

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ АКТИВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

В.М. Рябенський^{1*}, докт. техн. наук, **В.М. Губаревич^{2**}**, канд. техн. наук,
Ю.В. Маруня^{2*}**, канд. техн. наук, **І.М. Худякова^{1****}**, канд. пед. наук, **С.Л. Трибулькевич^{1*****}**

¹ Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,
просп. Героїв України, 9, Миколаїв, 54025, Україна.

² Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: optron2@gmail.com; marunia@ied.org.ua.

Розглянуто особливості проектування схеми активного енергетичного фільтра (АЕФ) з послідовною компенсацією. Наведено демонстраційну модель АЕФ з послідовною компенсацією, реалізованою в Multisim. Визначено три основні задачі, які слід розв'язувати у взаємозв'язку під час проектування АЕФ. Приведено рекомендації стосовно підвищення показників якості вторинних джерел живлення. Бібл. 17, рис. 5.

Ключові слова: активні енергетичні фільтри, підсилювачі, частотні властивості, гармоніки випрямленої напруги, фільтрація гармонік.

Вступ. Активні енергетичні фільтри (АЕФ) активно розвивалися в 90-х роках минулого століття в потужних системах керованого постійного струму з робочими струмами від десятків до декількох сотень ампер та робочими напругами 200–300 В. Вони знайшли своє використання в системах живлення електрофізичної апаратури в джерелах живлення спеціальних лазерів, системах розмагнічування морських об'єктів та ін. В останні роки потужні джерела живлення постійного струму з низьким рівнем пульсацій розширили своє використання на інші області енергетичної електроніки [1–3]. Водночас, у зв'язку з широким розвитком мікро-, нано- та прецизійної електроніки різко зросли вимоги й до джерел живлення на порівняно невеликі струми (до 10–15 А) з високою стабільністю і високою чутливістю. До таких областей відносяться електронні системи вимірювальної техніки, медичної апаратури, спеціальні системи акустичної електроніки [4–8]. Регульовані джерела живлення постійного струму з прецизійними характеристиками вихідної напруги, за яких відхилення миттєвого значення вихідної напруги не перевищує 0.1% від номінального значення вихідної напруги, широко використовуються у навчанні, наукових дослідженнях, промисловому виробництві та інших сферах [9–12]. Необхідність у забезпеченні прецизійних характеристик вихідної напруги вторинних джерел живлення, особливо в умовах наявності різного роду завад, шумів і паразитних складових, призвела до необхідності встановлювати рекомендації та стандарти, наприклад, [13].

Задачі підвищення енергоефективності вторинних джерел живлення завжди актуальні, оскільки вони є найбільш енергозатратними і, відповідно, найменш надійними в будь-яких електронних системах. В той же час, зростаючі вимоги до стабільності випрямленої напруги та зменшення її пульсацій призводять до зростання масогабаритних показників вторинних джерел живлення.

Одним з напрямків зменшення масогабаритних показників фільтрів вищих гармонік випрямленої напруги є використання активних енергетичних фільтрів з включенням компенсуючого трансформатора послідовно з навантаженням, в первинну обмотку якого подається підсилена напруга пульсацій, що знімається з навантаження. На жаль, ефективність таких фільтрів обмежується стійкістю підсилювача як в діапазоні високих, так і низьких частот.

© Рябенський В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Худякова І.М., Трибулькевич С.Л., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-5441-3140>; ** <https://orcid.org/0000-0003-2416-9858>;

*** <https://orcid.org/0000-0003-0071-1702>; **** <https://orcid.org/0000-0002-2677-7841>;

***** <https://orcid.org/0000-0001-5783-6616>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Компенсаційні стабілізатори з прохідним транзистором для таких блоків живлення мають витримувати на собі не лише коливання напруги живлення, а й можливі її пульсації, тому вони повинні мати досить значний запас за напругою, що призводить до значних втрат енергії. Задля зменшення таких втрат використовують спеціально розроблені транзистори з низькими втратами напруги, наприклад, NDP6020P [14]. Задля забезпечення їх низьким падінням напруги у разі використання як прохідного транзистора розроблено й широко використовується схема компенсаційного стабілізатора [15], падіння напруги на прохідному транзисторі якого повинно враховувати не тільки коливання напруги, а й амплітуди пульсацій попередньо включених випрямляча та фільтра. Це приводить до завищеного падіння напруги на послідовному регулюючому елементі (до 1.5–2 В), що часто призводить до значних втрат енергії та погіршенню температурного режиму решти електронних компонентів схеми.

