

УДК 621.314

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).1.28](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).1.28)**MODELING OF DYNAMIC MODES AND OPTIMIZATION
OF COMBINED FILTERS WITH SEQUENTIAL HARMONIC COMPENSATION****МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ
І ОПТИМІЗАЦІЯ КОМБІНОВАНИХ ФІЛЬТРІВ
З ПОСЛІДОВНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ГАРМОНІК**

Volodymyr M. Ryaben'kyi
optron2@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6998-746X

Serhii L. Trybulkevych
sergiy.trybulkevich@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5783-6616

Oleksandr O. Ushkarenko
oleksandr.ushkarenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3159-330X

Victor. L. Timchenko
viktor.tymchenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-4259-3919

Stanislav V. Dragan
stanyslav.dragan@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8634-782X

В. М. Рябенський,
докт. техн. наук, професор

С. Л. Трибулькевич,
старший викладач

О. О. Ушкаренко,
докт. техн. наук, професор

В. Л. Тимченко,
докт. техн. наук, професор

С. В. Драган,
канд. техн. наук, професор

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. This paper investigates the modeling of dynamic modes and the optimization of combined power filters based on the principle of series harmonic compensation. The study examines a structure that integrates a passive filter (L1, C1) and an active filter, the latter of which utilizes a compensating transformer and an amplifier. Primary focus is given to the analysis of transients during power-up, supply voltage fluctuations, and load switching. It is demonstrated that to achieve high precision in high-performance power supply units, it is necessary to implement active voltage stabilization means, specifically PID controllers.

Purpose. The aim of the study is to evaluate the impact of external disturbances (voltage fluctuations and load switching) on the quality indicators of the power supply for electronic equipment, and to develop measures to reduce these disturbances to acceptable levels through modeling and optimization of filter parameters.

Methodology. Computer modeling in Multisim and MATLAB/Simulink environments was used to study dynamic modes. The methodology included: system response analysis to step changes in input voltage; a parameter variation method to determine the influence of the loop gain, inductance, capacitance, and load resistance on the duration of transients; and the synthesis and tuning of a PID controller to ensure a balance between response speed and system stability.

Results. It was established that the total duration of the filtering device's transient process is approximately 10 seconds; the main delay (6–8 seconds) is caused specifically by the active filter, whereas the influence of the passive filter concludes within 1 second. It was found that an increase in the loop gain (LG) leads to a significant increase in transient duration (from 2 to 10 seconds as LG changes from 10 to 50). Observations showed that abrupt load switching causes short-term voltage dips (up to 1.5 V) and spikes (up to 3 V) lasting up to 40 ms. It is proven that the implementation of a PID controller allows for automatic output voltage correction, compensating for input disturbances and ensuring high precision in maintaining the setpoint.

Scientific Novelty. The novelty lies in the comprehensive analysis of the dynamic characteristics of combined filters with series compensation, which allowed for the identification of the asymptotic nature of the start-up process and the absence of internal self-acceleration mechanisms in basic circuits. For the first time, the effectiveness of integrating

negative feedback with PID control specifically for this type of filter has been demonstrated to neutralize the impact of external interference.

Practical Significance. The results of this work can be applied in the design of precision power supply units and laboratory benches with high stability requirements (ripples not exceeding 0.001–0.01% of the nominal value). The proposed model with voltage feedback significantly enhances the reliability of electronic equipment operating under unstable power grid conditions.

Key words: Active power filter; passive filter; series harmonic compensation; dynamic mode; transient process; PID controller; modeling; Simulink; Multisim; ripple smoothing.

Анотація. У роботі досліджено моделювання динамічних режимів та оптимізацію комбінованих енергетичних фільтрів, що базуються на принципі послідовної компенсації вищих гармонік. Розглядається структура, що поєднує пасивний (L1, C1) та активний фільтри, останній з яких використовує компенсуючий трансформатор та підсилювач. Основна увага приділена аналізу перехідних процесів при вмиканні, коливаннях напруги живлення та комутації навантаження. Доведено, що для забезпечення високої точності в прецизійних блоках живлення необхідно застосовувати активні засоби стабілізації напруги, зокрема ПІД-регулятори.

Мета. Метою дослідження є оцінка ступеня впливу зовнішніх завад (коливань напруги та комутації навантаження) на якісні показники напруги живлення електронної апаратури, а також розробка заходів щодо їх зниження до допустимих рівнів через моделювання та оптимізацію параметрів фільтра.

Методика. Для дослідження динамічних режимів використано комп'ютерне моделювання в середовищах Multisim та MATLAB/Simulink. Методика включала: аналіз відгуку системи на ступінчасту зміну вхідної напруги, метод варіювання параметрів для визначення впливу контурного коефіцієнта підсилення, індуктивності, ємності та опору навантаження на тривалість перехідних процесів, синтез та налаштування ПІД-регулятора для забезпечення балансу між швидкістю відгуку та стійкістю системи.

Результати. Встановлено, що загальна тривалість перехідного процесу фільтруючого пристрою становить близько 10 секунд, причому основна затримка (6–8 сек) обумовлена саме активним фільтром, тоді як вплив пасивного фільтра завершується протягом 1 секунди.

З'ясовано, що зростання контурного коефіцієнта підсилення (КК) призводить до суттєвого збільшення тривалості перехідного процесу (від 2 до 10 сек при зміні КК від 10 до 50).

Зафіксовано, що при різкій комутації навантаження виникають короткотривалі провали (до 1.5 В) та сплески (до 3 В) напруги тривалістю до 40 мс.

Доведено, що впровадження ПІД-регулятора дозволяє автоматично коригувати вихідну напругу, компенсуючи вхідні збурення та забезпечуючи високу точність підтримки заданого значення.

