pp. 446-451, doi: 10.1109/PEEIC.2018.8665554.
5. I. Bessadet, H. Tedjini, "The Performances of Hybrid Filter in Elimination of AC-AC Converters Harmonics Pollution," 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Rabat, Morocco, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRSEC.2018.8702849.
6. Жарський Б.К., Новський В.О., Голубев В.В. Перетворення параметрів електромагнітної енергії вентильними комутаторами. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 323с.
7. Федій В.С. Трифазні моногармонічні активні фільтри на основі перетворювачів енергії. // Техн. електродинаміка. – 2015. – №1. – С. 17-21.
8. M. A. Hossain, T. H. Galib, M. A. Choudhury, "AC side switched active filter based high performance three-phase buck rectification," 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV), Dhaka, Bangladesh, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIEV.2013.6572560.

V. Grudsk<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-7775-6397

H. Bolshakov<sup>1</sup>, Ph. D. student, ORCID 0009-0002-3339-7625

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## **THYRISTOR COMPENSATOR FOR THE DC COMPONENT IN THE SPECTRUM OF THE MAINS CURRENT OF A NONLINEAR LOAD**

*The rapid scientific and technological progress across nearly all areas of human activity has led to the emergence of numerous electricity consumers with specific characteristics and rapidly changing current consumption patterns. Typically, the use of such devices negatively impacts the functioning of power supply systems, reduces the efficiency and lifespan of electrical equipment, and, in some cases, makes it impossible to connect multiple consumers to a single power network simultaneously. A common approach to improving power quality in systems with nonlinear loads is the use of corrective devices at the load nodes, particularly various*

*filters that ensure electromagnetic compatibility among consumers and optimize the operation of the electrical grid. At present, the most effective filters are those that involve frequency conversion of energy. This process either extracts non-fundamental harmonic voltage from the network (filtering mode) or draws energy from an external reactive component (compensation mode). This paper explores the functional capabilities of a compensator designed to address direct current (DC) components and subharmonics that occur in network current when multiple nonlinear loads are connected. The compensator is based on a thyristor switching element configured as a bridge direct frequency converter, operating in a mode that divides the network frequency by two. The device's operation relies on thyristors switching the reactor current, where the inductive reactance at the fundamental frequency is hundreds of times greater than the active resistance. The compensator connects in parallel to the nonlinear load and generates a DC component of the same magnitude but opposite in polarity to that produced by the load. The paper presents graphs of the compensator's network current, the reactor's voltage and current, as well as the adjustment characteristic. It establishes that this device can also be used to compensate for subharmonics in the network current of nonlinear loads. The compensator exhibits practical functional properties such as easy adjustment of the compensated parameter, compatibility with higher harmonic filters, independence from power grid frequency fluctuations, tolerance to manufacturing variations in reactor inductance when replacement is needed, and the use of naturally commutating thyristors, which simplifies the control system, among other advantages.*

**Keywords:** *compensator, frequency converter, reactor, thyristor, filter, DC current component, subharmonic.*

#### References

1. Shydlovskiy A.K., Fedii V.S. Classification of Methods and Measures for Reducing the Nonsinusoidality of Voltages and Currents // Techn. Electrodynamics. Thematic Issue "Problems of Electromagnetic Compatibility of Power Semiconductor Converters" – 2011. Part 3. pp. 3–9.
2. Rozanov Yu.K., Ryabchytskyi M.V., Kvasnuk A.A. Power Electronics and Power Quality // Techn. Electrodynamics. Thematic Issue "Power Electronics and Energy Efficiency" – 2020. – Part 3. pp. 6–12.
3. S. Piasecki, "High order line filters for Grid Connected AC-DC Converter — Parameters selection and optimization," 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 2014, pp. 2691-2696, doi: 10.1109/ISIE.2014.6865046.
4. A. Mishra, M. Singh, A. Srivastava and K. Chatterjee, "Suppression of Harmonics in DFIG based WECS using passive LCL filter," 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), Greater Noida, India, 2018, pp. 446-451, doi: 10.1109/PEEIC.2018.8665554.
5. I. Bessadet, H. Tedjini, "The Performances of Hybrid Filter in Elimination of AC-AC Converters Harmonics Pollution," 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Rabat, Morocco, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRSEC.2018.8702849.
6. Zharskyi B.K., Novskiy V.O., Holubiev V.V. Conversion of Electromagnetic Energy Parameters by Valve Commutators. – Kyiv: Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 2013. – 323 p.
7. Fedii V.S. Three-Phase Monoharmonic Active Filters Based on Power Converters // Techn. Electrodynamics. – 2015. – No. 1. – pp. 17–21.
8. M. A. Hossain, T. H. Galib, M. A. Choudhury, "AC side switched active filter based high performance three-phase buck rectification," 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV), Dhaka, Bangladesh, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIEV.2013.6572560.

Надійшла: 04.04.2025  
Received: 04.04.2025

Прийнята: 10.03.2026  
Accepted: 10.03.2026