

УДК 004:681.5
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).22](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).22)

FEATURES OF CASCADE CONNECTION OF ACTIVE FILTERS WITH PARALLEL AND SERIES CONNECTION OF COMPENSATING E.M.F.

ОСОБЛИВОСТІ КАСКАДНОГО ВКЛЮЧЕННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ З ПАРАЛЕЛЬНИМ І ПОСЛІДОВНИМ ВКЛЮЧЕННЯМ КОМПЕНСУЮЧИХ Е.Р.С.

Volodymyr M. Ryabenkyi¹
optron2@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6998-746X

Volodymyr M. Gubarevych²
vovolga40@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2416-9858

Yuliia V. Marunya²
marunia@ied.org.ua
ORCID: 0000-0003-0071-1702

Iryna M. Khudiakova¹
Iryna.Khudiakova@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2677-7841

Serhii L. Trybulkevich¹
sergiy.trybulkevich@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5783-6616

В. М. Рябенський¹,
докт. техн. наук, професор

В. М. Губаревич²,
канд. техн. наук

Ю. В. Маруня²,
канд. техн. наук

І. М. Худякова¹,
канд. пед. наук

С. Л. Трибулькевич¹,
сташий викладач

¹ *Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

² *The National Academy of Sciences of Ukraine The Institute of Electrodynamics, Kyiv*

¹ *Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

² *Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ*

Abstract. The paper investigates the features of cascading active filters (AF) with parallel and serial compensation of compensating emf. The analysis of the properties of the combined filter is carried out based on structural diagrams and expressions for complex current values. The expression for the total filtration coefficient, which contains a passive and three active components, is determined. It is established that cascading AF allows us to expect a significant increase in the efficiency of the filtering device. The relationship between the filters is investigated, it is shown that the previously included AF with parallel compensation does not affect the operation and stability of the next filter with serial compensation, but the next filter affects the previous one. Model studies have revealed the problem of self-oscillations under certain conditions. The use of a compensating transformer in the first filter is proposed to ensure stability.

Purpose. The study is an analysis of the features of cascading active filters with parallel and serial compensation of compensating emf, as well as determining the conditions for their stable and effective joint operation

Method. The study was conducted by analyzing the structural diagrams of the cascade AF, deriving analytical expressions for the currents and the filtration coefficient. The transfer functions of the amplifiers $K_{A1}(p)$, $K_{A2}(p)$ and the transfer functions of the main branches of both active filters were considered. To check the operation and stability of the combined filter, a circuit was drawn up in the Multisim environment and model studies were conducted. To establish the cause of self-oscillations, the amplitude-frequency characteristic (AFC) of the combined filter was recorded. The problem of self-oscillations was eliminated by making changes to the circuit, in particular, by installing a transformer with a leakage inductance of 100 μH in the parallel compensation branch.

Results. The stability of the active filter with series compensation (the second filter) is determined by the frequency properties of the amplifier with the transformer and does not depend on the previously included AF with parallel compensation. However, the transfer function of the previous filter includes elements of the next. The influence of the last filter on the previous one is determined by the link $Z_1(p)/Z_4(p)$. With increasing compensation depth of the sequential filter, the efficiency of the first filter should decrease.

During model studies, it was found that with a high contour gain of the second AF, low-frequency self-oscillations occur at a frequency of 14–17 Hz. The frequency response showed a resonant spike of up to 21.2 dB at a frequency of 16.7 Hz, which leads to self-oscillations.

Elimination of the resonant spike was achieved by installing a compensating transformer with leakage inductances of 100 μH in the parallel compensation branch. After this, self-oscillations did not occur.

The total filtration coefficient of the filtering device (expression (3)) contains a passive component and three active components, which indicates a significant increase in the efficiency of the filtering device when cascading AF.

The passive filter reduces the ripple amplitude from 84 V to 45 V. At the output of the active filter, the voltage amplitude is about 3 V. The second AF can provide a ripple suppression coefficient of 10–20 times and operates practically independently of the first.

Scientific novelty. The scientific novelty consists in establishing the features of the interaction between cascaded active filters with different types of compensation. In particular, it was established for the first time that the stability of a filter with serial compensation is autonomous, while the efficiency of a filter with parallel compensation depends on the depth of compensation of the next filter through a certain link $Z1(p)/Z4(p)$. The need to use a compensating transformer in the first filter to ensure the stability of the combined circuit, which allows avoiding resonant surges and self-oscillations, is also substantiated.