Наукова новизна. Полягає у комплексному аналізі динамічних характеристик комбінованих фільтрів з послідовною компенсацією, що дозволило ідентифікувати асимптотичний характер процесу вмикання та відсутність внутрішніх засобів самоприскорення цього процесу в базових схемах. Вперше продемонстровано ефективність інтеграції негативного зворотного зв'язку з ПІД-регулюванням саме для цього типу фільтрів з метою нівелювання впливу зовнішніх завад.

Практична значимість. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні прецизійних блоків живлення та лабораторних стендів, до яких пред'являються високі вимоги до стабільності (пульсації не більше 0.001–0.01% від номіналу). Запропонована модель зі зворотним зв'язком за напругою дозволяє значно підвищити надійність роботи електронної апаратури в умовах нестабільної мережі живлення.

Ключові слова: активний енергетичний фільтр; пасивний фільтр; послідовна компенсація гармонік; динамічний режим; перехідний процес; ПІД-регулятор; моделювання; Simulink; Multisim; згладжування пульсацій.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасний розвиток прецизійної електроніки вимагає використання джерел живлення з надзвичайно високими показниками стабільності та низьким рівнем пульсацій вихідної напруги, що не повинні перевищувати 0,001–0,01% від номінального значення. Для досягнення таких показників при мінімальних масогабаритних характеристиках доцільно застосовувати комбіновані фільтри, що поєднують пасивні (L-C) ланки та активні енергетичні фільтри (АЕФ) з послідовною компенсацією гармонік.

Однак такі системи експлуатуються в умовах постійних зовнішніх збурень, таких як значні коливання та сплески напруги живлення, а також різка комутація навантаження. Попередні дослідження динамічних режимів виявили, що процес встановлення напруги (вмикання) у таких структурах має асимптотичний характер і може тривати до 6–10 секунд, що є неприпустимим для швидкодіючої прецизійної апаратури. Крім того, при комутації навантаження виникають короточасні провали (до 1,5 В) та сплески (до 3 В) напруги, які не нівелюються базовими схемами фільтрації.

З огляду на це, основними задачами дослідження є:

Оцінка ступеня впливу зовнішніх завад (коливань мережі та стрибків навантаження) на якісні показники напруги живлення прецизійної електронної апаратури за допомогою комп'ютерного моделювання.

Аналіз перехідних процесів у комбінованому фільтрі з послідовною компенсацією для визначення впливу параметрів пасивної частини та контурного коефіцієнта підсилення на тривалість та характер встановлення вихідного сигналу.

Розробка заходів щодо зниження амплітуди перехідних відхилень до допустимих рівнів через впровадження активних засобів стабілізації напруги.

Синтез та оптимізація ПД-регулятора в системі негативного зворотного зв'язку за напругою для забезпечення балансу між швидкістю відгуку та стійкістю системи в умовах динамічних збурень.

Верифікація розроблених моделей у середовищах Multisim та MATLAB/Simulink для підтвердження ефективності запропонованих методів оптимізації динамічних режимів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасний етап розвитку прецизійної електроніки висуває надзвичайно високі вимоги до стабільності напруги живлення, де відхилення не повинні перевищувати 0,001–0,01% від номіналу. Традиційні пасивні фільтри через значні масогабаритні показники та низьку адаптивність поступаються активним енергетичним фільтрам (АЕФ). У останніх публікаціях детально досліджено схемотехніку комбінованих пристроїв, що поєднують пасивні (L-C) ланки з активною послідовною компенсацією гармонік. Доведено, що використання підсилювачів та компенсуючих трансформаторів дозволяє значно зменшити амплітуду пульсацій (до 40 дБ) при мінімальних габаритах. Проте більшість існуючих публікацій фокусується на статичних характеристиках фільтрації, тоді як поведінка системи під час перехідних процесів залишається менш висвітленою.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри високу ефективність придушення гармонік [1, 2] у сталому режимі, аналіз динаміки виявив низку проблем:

1. Значна тривалість перехідних процесів: встановлено, що процес вмикання або реакція на збурення може тривати до 6–10 секунд [3–7], що є критичним для високоточної апаратури.

2. Асимптотичний характер вмикання: у базових схемах АЕФ відсутні внутрішні механізми самоприскорення процесу встановлення напруги.

3. Вплив зовнішніх збурень: комутація навантаження та коливання вхідної напруги викликають провали (до 1,5 В) та сплески (до 3 В) [8, 9], які стандартна схема без спеціального регулювання не здатна миттєво нівелювати.

4. Залежність від коефіцієнта підсилення: зростання контурного коефіцієнта підсилення (КК) суттєво подовжує час перехідного процесу, що вимагає пошуку оптимального балансу [3–7].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є оцінка впливу зовнішніх завад (коливань мережі та стрибків навантаження) на якість вихідної напруги прецизійних блоків живлення, а також оптимізація динамічних характеристик комбінованих фільтрів через впровадження активних засобів стабілізації, зокрема ПД-регуляторів, для забезпечення точності в межах 0,001–0,01%.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження: комп'ютерне моделювання в середовищах Multisim (для аналізу електричних ланцюгів) та MATLAB/Simulink (для синтезу систем керування). Використано метод варіювання параметрів (Parameter Sweep) для оцінки впливу індуктивності, ємності та навантаження на динаміку. Для налаштування регуляторів застосовано інструмент PID Tuner, що дозволяє лінеаризувати модель та забезпечити компроміс між швидкістю відгуку та стійкістю.

Об'єкт дослідження: динамічні режими роботи та процеси стабілізації напруги в комбінованих енергетичних фільтрах з послідовною компенсацією гармонік.

Предмет дослідження: тривалість перехідних процесів, амплітудні відхилення вихідної напруги під впливом завад та параметри ПД-регулятора в системі з негативним зворотним зв'язком.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Активні енергетичні фільтри, що будуються на принципі компенсації вищих гармонік, мають високу ефективність згладжування випрямленої напруги [3–7]. Їх доцільно використовувати в блоках живлення, до яких пред'являються високі вимоги до стабільності і пульсацій вихідної напруги, або струму, які характеризуються величинами, що не перевищують (0.001–0.01)% номінального значення вихідного параметра.