Метою роботи є підвищення енергоефективності вторинних джерел живлення пристроїв високоточної електроніки шляхом зниження пульсацій випрямленої напруги за допомогою активних енергетичних фільтрів з використанням сучасної елементної бази.

Такі фільтри привернули до себе увагу розробників, наприклад, [16] як пристрої, що можуть встановлюватися перед компенсаційним стабілізатором, зменшуючи пульсації випрямленої напруги. Менші значення пульсацій напруги дають можливість працювати з меншим падінням напруги на прохідному транзисторі і завдяки цьому можна зменшити величини компонентів пасивного фільтра. Ефективність АЕФ як замкнених структур повністю визначається контурним коефіцієнтом підсилення, який, в свою чергу, визначається стійкістю під час дії керуючих і зовнішніх впливів. Існує два основних напрямки побудови АЕФ – з послідовною та паралельною компенсацією. Розглянемо схему АЕФ з послідовною компенсацією, спрощену принципову і структурну схеми якого наведено на рис. 1, а і б. Особливість її полягає в тому, що змінна складова напруги на навантаженні підсилюється підсилювачем Π і через трансформатор подається в протифазі відносно напруги на конденсаторі в коло живлення навантаження. Як наслідок, створена напруга протилежного напрямку повинна в значній мірі компенсувати змінну складову струму в навантаженні.

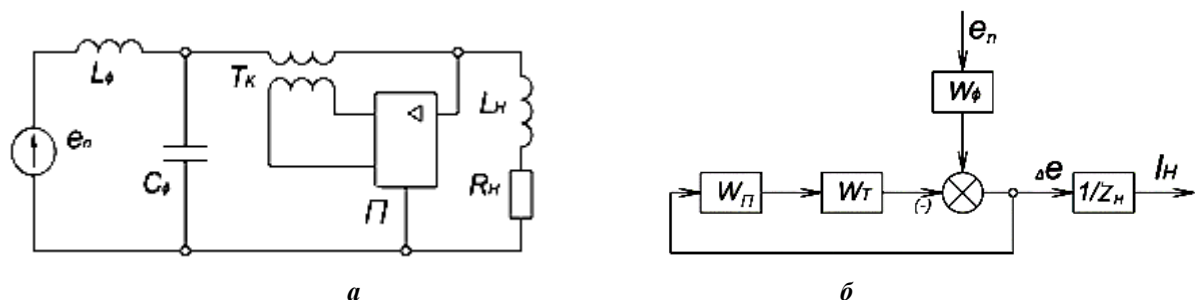


Рис. 1

Аналізуючи схему заміщення АЕФ, можна зробити висновок, що його дію можна розглядати як результат внесення в контур постійного струму імпедансу $Z'_{AF} = K_{\Pi} Z_H$, завдяки чому легко визначається вхідний опір АЕФ

$$Z_{\text{вх}} = Z_k + (K_{\Pi} + 1)Z_H,$$

де K_{Π} – коефіцієнт підсилення підсилювача в полосі частот компенсації гармонічних складових; Z_k – приведений до вторинної обмотки опір трансформатора.

Зростання величини вхідного опору приводить до того, що пасивний фільтр, складений на елементах $L_{\phi}C_{\phi}$, буде працювати в режимі, близькому до режиму холостого ходу, тобто ефективність його дещо зменшиться.

Структурна схема, наведена на рис. 1, б, показує, що пульсації випрямленої напруги можна розглядати як адитивну заваду на виході підсилювача. Відповідно, вона може бути суттєво подавлена на величину, пропорційну контурному коефіцієнту підсилення e_n , тобто

$$\Delta e = \frac{e_n}{W_{\phi}(1 + W_{\Pi}W_T)},$$

де W_{ϕ} , W_{Π} , W_T – передаточні функції фільтра, підсилювача і трансформатора відповідно.