Practical importance. The practical significance of the work lies in the development of specific recommendations for the synthesis and design of combined active filters:

1. The second filter (with series compensation) can be designed without taking into account the previous links regarding its stability.
2. To achieve stable operation of the combination of active filters and avoid self-oscillations, the first filter (parallel compensation) should be built using a compensating transformer.
3. The synthesis of a parallel filter requires the inclusion of a capacitor C and the selection of its value from the condition that the loop gain along the branch covering both AFs is less than unity.
4. The possibility of significantly increasing the efficiency of the filtering device due to cascading has been confirmed.

Key words: active filter; cascading; parallel compensation; series compensation; filtration coefficient; self-oscillations; compensating transformer; transfer function.

Анотація. У роботі досліджено особливості каскадного включення активних фільтрів (АФ) з паралельною та послідовною компенсацією компенсуючих е.р.с.. Проведено аналіз властивостей комбінованого фільтра на основі структурних схем та виразів для комплексних величин струмів. Визначено вираз для загального коефіцієнта фільтрації, який містить пасивну та три активні складові. Встановлено, що каскадування АФ дозволяє очікувати суттєвого підвищення ефективності фільтруючого пристрою. Досліджено взаємозв'язок між фільтрами, показано, що попередньо включений АФ з паралельною компенсацією не впливає на роботу і стійкість наступного фільтра з послідовною компенсацією, але наступний фільтр впливає на попередній. Модельні дослідження виявили проблему виникнення автоколивань при певних умовах. Запропоновано використання компенсуючого трансформатора в першому фільтрі для забезпечення стійкості.

Мета. Дослідження є аналіз особливостей каскадного включення активних фільтрів з паралельним і послідовним включенням компенсуючих е.р.с., а також визначення умов їх стійкої та ефективної спільної роботи

Методика. Дослідження проводилося шляхом аналізу структурних схем каскадного АФ, виведення аналітичних виразів для струмів та коефіцієнта фільтрації. Були розглянуті передаточні функції підсилювачів $KA1(p)$, $KA2(p)$ та передаточні функції головних гілок обох активних фільтрів. Для перевірки роботи і стійкості комбінованого фільтра була складена схема в середовищі Мультисім (Multisim) та проведені модельні дослідження. Для встановлення причини автоколивань була знята амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) комбінованого фільтра. Проблема автоколивань усувалася шляхом внесення змін у схему, зокрема, встановленням трансформатора з індуктивністю розсіювання 100 мкГн в гілці паралельної компенсації.

Результати. Стійкість активного фільтра з послідовною компенсацією (другий фільтр) визначається частотними властивостями підсилювача з трансформатором і не залежить від попередньо включеного АФ з паралельною компенсацією. Однак, в передаточну функцію попереднього фільтра входять елементи наступного. Вплив останнього фільтра на попередній визначається ланкою $Z1(p)/Z4(p)$. З підвищенням глибини компенсації послідовного фільтра ефективність першого фільтра повинна зменшуватись.

При модельних дослідженнях було виявлено, що при високому контурному коефіцієнті підсилення другого АФ виникають низькочастотні автоколивання на частоті 14–17 Гц. АЧХ показала резонансний сплеск до 21,2 дБ на частоті 16,7 Гц, що і призводить до автоколивань.

Усунення резонансного сплеску було досягнуто шляхом встановлення компенсуючого трансформатора з індуктивностями розсіювання 100 мкГн в гілці паралельної компенсації. Після цього автоколивання не виникали.

Загальний коефіцієнт фільтрації фільтруючого пристрою (вираз (3)) містить пасивну складову та три активні складові, що свідчить про суттєве підвищення ефективності фільтруючого пристрою при каскадуванні АФ.

Пасивний фільтр зменшує амплітуду пульсацій з 84 В до 45 В. На виході активного фільтра амплітуда напруги складає близько 3 В. Другий АФ може забезпечувати коефіцієнт подавлення пульсацій у 10–20 разів і працює практично незалежно від першого.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає у встановленні особливостей взаємодії між касадно включеними активними фільтрами з різними типами компенсації. Зокрема, вперше встановлено, що стабільність фільтра з послідовною компенсацією є автономною, тоді як ефективність фільтра з паралельною компенсацією залежить від глибини компенсації наступного фільтра через визначену ланку $Z1(p)/Z4(p)$. Також обґрунтовано необхідність використання компенсуючого трансформатора у першому фільтрі для забезпечення стійкості комбінованої схеми, що дозволяє уникнути резонансних сплесків та автоколивань.