В той же час такі блоки живлення працюють в умовах зовнішніх завад, що обумовлені коливаннями і сплесками – провалами напруги живлення [8, 9, 11, 12] так і комутацією навантажень. Тому важливо оцінити ступінь впливу таких завад на якісні показники напруги живлення електронної апаратури і розробити заходи по їх зниженню до допустимих для навантаження рівнів [13–17].

На рис. 1 наведена принципова схема комбінованого фільтра, що знаходить використання в лабораторних стендах і яка демонструє високу ефективність згладжування гармонік при мінімальних масогабаритних показниках. Вона містить пасивний згладжувач на елементах L1, C1 і активний фільтр (АФ) з послідовною схемою компенсації на основі

компенсуючого трансформатора Т1 і підсилювача U4A. Контурний коефіцієнт підсилення забезпечується відношенням:

$$K_K = \frac{\gamma K(\omega_n)}{1 + \gamma K(\omega_n)} \cdot \frac{R_5}{R_4},$$

де $\gamma = \frac{R_4}{R_5 + R_4}$, ω_n – частота n -ї гармоніки; n – порядок гармонік, а коефіцієнт згладжування визначається формулою:

$$K_3 = K_K \omega_n^2 L C_1,$$

оскільки АФ з послідовною компенсацією приводить до суттєвого збільшення еквівалентного опору навантаження для пасивного фільтра.

Найпростіший шлях оцінки динамічного режиму полягає у використанні впливу типу ступінчастої напруги, величину спадів якої задамо на рівні 50 В.

Осцилограми напруг на виходах IO1, IO2 наведені на рис. 2, а. З вигляду осцилограм витікає, що вплив пасивного фільтра закінчується в межах 1 Сек. при загальній тривалості перехідного процесу всього фільтруючого пристрою біля 10 сек.

На Рис. 2, б наведені такі ж осцилограми, але у випадку живлення блоку від джерела зовнішньої напруги. З аналізу осцилограм можна оцінити вплив пасивного і активного фільтрів на фільтрацію гармонік випрямленої напруги, починаючи з частоти 100 Гц.

З наведених осцилограм можна зробити висновок, що власне блок живлення (випрямляч і трансформатор) не впливають на тривалість перехідного процесу всього блоку, а основна затримка забезпечується активним фільтром.

На Рис 3, а наведені осцилограми перехідного процесу включення блоку при різних значеннях контурного коефіцієнта підсилення K_K (від 10 до 50). З вигляду осцилограм витікає, що зростання останнього приводить до зростання тривалості перехідного процесу. Детальний аналіз перехідних процесів з використанням Мультисім показав, що при прийнятному значенні перехідного процесу, що відрізняється від сталого на 5% тривалість його зростає від 2 сек (при $K_K=10$) до 10 сек (при $K_K=50$).

Зміна опору навантаження (рис. 3, б) приводить до зміни величини постійної складової випрямленої напруги.

Досліди по впливу зміни величини індуктивності дроселя і ємності конденсатора фільтра на динамічний режим включення фільтруючого пристрою відображені на рис. 4 а, б відповідно. Вони фактично відрізняються лише незначним відхиленням постійної складової вихідної напруги.

На рис. 5, а,б наведені осцилограми, що відображають перехідні процеси миттєвого зниження опору