На рис. 2 наведено демонстраційну модель АЕФ з послідовною компенсацією, реалізовану в пакеті програм Multisim.

Напруга постійного струму, що отримується на виході мостового випрямляча D1, частково

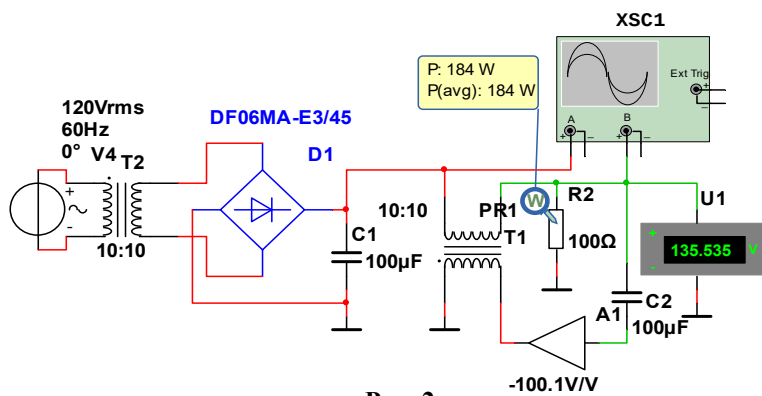


Рис. 2

рис. 3 наведено осцилограми змінної складової напруги на виході випрямляча і на навантаженні з відповідними масштабними коефіцієнтами по каналах осцилографа. З допомогою курсорів ефективність подавлення змінної складової випрямленої напруги (показання курсорів T2 – T1) визначається як відношення розмаху пульсацій напруги на виході випрямляча до її розмаху на навантаженні і може досягати 40 дБ.

Під час проектування АЕФ слід розв'язувати у взаємозв'язку три основні задачі:

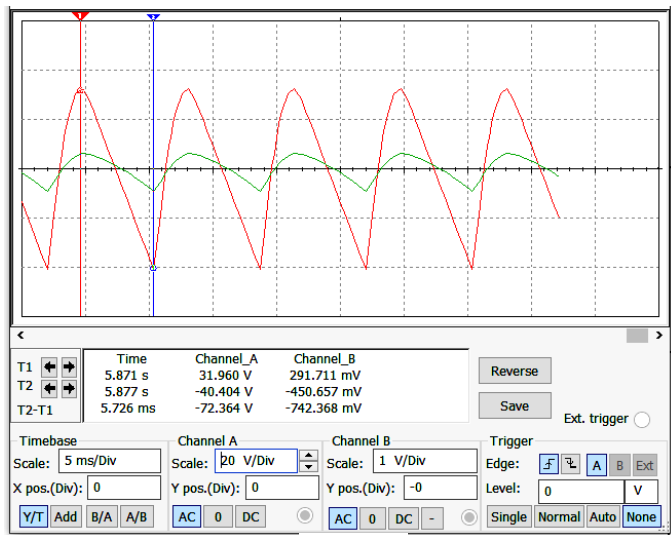


Рис. 3

1. Проектування трансформатора з повітряним зазором з мінімальними конструктивними та масогабаритними показниками;
2. Обґрунтування, вибір і проектування підсилювача АЕФ з врахуванням необхідності забезпечення необхідного коефіцієнту підсилення й характеру частотних характеристик;
3. Необхідність забезпечення стійкості замкненої системи, особливо для діапазону низьких частот.

Трансформатор АЕФ повинен виготовлятися або з повітряним зазором, або використовувати допоміжну обмотку задля компенсації струму постійного підмагнічування [5]. Вторинна обмотка повинна мати незначну кількість витків провідника значного перерізу. Це обумовлено необ-

хідністю зменшити падіння напруги на ній та впливу постійного струму підмагнічування осердя.