Практична значимість. Практична значимість роботи полягає у розробці конкретних рекомендацій для синтезу та проектування комбінованих активних фільтрів:

1. Другий фільтр (з послідовною компенсацією) може проектуватись без врахування попередніх ланок щодо його стійкості.
2. Для досягнення стійкої роботи комбінації активних фільтрів та уникнення автоколивань перший фільтр (паралельна компенсація) повинен будуватись з використанням компенсуючого трансформатора.
3. Синтез паралельного фільтра вимагає включення конденсатора С і вибору його величини з умови, щоб контурний коефіцієнт підсилення по гілці, що охоплює обидва АФ, був менше одиниці.
4. Підтверджено можливість суттєвого підвищення ефективності фільтруючого пристрою завдяки каскадуванню.

Ключові слова: активний фільтр; касадне включення; паралельна компенсація; послідовна компенсація; коефіцієнт фільтрації; автоколивання; компенсуючий трансформатор; передаточна функція.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задачі підвищення енергоефективності вторинних джерел живлення завжди є актуальними, оскільки вони є найбільш енергозатратними і найменш надійними в будь-яких електронних системах [2]. Водночас зростаючі вимоги до стабільності випрямленої напруги та зменшення її пульсацій призводять до зростання масогабаритних показників вторинних джерел живлення [2].

Одним із напрямків зменшення масогабаритних показників фільтрів вищих гармонік випрямленої напруги є використання активних енергетичних фільтрів (АЕФ) із послідовним включенням компенсуючого трансформатора, до первинної обмотки якого подається підсилена напруга пульсацій [2]. На жаль, ефективність таких фільтрів обмежується стійкістю підсилювача як у діапазоні високих, так і низьких частот [2].

Вимоги до стабільності особливо зросли у зв'язку з розвитком мікро-, нано- та прецизійної електроніки, де потрібні джерела живлення з високою чутливістю [3]. Компенсаційні стабілізатори з прохідним транзистором, які використовуються для таких блоків живлення, повинні мати значний запас за напругою для витримування пульсацій, що часто призводить до значних втрат енергії та погіршення температурного режиму (падіння напруги до 1.5–2 В) [3].

У зв'язку з обмеженою ефективністю окремих фільтрів постає актуальне питання касадного нарощування таких АЕФ з метою підвищення загальної ефективності фільтрації при забезпеченні мінімального взаємного впливу між касадами [2].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Загальні вимоги та застосування АЕФ: Регульовані джерела живлення постійного струму з прецизійними характеристиками широко використовуються у наукових дослідженнях, промисловому виробництві та інших сферах [1]. Необхідність у забезпеченні прецизійних характеристик вихідної напруги вторинних джерел живлення, особливо за наявності шумів і завад, призвела до необхідності встановлення стандартів [1]. Активні фільтри (АФ) є рішенням для усунення гармонік завдяки високій точності фільтрації та й динамічній реакції [9].

Типи та особливості АЕФ: Існує два основних напрямки побудови АЕФ: з послідовною та паралельною компенсацією [3].

1. Активні фільтри з послідовною компенсацією (АФПС):

Діють як контрольоване джерело напруги, послідовно підключене до навантаження [5, 12]. Змінна складова напруги на навантаженні підсилюється і через трансформатор подається в протифазі [3].

АФПС повинен встановлюватись після пасивного фільтра з низьким вихідним опором [3].

Недоліком АФПС є наявність трансформатора з підмагнічуванням постійним струмом, що призводить до завищених масогабаритних показників [3].

2. Активні фільтри з паралельною компенсацією (АФПР):

Найбільш поширений тип, що підключається паралельно до навантаження [5]. Діє як контрольоване

джерело струму [5, 12], компенсуючи спотворення струму та реактивну потужність [5].

АФПР повинен встановлюватись після фільтра з високим вихідним опором [3].