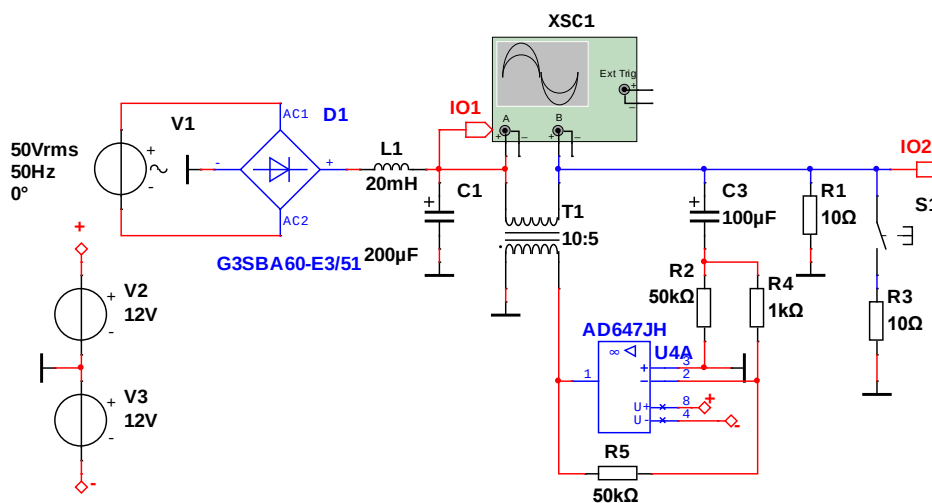


Рис. 1. Принципова схема фільтруючого пристрою

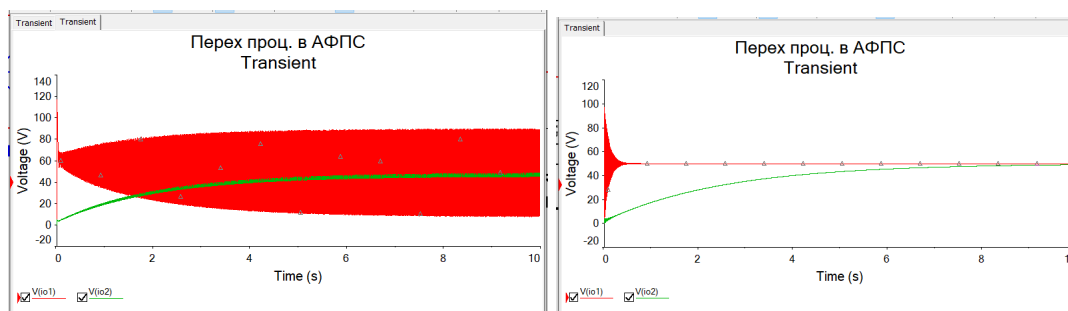


Рис. 2. Осцилограми перехідного процесу включення блоку живлення

навантаження в два рази (рис. 5, а) і його відновлення. Червоним кольором зображена осцилограма напруги до активного фільтра в масштабі 1:20 (одне ділення = 20 В). Синій колір осцилограми відображає напругу на навантаженні (масштаб 1:2). (Рис. 5, б). Фактично ці осцилограми відображають той факт, що при різкому зростанні навантаження має місце короткотривалий провал напруги на величину до 1.5 В тривалістю в межах 10 мС. з наступним сплеском до 3 В. При миттєвому зменшенні навантаження має місце сплеск напруги майже до 2 В. В обох випадках перехідний процес носить коливальний затухаючий характер на протязі до 40 мС.

З вигляду наведених осцилограм слід зробити наступні висновки:

1. Тривалість процесу включення фільтруючого пристрою фактично може досягати 6–8 сек, а сам процес носить асимптотичний характер. Така значна тривалість перехідного процесу означає, що при наявності сплесків – провалів напруги живлення вихідна напруга буде також мати значні відхилення від встановленого значення.
2. У фільтруючому пристрої відсутні засоби, які могли б прискорити цей процес.
3. При комутації навантаження у вихідній напрузі також мають місце сплески і провали напруги, які для систем живлення високої точності є недопустимими.

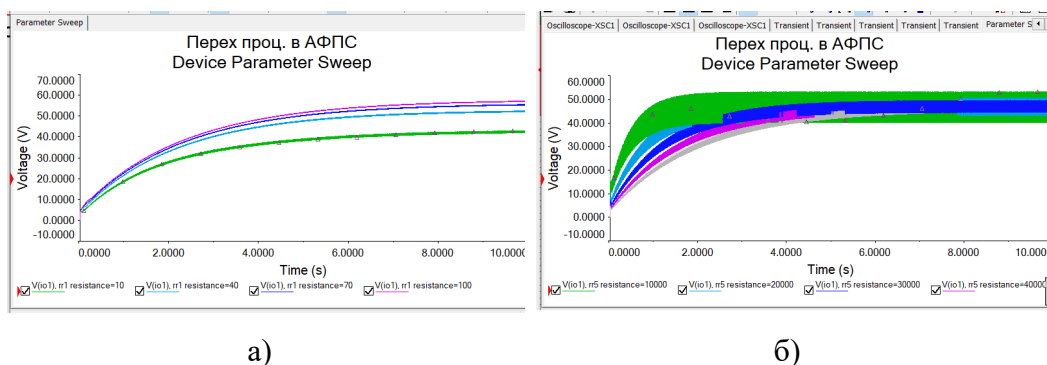


Рис. 3. Динамічні режими при зміні контурного коефіцієнта підсилення (а) і величини опору навантаження (б)