Первинна обмотка трансформатора має кількість витків, що визначається необхідним коефіцієнтом трансформації та величиною вихідної напруги підсилювача. Активний опір її також досить низький і реально не перевищує одиниць Ом. Вказані особливості дають можливість вважати, що схема заміщення трансформатора матиме вигляд активно-індуктивної ланки, в якій послідовний опір включає в себе суму вихідного опору підсилювача і опору первинної обмотки R та індуктивність намагнічування L , яка задає величину струму холостого ходу трансформатора і має досить великі значення. Частотна характеристика такої ланки визначається формулою

$$K(j\omega) = \frac{Tj\omega}{1 + Tj\omega},$$

в якій постійна часу $T = L/R$, і вона може бути бажаною складовою частотної характеристики підсилювача для діапазону низьких частот $\omega_{1H} - \omega_{3H} - \omega_{2H}$ (рис. 4).

Підключення трансформатора до виходу підсилювача має свої особливості. Сучасні підсилювачі потужності будуються по двотактній схемі на основі емітерних повторювачів (схем з загальним колектором) з безпосереднім зв'язком з навантаженням. Використовувати двотактний

підсилювач класу B у випадку, що розглядається, не допустимо, оскільки паузи перемикання транзисторів в районі нуля вихідної напруги приводять до появи імпульсних сплесків. Підключення трансформатора через розділовий конденсатор призводить до підвищення крутизни низькочастотної ділянки логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) до $+40$ дБ/дек, що ускладнить побудову коригуючих пристроїв для реалізації бажаної ЛАЧХ в діапазоні низьких частот (рис. 4).

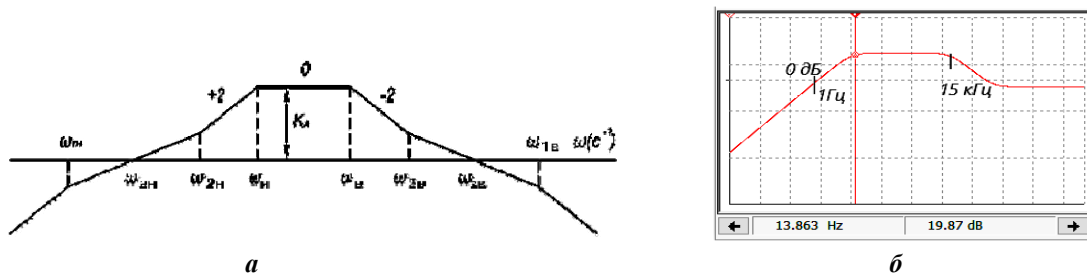


Рис. 4

Формування бажаної частотної характеристики АЕФ може забезпечуватися по різному в залежності від необхідної полоси компенсації гармонічних складових $\Pi_{\omega} = \omega_{3B} \div \omega_{3H}$, коефіцієнта компенсації $K_{\Pi}(\omega_n)$ і параметрів, що характеризують стійкість підсилювача на низьких і високих частотах. Всі ці питання досить повно відображені у спеціальній літературі [17].

За малих значень інтервалу Π_{ω} між частотами зрізу бажаної ЛАЧХ в області низьких ω_{CH} і високих частот має місце взаємний вплив фазових характеристик піддіапазонів. Задля його усунення необхідне виконання умови

$$\frac{\omega_{3B}}{\omega_H} = \frac{\omega_B}{\omega_H} = \frac{\omega_{3B}}{\omega_B} > 10.$$

Задля забезпечення незалежної роботи підсилювача від трансформаторного навантаження необхідно, щоб вихідний опір підсилювача був досить малим, тобто, підсилювач повинен бути джерелом напруги з малим вихідним опором. Для цього такі підсилювачі слід виготовляти на транзисторах, що мають високий коефіцієнт підсилення, наприклад, схем Дарлінгтона/Шиклаї, або використовувати місцевий зворотний зв'язок за напругою. На рис. 5, а зображено рекомендовану схему підсилювача класу B зі зворотним зв'язком за вихідною напругою, побудованого за допомогою операційного підсилювача U2A, частотну характеристику якого наведено на рис. 5, б. Комплементарна пара транзисторів U1A та U1B працюють в режимі класу B . Глибокий зворотний зв'язок за вихідною напругою і з допомогою підсилювача U2A забезпечує лінійність роботи в широкому діапазоні вхідної напруги та низький вихідний опір вихідного каскаду підсилювача. За допомогою резисторів R1 та R2 підсилювач U2B забезпечує необхідний коефіцієнт підсилення, а також необхідний характер частотної характеристики як в області низьких, так і в області високих частот.