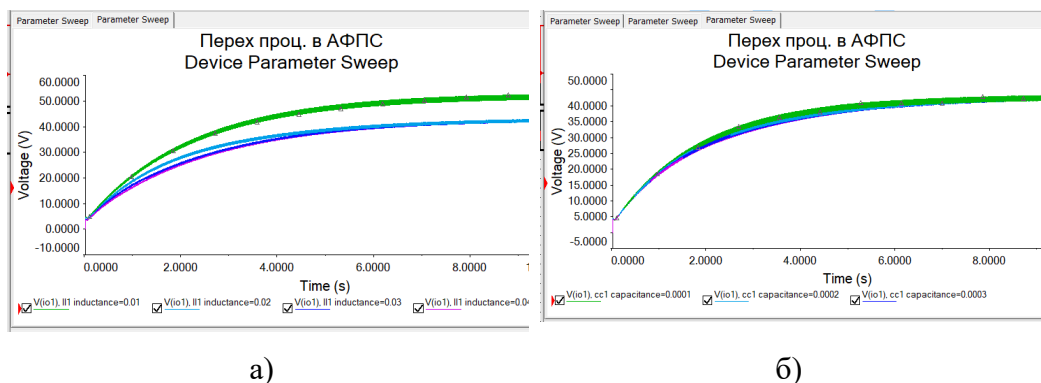


Рис. 4. Зміна індуктивності

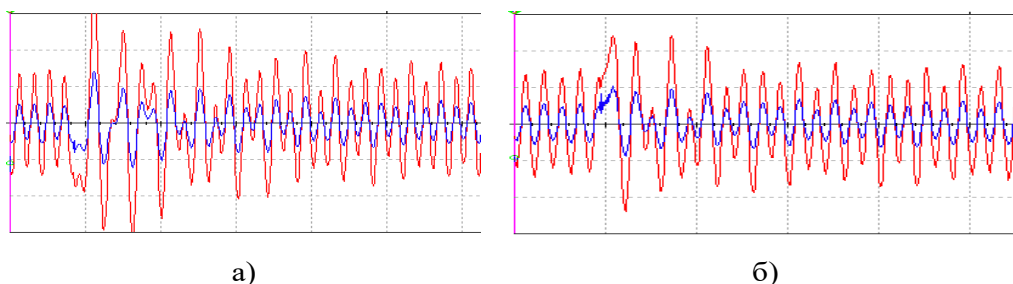


Рис. 5. Зміна опору навантаження

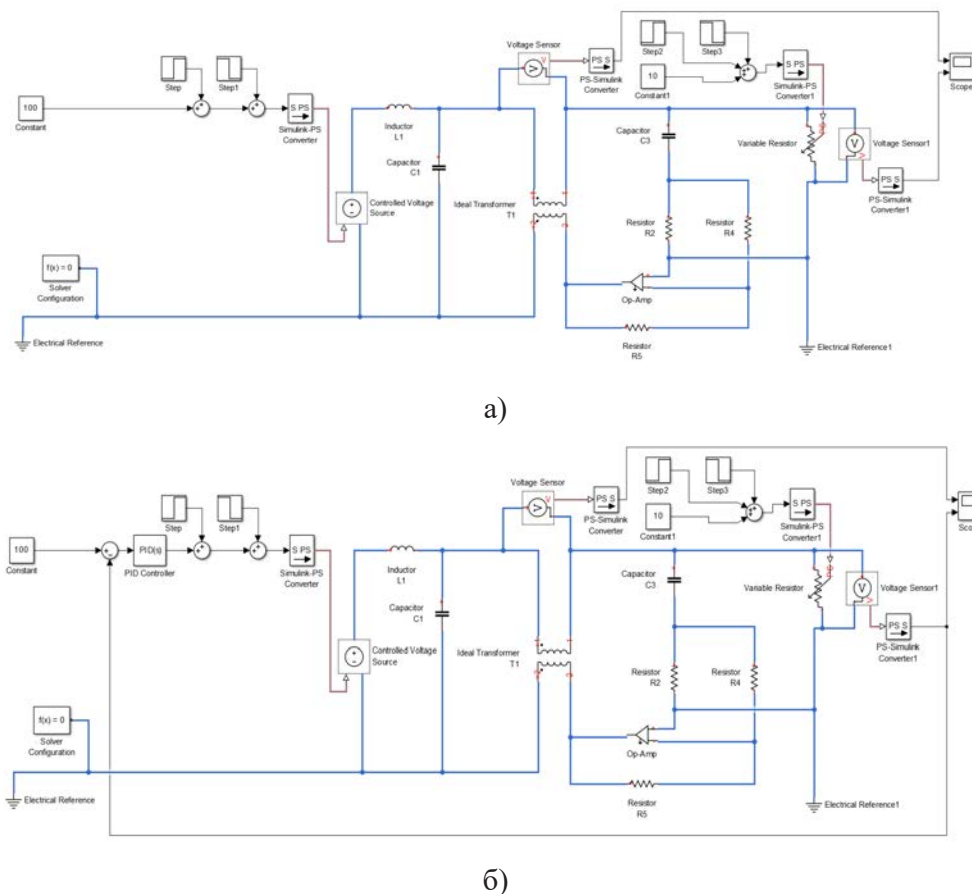


Рис. 6. Блок схема фільтра без додавання зворотного зв'язку (а) та з додаванням негативного зворотного зв'язку за напругою (б)

4. Структури, що містять пасивний і активний фільтр з послідовною компенсацією гармонік повинен мати активні засоби стабілізації напруги такі як компенсаційні стабілізатори, або регульовані джерела живлення з відповідно налаштованими регуляторами.

На рис. 6 показано симуляційні моделі фільтра без додавання зворотного зв'язку (рис. 6, а), та з додаванням негативного зворотного зв'язку за напругою (рис. 6, б).

Активний фільтр використовує активні компоненти (операційні підсилювачі, транзистори) разом із пасивними елементами (R , C) для посилення або пригнічення певних частот сигналу. Вони забезпечують посилення сигналу, мають високий вхідний і низький вихідний імпеданс, що спрощує узгодження їх у схемах.

Коли вхідний сигнал потрапляє на фільтр, він проходить через активні елементи, які зменшують амплітуду небажаних частот. Резистори та конденсатори формують RC-ланцюги, які визначають частотні характеристики фільтра. Після оброблення сигналу через активні компоненти, сформований вихідний сигнал зберігає лише ті частоти, які відповідають специфікаціям конструкції фільтра.

Без регулятора, система не має автоматичного контролю над сигналами на виході, тому вихід

змінюється під дією збурень. Саме це можна спостерігати на рис. 7, де напруга на виході прямо залежить від напруги на вході. Система реагує на зміни сигналу лише на основі статичних характеристик, що обмежує її гнучкість. Без ПІД регулятора, фільтр не може автоматично коригуватися під зміни вхідного сигналу, що може призвести до нестабільності виходу системи в умовах збурень.

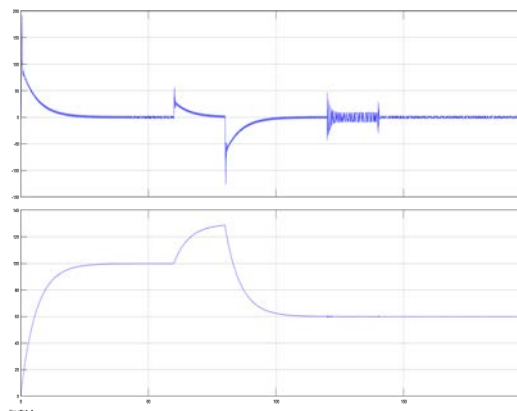


Рис. 7. Відгук системи без додаткового регулятора

Активний фільтр без регулятора може виконувати свою основну функцію фільтрації, але обмеження в адаптації призводять до недостатньої точності. Впровадження ПІД регулятора може покращити характеристику системи, забезпечуючи більш гнучкий і точний контроль виходу.

ПІД регулятор є одним із найпоширеніших типів контролерів в автоматизації, він складається з пропорційної, інтегральної, та диференційної частин. Взаємодія цих складових з підібраними коефіцієнтами забезпечує підтримання напруги на заданому рівні.

Налаштування ПІД-регулятора виконано в середовищі Simulink із використанням вбудованого інструменту PID Tuner (рис. 8). Для початку до моделі на рис. 6, а додано блок PID Controller і забезпечено стандартну схему зворотного зв'язку (задане значення – помилка – регулятор – керувальний вплив на об'єкт) і таким чином отримано модель, показану на рис. 6, б. PID Tuner автоматично лінеаризував модель навколо робочої точки, оцінюючи передавальну функцію замкненого контуру та виділяючи апроксимацію низького порядку з часом запізнення для подальшого тюнінгу. Налаштування виконано з урахуванням компромісу «швидкість – стійкість»; параметри задані для досягнення вимог до стійкості та швидкості відгуку до отримання прийнятного перерегулювання та часу встановлення.

Пропорційна (P) частина відповідає за миттєву реакцію на відхилення від заданого значення. Пропорційний коефіцієнт (K_p) визначає, наскільки сильно регулятор буде реагувати на відхилення. Збільшення пропорційних значень дає швидшу реакцію, але це також може призвести до коливань.

Інтегральна (I) частина відповідає за усунення постійної складової помилки. Інтегральний

коефіцієнт (K_i) забезпечує корекцію на основі історичних значень помилки, завдяки чому регулятор може зменшити або усунути тривалі помилки. Ця складова хоча й невелика, вона буде збільшувати вихідний сигнал, коли помилка залишається протягом деякого часу. Це дасть можливість усунути залишкову помилку.

Диференційна (D) частина реагує на швидкість зміни помилки. Диференційний коефіцієнт (K_d) дозволяє прогнозувати майбутнє відхилення, базуючись на поточній швидкості зміни, що допомагає зменшити коливання.

Параметр N параметр використовується для фільтрації диференційного зворотного зв'язку, щоб уникнути шуму в системі. Чим більший N, тим менш чутливий контролер до високочастотного шуму.

Диференційна частина з негативним значенням буде впливати на стабільність, зменшуючи вихід регулятора за умов зростання швидкості помилки. Її фільтрація допоможе уникнути надмірного впливу шумів на диференційний вихід.

Обрані параметри ПІД регулятора забезпечують баланс між швидкою реакцією та стабільністю системи. Використовуючи таку модель, активний фільтр з послідовною компенсацією може ефективно регулювати вихідну величину, забезпечуючи точність і надійність роботи прецизійних блоків живлення.

Фільтр з ПІД регулятором працює в системі зворотного зв'язку, де вихідний сигнал (напруга) проводиться назад до вхідного порту для порівняння з заданим значенням (референс). На цьому етапі виконуються такі функції:

– Вимірювання поточної вихідної напруги, де сигнал порівнюється з заданим значенням, і будь-які відхилення передаються до ПІД регулятора.

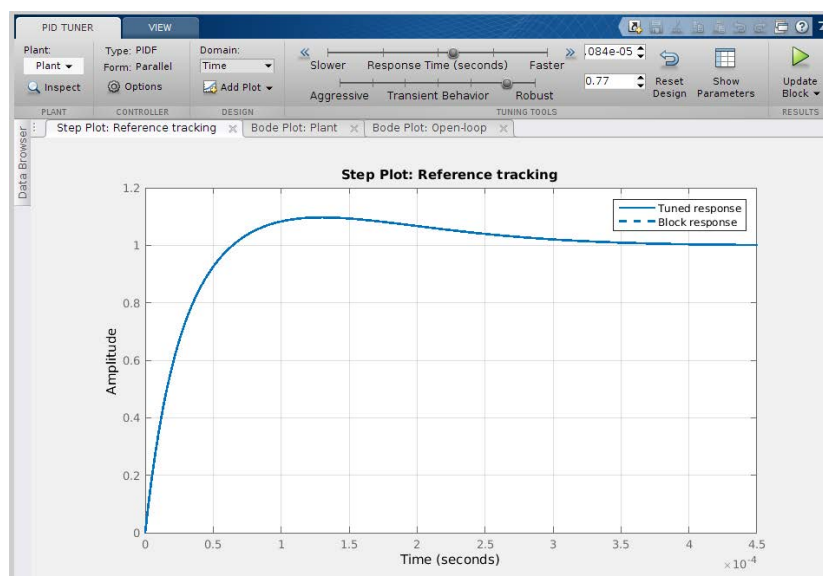


Рис. 8. Відгук лінеаризованої системи на сходинкове збудження в інтерфейсі PID Tuner

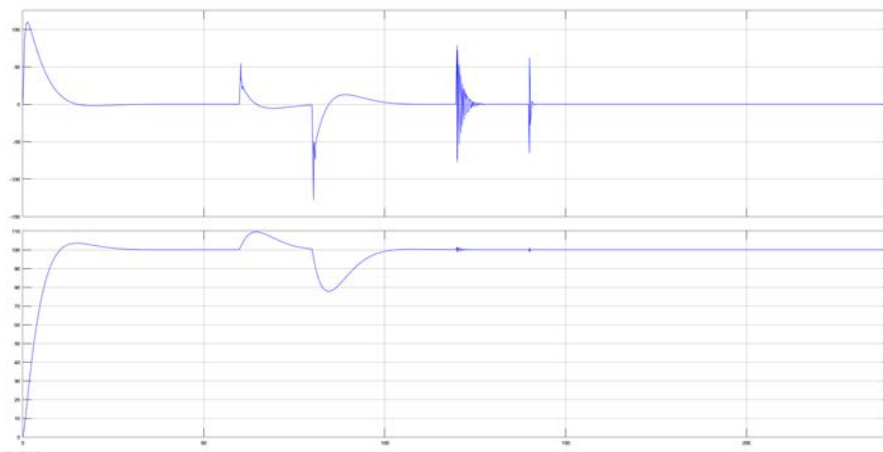


Рис. 9. Відгук системи з ПІД регулятором

– Аналіз та корекція, коли регулятор обчислює необхідне коригування на основі пропорційного, інтегрального та диференціального компонентів, щоб досягти бажаного виходу.

Після автоматичного підбору коефіцієнтів (K_p , K_i , K_d та параметр фільтра диференціального члена) параметри були застосовані в блоці PID і верифіковані на повній нелінійній моделі шляхом серії симуляцій: переходи за ступінчастих збуджень, реакції на збурення у вигляді змін напруги живлення на вході та варіацій навантаження на виході.