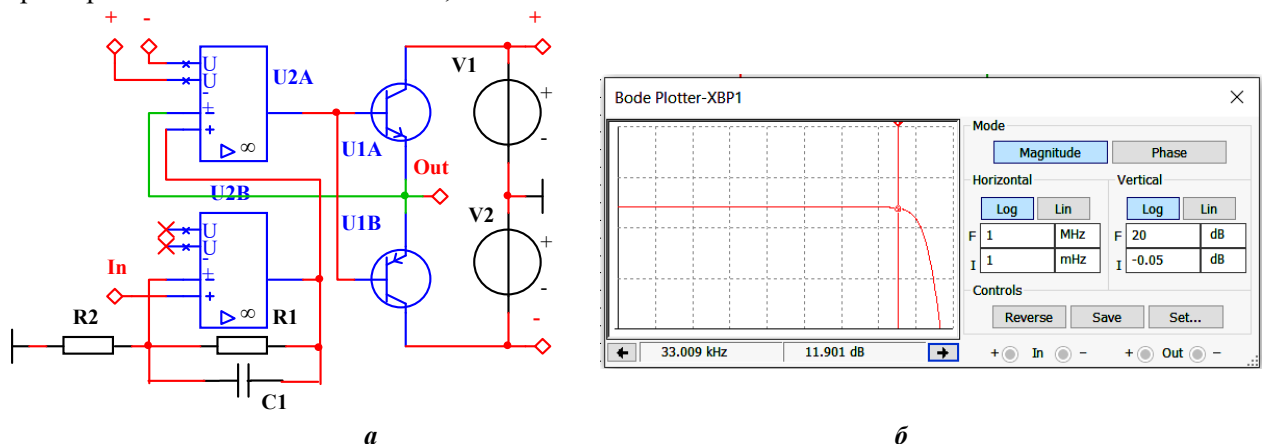


Рис. 5

Рівномірність частотної характеристики підсилювача (рис. 5, б) в широкому частотному діапазоні (від 0 Гц і до 33 кГц) дає змогу за допомогою операційного підсилювача U2B формувати амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) АЕФ з заданим частотним діапазоном і коефіцієнтом подавлення гармонік. На рис. 4, б наведено експериментальну амплітудно-частотну характеристику активного енергетичного фільтра. Числові параметри, що наведені на рисунку, мають похибку біля

20%, обумовлену точністю вимірювання Боде – плотером віртуальної лабораторії. Нахил АЧХ як в діапазоні низьких, так і високих частот, має величину приблизно рівну ± 20 дБ/дек. Частота ω_H рівна приблизно 14 Гц і може бути зміщена вгору у разі необхідності збільшення контурного коефіцієнта підсилення. Верхня частота ω_B рівна 15 кГц, але під час збільшення контурного коефіцієнта підсилення вона буде зміщуватися вліво. Нахил характеристики низькочастотного діапазону обумовлений параметрами трансформатора, а нахил характеристики високочастотного діапазону задається опором $R_1 = 50$ кОм і паралельно йому включеним конденсатором $C_1 = 5$ нФ, постійна часу $R_1 C_1$ задається розробником.

В АЕФ з послідовною компенсацією підсилювач працює практично в режимі холостого ходу, оскільки навантаженням його є індуктивність намагнічування.

Висновок. 1. Приведено особливості та конкретні шляхи розробки АЕФ з послідовною компенсацією на сучасній елементній базі, що дає можливість підвищити ефективність джерел живлення електронної апаратури високої точності за рахунок компенсації пульсацій випрямленої напруги і зменшення падіння напруги на компенсаційних стабілізаторах.

2. Ефективність притуплення гармонічних складових пульсацій випрямленої напруги за допомогою активного енергетичного фільтра обмежується контурним коефіцієнтом підсилення підсилювача та його частотним діапазоном.

3. Розглянуто особливості побудови АЧХ контура підсилення АЕФ задля підвищення стійкості підсилювача на низьких і високих частотах.

1. Семененко Ю.А. Стабилизация и активная фильтрация выпрямленного напряжения в замкнутой структуре. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. № 166. С. 131-140. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.166.2016.92884>.

2. Practical design techniques for sensor signal conditioning. Part 8, 9. Analog devices. Autex Ltd. URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-books/practical-design-techniques-sensor-signal-conditioning.html> (дата доступу 09.05.2025).

3. Precision voltage regulator controller ADP3310. Datasheet. Analog Device. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adp3310.pdf> (дата доступу 09.05.2025).

4. Сокол Е.И., Гончаров Ю.П., Замаруев В.В., Кривошеев С.Ю., Любич Р.И., Чурсина Ю.В. Низкочастотные автоколебания в силовых активных фильтрах. *Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. Тематичний випуск*. 2008. Ч. 3. С. 81-87.

5. Jing H., Liu Z., Wang H., Sheh X. Design and realization of high-precision digital control direct current power supply. *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, Xianning, China, 16–18 April 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/cecnet.2011.5768894>.

6. Huang H., Zheng X., Wu Y., Sheng Z. Design of high precision and high power bidirectional adjustable power supply. *Fusion Engineering and Design*. 2021. Vol. 162. Article no 112103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112103>.

7. Hegarty T. An overview of conducted EMI specifications for power supplies. Analog. Embedded processing. Semiconductor company. URL: <https://www.ti.com/lit/wp/slyy136/slyy136.pdf> (дата доступу 09.05.2025).

8. Yang W., Huang J., Dai Z. Design of a High-precision DC regulated power supply system. *IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Chongqing, China, 12–14 June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/itnec48623.2020.9084831>.

9. Gwóźdź M., Ciepliński Ł. DC power supply with parallel active compensation function and tuneable inductive filter based on analogue control: Part 1. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2024. Vol. 72 (1). P. e148839. DOI: <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148839>.

10. Onishi Hiroyuki, Nagaoka Shingo, Zaitu Toshiyuki. Noise Cancellation for Miniaturization of Switched Mode Power Supply. *Omron Technics*. 2020. Vol. 52. URL: https://www.omron.com/global/en/assets/file/technology/omrontechnics/vol52/OMT_Vol52_003EN.pdf (дата доступу 12.05.2025).

11. Murray O. How to Reduce EMI and Shrink Power-supply Size with an Integrated Active EMI Filter. Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/lit/ta/sszt179/sszt179.pdf> (дата доступу 12.05.2025).

12. Understanding DC Filters: Types, Applications & Benefits. Anypcba. URL: <https://www.anypcba.com/blogs/electronic-component-knowledge/understanding-dc-filters-types-applications-benefits.html> (дата доступу 12.05.2025).

13. The engineer's guide to EMI in DC-DC converters (Part 1): standards requirements and measurement techniques. *How2Power Today*. December 2017. URL: https://www.how2power.com/pdf_view.php?url=/newsletters/1712/articles/H2PToday1712_design_TexasInstruments_Part%201.pdf (дата доступу 12.05.2025).

14. NDP6020P/ NDB6020P. P-Channel Logic Level Enhancement Mode Field Effect Transistor. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ndp6020p-d.pdf> (дата доступу 12.05.2025).

15. Precision Voltage Regulator Controller ADP3310. Datasheet Analog Device. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adp3310.pdf> (дата доступу 12.05.2025).

16. Vlemincq L. Smart ripple canceller offers near-zero dropout. URL: <https://www.edn.com/smart-ripple-canceller-offers-near-zero-dropout/> (дата доступу 12.05.2025).

17. Шаруда В.Г. Практикум з теорії автоматичного управління. Дніпропетровськ: НГАУ, 2002. 414 с.

DESIGN FEATURES OF ACTIVE ENERGY FILTERS

V.M. Ryabenkyi¹, V.M. Hubarevich², Yu.V. Marunya², I.M. Khudyakova¹, S.L. Trybulkevych¹

¹ National University of Shipbuilding of Admiral Makarov,
Heroes of Ukraine Ave., 9, Mykolaiv, 54025, Ukraine.

² Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: optron2@gmail.com; marunia@ied.org.ua.

The features of the design of the active energy filter (AEF) with sequential compensation are considered. The AEF demonstration model with sequential compensation implemented in Multisim is given. There are three main tasks that should be solved in the interconnection when designing AEF. Recommendations for increasing the quality of secondary power sources have been given. References 17, figures 5.