Результати верифікації показали задовільні показники. Як можна бачити на рис. 9, активний фільтр з послідовною компенсацією з ПІД регулятором забезпечує гнучкість та високу точність підтримання заданого значення виходу. Збурення у вигляді змін напруги на вході компенсуються ПІД регулятором впродовж часу перехідного процесу.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що комбіновані фільтри, які поєднують пасивну ($L1$, $C1$) та активну ланки з послідовною компенсацією, забезпечують надвисоку ефективність згладжування випрямленої напруги. Це дозволяє використовувати їх у прецизійних блоках живлення, де рівень пульсацій не повинен перевищувати 0,001–0,01% від номіналу.

Аналіз динамічних режимів показав, що загальна тривалість перехідного процесу при вмиканні пристрою становить близько 10 сек. При цьому пасивний фільтр завершує роботу протягом 1 секунди, тоді як основна затримка (6–8 сек) обумовлена саме активною частиною.

Виявлено, що процес встановлення вихідної напруги має асимптотичний характер. У базових схемах фільтрів відсутні внутрішні засоби для самоприскорення цього процесу, що робить вихідну напругу вразливою до відхилень при наявності зовнішніх збурень у мережі живлення.

Встановлено пряму залежність між швидкістю відгуку та контурним коефіцієнтом підсилення (КК): при збільшенні КК від 10 до 50 тривалість перехідного процесу зростає з 2 до 10 секунд відповідно.

Зафіксовано, що різка комутація навантаження викликає недопустимі для прецизійної апаратури перехідні відхилення: провали напруги до 1,5 В та сплески до 3 В тривалістю до 40 мс.

Доведено, що для оптимізації динамічних характеристик необхідно впроваджувати активні засоби стабілізації напруги, зокрема негативний зворотний зв'язок із ПІД-регулятором. Моделювання підтвердило, що ПІД-регулювання дозволяє ефективно компенсувати входні завади та зміни навантаження, забезпечуючи стабільність вихідних параметрів у межах заданої точності.

REFERENCES

- [1] VD MAIS. (n.d.). Osoblyvosti vykorystannia aktyvnykh filtriv konduktivnykh elektromagnitnykh zavod [Features of using active conductive electromagnetic interference filters]. Retrieved February 20, 2026, from <https://vdmais.ua/uk/articles/osoblyvosti-vikorystannia-aktivnih-filtriv-konduktivnih-elektromagnitnih-zavod/>
- [2] Texas Instruments. (2025). *Using an active EMI filter in power converters to reduce EMI filter size and cost* (Technical Report No. SLYP833). Retrieved February 20, 2026, from <https://www.ti.com/lit/ml/slyp833/slyp833.pdf>
- [3] Semenenko, Y. O. (2017). *Stabilizuiuchi sylovi aktyvni filtry dlia pidvyshchennia efektyvnosti tiahovoho elektropostachannia postiinoho strumu* [Stabilizing power active filters to increase the efficiency of DC traction power supply] (Candidate dissertation, Ukrainian State University of Railway Transport).
- [4] Shcherbak, Y. V., & Semenenko, Y. O. (2013). Analiz dynamichnykh kharakterystyk kombinovanoho filtra tiahovoi pidstantsii [Analysis of dynamic characteristics of the combined filter of a traction substation]. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, (142). <https://doi.org/10.18664/1994-7852.142.2013.84608>