Keywords: active energy filters, amplifiers, frequency properties, harmonics of rectified voltage, filtration of harmonics.

1. Semenenko Yu.A. Stabilization and active filtration of straightened voltage in a closed structure. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu*. 2016. No 166. Pp. 131-140. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.166.2016.92884>. (Rus)

2. Practical design techniques for sensor signal conditioning. Part 8, 9. Analog devices. Autex Ltd. URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-books/practical-design-techniques-sensor-signal-conditioning.html> (accessed at 09.05.2025).

3. Precision voltage regulator controller ADP3310. Datasheet. Analog Device. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adp3310.pdf> (accessed at 09.05.2025).

4. Sokol Ye.I., Goncharov Yu.P., Zamarayev V.V., Krivosheev S.Yu., Liubich R.I., Chursina Yu.V. Low-frequency auto-fluctuations in power active filters. *Tekhnichna elektrodynamika. Problemy sychasnoi elektrotehniki. Tematychnyi vypusk*. 2008. Part 3. Pp.81-87. (Rus)

5. Jing H., Liu Z., Wang H., Sheh X. Design and realization of high-precision digital control direct current power supply. International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), Xianning, China, 16–18 April 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/cecnet.2011.5768894>.

6. Huang H., Zheng X., Wu Y., Sheng Z. Design of high precision and high power bidirectional adjustable power supply. *Fusion Engineering and Design*. 2021. Vol. 162. Article no 112103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112103>.

7. Hegarty T. An overview of conducted EMI specifications for power supplies. Analog. Embedded processing. Semiconductor company. URL: <https://www.ti.com/lit/wp/slyy136/slyy136.pdf> (accessed at 09.05.2025).

8. Yang W., Huang J., Dai Z. Design of a High-precision DC regulated power supply system. IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chongqing, China, 12–14 June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/itnec48623.2020.9084831>.

9. Gwózdź M., Ciepliński Ł. DC power supply with parallel active compensation function and tuneable inductive filter based on analogue control: Part 1. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2024. Vol. 72 (1). P. e148839. DOI: <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148839>.

10. Onishi Hiroyuki, Nagaoka Shingo, Zaitzu Toshiyuki. Noise Cancellation for Miniaturization of Switched Mode Power Supply. *Omron Technics*. 2020. Vol. 52. URL: https://www.omron.com/global/en/assets/file/technology/omrontechnics/vol52/OMT_Vol52_003EN.pdf (accessed at 12.05.2025).

11. Murray O. How to Reduce EMI and Shrink Power-supply Size with an Integrated Active EMI Filter. Texas Instruments. URL: <https://www.ti.com/lit/ta/sszt179/sszt179.pdf> (accessed at 12.05.2025).

12. Understanding DC Filters: Types, Applications & Benefits. Anypcba. URL: <https://www.anypcba.com/blogs/electronic-component-knowledge/understanding-dc-filters-types-applications-benefits.html> (accessed at 12.05.2025).

13. The engineer's guide to EMI in DC-DC converters (Part 1): standards requirements and measurement techniques. *How2Power Today*. December 2017. URL: https://www.how2power.com/pdf_view.php?url=/newsletters/1712/articles/H2PToday1712_design_TexasInstruments_Part%201.pdf (accessed at 12.05.2025)

14. NDP6020P/ NDB6020P. P-Channel Logic Level Enhancement Mode Field Effect Transistor. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ndp6020p-d.pdf> (accessed at 12.05.2025).

15. Precision Voltage Regulator Controller ADP3310. Datasheet Analog Device. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adp3310.pdf> (accessed at 12.05.2025).

16. Vlemincq L. Smart ripple canceller offers near-zero dropout. URL: <https://www.edn.com/smart-ripple-canceller-offers-near-zero-dropout/> (accessed at 12.05.2025).

17. Sharuda V.G. Workshop on the theory of autogmatic management. Dnipropetrovsk: Natsionalna girnycha akadimiia Ukrainy, 2002. 414 p. (Ukr)

Надійшла 27.01.2025
Остаточний варіант 28.08.2025