- [5] Ryaben'kyi, V. M., Hubarevych, V. M., Marunia, Y. V., Khudiakova, I. M., & Trybulkevych, S. L. (2025). Osoblyvosti proektuvannia aktyvnykh enerhetychnykh filtriv [Design features of active power filters]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2025(6), 3–8. <https://doi.org/10.15407/techned2025.06.003>
- [6] Ryaben'kyi, V. M., Trybulkevych, S. L., Khudiakova, I. M., & Kudriavtsev, O. S. (2025a). Kaskadne naroshchuvannia aktyvnykh enerhetychnykh filtriv iz poslidovnoiu kompensatsiieiu [Cascade growth of active power filters with series compensation]. *Zbirnyk Naukovykh Prats NUK*, (2 (500)), 201–207. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).28](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).28)
- [7] Ryaben'kyi, V. M., Trybulkevych, S. L., Khudiakova, I. M., & Kudriavtsev, O. S. (2025b). Comparison of active power filters with series and parallel harmonic compensation schemes. *Zbirnyk Naukovykh Prats NUK*, (2 (500)), 193–200. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).27](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).27)
- [8] Mohanty, A., Ray, P. K., Ranjan Das, S., Soudagar, M. E. M., Ramesh, S., Khan, T. M. Y., Almakayeel, N., Mahmood Ali, M., & Bashir, M. N. (2024). Enhancing power quality in contemporary utility systems: A comprehensive analysis of active power filters and control strategies. *Energy Reports*, 11, 5575–5592. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.033>
- [9] Li, L., Yu, X., Chai, Z., Zhu, X., Li, G., & Shi, Y. (2025). The design of an active filter for DC microgrids. *Journal of Physics: Conference Series*, 3090(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3090/1/012011>
- [10] Xiao, L. Zhang, L. (1998). Simulation study of an active DC filter using frequency-domain control system, *Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives (IEE Conf. Publ. No. 456)*, London, UK, 1998, pp. 483–488, doi: 10.1049/cp:19980574.
- [11] Li, H., Zhang, K. Zhao, K. (2011). Active DC-link power filter for single phase PWM rectifiers, 8th International Conference on Power Electronics – ECCE Asia, Jeju, Korea (South), 2011, pp. 2920–2926, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944792.
- [12] Engelhart, B., Bazzi, A. (2020). Design and Control of a Series DC Active Filter (SDAF) for MVDC Marine Applications, IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, 2020, pp. 948–953, doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161757.
- [13] Wang, Y., Wang, Y., Chen, S.-Z., Zhang, G., & Zhang, Y. (2018). A Simplified Minimum DC-Link Voltage Control Strategy for Shunt Active Power Filters. *Energies*, 11(9), 2407. <https://doi.org/10.3390/en11092407>
- [14] Fatyga, K., & Zdanowski, M. (2025). A DC-Link Current Pulsation Compensator Based on a Triple-Active Bridge Converter Topology. *Electronics*, 14(16), 3196. <https://doi.org/10.3390/electronics14163196>
- [15] Habibullin, M.M., Pavlov, I.S., Mescheryakov, V.N., Valtchev, S. (2014). Active Power Filter with Relay Current Regulator and Common DC Link for Compensation of Harmonic Distortion in Power Grids. In: Camarinha-Matos, L.M., Barrento, N.S., Mendonça, R. (eds) Technological Innovation for Collective Awareness Systems. DoCEIS 2014. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 423. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54734-8_47
- [16] Figueroa, D., Morán, L., Joos, G., & Dixon, J. (2010). Series Active Compensation of Current Harmonics Generated by High Power Rectifiers. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(08), 1525–1529. <https://doi.org/10.24084/repqj08.711>
- [17] Huynh, P., & Banerjee, A. (2021). Active Voltage-Ripple Compensation in an Integrated Generator-Rectifier System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2270–2282. <https://doi.org/10.1109/tpe.2020.3006510>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Особливості використання активних фільтрів кондуктивних електромагнітних завод. (n.d.). VD MAIS. Retrieved February 20, 2026, from <https://vdmis.ua/uk/articles/osoblivosti-vikoristannya-aktivnih-filtriv-konduktivnih-elektromagnitnih-zavad/>
- [2] Using an active EMI filter in power converters to reduce EMI filter size and cost. Retrieved February 20, 2026, from <https://www.ti.com/lit/ml/slyp833/slyp833.pdf> (date of access: 05.12.2025).
- [3] Семененко, Ю. О. (2017). Стабілізуючі силові активні фільтри для підвищення ефективності тягового електропостачання постійного струму [Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук]. Український державний університет залізничного транспорту міністерство освіти і науки України, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова.
- [4] Щербак, Я. В., & Семененко, Ю. О. (2013). Аналіз динамічних характеристик комбінованого фільтра тягової підстанції. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, (142). <https://doi.org/10.18664/1994-7852.142.2013.84608>
- [5] Рябенський, В. М., Губаревич, В. М., Маруня, Ю. В., Худякова, І. М., & Трибулькевич, С. Л. (2025). Особливості проектування активних енергетичних фільтрів. Техн. електродинаміка. 2025(6) С. 3–8. <https://doi.org/10.15407/techned2025.06.003>
- [6] Рябенський, В. М., Трибулькевич, С. Л., Худякова, І. М., & Кудрявцев, О. С. (2025). Каскадне нарощування активних енергетичних фільтрів із послідовною компенсацією. Збірник наукових праць НУК, (2 (500)), 201–207. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).28](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).28)
- [7] Рябенський, В. М., Трибулькевич, С. Л., Худякова, І. М., & Кудрявцев, О. С. (2025b). Порівняння активних енергетичних фільтрів з послідовною і паралельною схемами компенсації гармонік. Збірник наукових праць НУК, (2 (500)), 193–200. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).27](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).27)
- [8] Mohanty, A., Ray, P. K., Ranjan Das, S., Soudagar, M. E. M., Ramesh, S., Khan, T. M. Y., Almakayeel, N., Mahmood Ali, M., & Bashir, M. N. (2024). Enhancing power quality in contemporary utility systems: A comprehensive analysis of active power filters and control strategies. *Energy Reports*, 11, 5575–5592. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.033>

- [9] Li, L., Yu, X., Chai, Z., Zhu, X., Li, G., & Shi, Y. (2025). The design of an active filter for DC microgrids. *Journal of Physics: Conference Series*, 3090(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3090/1/012011>
- [10] Xiao, L. Zhang, L. (1998). Simulation study of an active DC filter using frequency-domain control system, *Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives (IEE Conf. Publ. No. 456)*, London, UK, 1998, pp. 483-488, doi: 10.1049/cp:19980574.
- [11] Li, H., Zhang, K. Zhao, K. (2011). Active DC-link power filter for single phase PWM rectifiers, 8th International Conference on Power Electronics – ECCE Asia, Jeju, Korea (South), 2011, pp. 2920-2926, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944792.
- [12] Engelhart, B., Bazzi, A. (2020). Design and Control of a Series DC Active Filter (SDAF) for MVDC Marine Applications, IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, 2020, pp. 948-953, doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161757.
- [13] Wang, Y., Wang, Y., Chen, S.-Z., Zhang, G., & Zhang, Y. (2018). A Simplified Minimum DC-Link Voltage Control Strategy for Shunt Active Power Filters. *Energies*, 11(9), 2407. <https://doi.org/10.3390/en11092407>
- [14] Fatyga, K., & Zdanowski, M. (2025). A DC-Link Current Pulsation Compensator Based on a Triple-Active Bridge Converter Topology. *Electronics*, 14(16), 3196. <https://doi.org/10.3390/electronics14163196>
- [15] Habibullin, M.M., Pavlov, I.S., Mescheryakov, V.N., Valtchev, S. (2014). Active Power Filter with Relay Current Regulator and Common DC Link for Compensation of Harmonic Distortion in Power Grids. In: Camarinha-Matos, L.M., Barrento, N.S., Mendonça, R. (eds) Technological Innovation for Collective Awareness Systems. DoCEIS 2014. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 423. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54734-8_47
- [16] Figueroa, D., Morán, L., Joos, G., & Dixon, J. (2010). Series Active Compensation of Current Harmonics Generated by High Power Rectifiers. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(08), 1525–1529. <https://doi.org/10.24084/repqj08.711>
- [17] Huynh, P., & Banerjee, A. (2021). Active Voltage-Ripple Compensation in an Integrated Generator-Rectifier System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2270–2282. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.3006510>

© Рябенський В. М., Трибулькевич С. Л., Ушкаренко О. О., Тимченко В. Л., Драган С. В.

Дата першого надходження статті до видання: 11.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)