Комбіновані та каскадні структури: В останні роки розробники почали використовувати комбіновані фільтри, під якими мається на увазі послідовне з'єднання пасивного і активного фільтрів (АЕФ) [3].

Каскадування АФ дозволяє досягти суттєвого підвищення ефективності фільтруючого пристрою, оскільки загальний коефіцієнт фільтрації містить добуток коефіцієнтів підсилення каскадів [2].

У DC мікромережах АФ використовуються для компенсації гармонічних струмів на стороні постійного струму нелінійних навантажень (наприклад, інверторів), щоб запобігти періодичним коливанням напруги DC-шини [5].

Можливе застосування гібридних схем (наприклад, поєднання послідовних і паралельних АФ) для комплексного керування гармонічною напругою та струмом.

Вимоги до проектування та контролю:

Ефективність АЕФ повністю визначається контурним коефіцієнтом підсилення та стійкістю [3, 1].

При проектуванні АЕФ слід вирішувати у взаємозв'язку три основні задачі: проектування трансформатора, обґрунтування та проектування підсилювача, а також забезпечення стійкості замкненої системи, особливо для діапазону низьких частот [3].

Потужність, що віддається підсилювачем активного фільтра (як з послідовною, так і з паралельною компенсацією), визначається лише реактивною складовою [3].

Визначення мінімального значення напруги DC-шини є критичним для забезпечення задовільної компенсації при мінімізації комутаційних втрат і шуму [9]. Показано, що збільшення напруги DC-шини вище мінімального значення не покращує компенсацію, але збільшує гармонічний струм комутаційної частоти, погіршуючи загальний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) [9].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значний розвиток АЕФ, дослідження каскадних структур, особливо тих, що поєднують активні фільтри з паралельним і послідовним включенням компенсуючих ЕРС, виявили низку невіршених проблем:

1. Взаємний вплив між каскадами активного фільтра:

У попередніх дослідженнях, як правило, розглядалася робота окремих фільтрів без урахування їх каскадного поєднання [2].

Недостатньо досліджена проблема взаємного впливу між каскадами при їх послідовному включенні

відносно навантаження, зокрема вплив цих взаємодій на стійкість та ефективність фільтрації [2].

Виявлено, що взаємний вплив активних фільтрів може призводити до зниження стійкості кожного з них і до можливої появи автоколивань як окремого фільтра, так і всього фільтруючого пристрою в цілому [2].

2. Складність синтезу комбінованих АФ:

Через взаємний вплив послідовне проектування комбінованого фільтра (пасивний + активний) у більшості випадків не можливе [3].

При каскадному включенні АФПР і АФПС (де АФПС є наступним) показано, що АФПС може проектуватись незалежно, але передатна функція попереднього АФПР залежить від елементів наступного АФПС. Це ускладнює синтез АФПР.

Вплив наступного фільтра на попередній (АФПР) визначається ланкою, яка встановлює взаємозв'язок і може спричинити автоколивання, що охоплюють обидва фільтри.

Реалізація бажаної частотної характеристики фільтра з паралельною компенсацією є значно складнішою, ніж для фільтрів з послідовною компенсацією, оскільки необхідно враховувати частотні властивості попередньо включеного пасивного фільтра, що може обмежувати застосування АФПР [3].

3. Умови уникнення автоколивань:

Необхідний аналіз умов виникнення автоколивань у двокаскадних структурах та механізмів їх уникнення [2].

Для усунення небажаних автоколивань необхідно, щоб контурний коефіцієнт підсилення по гілці, що охоплює обидва активні фільтри, був менше одиниці.

При каскадуванні АФПР і АФПС виявлено, що резонансний сплеск на низьких частотах, спричинений частотною характеристикою пасивного фільтра, може призводити до автоколивань, які усуваються шляхом використання компенсуючого трансформатора у гілці паралельної компенсації.

Проблема, що вирішується, полягає у пошуку ефективної архітектури каскадної структури АЕФ, яка дозволяє уникнути негативного взаємного впливу між каскадами, запобігти виникненню автоколивань, підвищити ефективність фільтрації пульсацій та забезпечити стійкість роботи фільтра в широкому частотному діапазоні [2].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є аналіз особливостей каскадного включення активних фільтрів (АФ) з паралельним і послідовним включенням компенсуючих е.р.с., а також виявлення та визначення умов їх стійкої та ефективної спільної роботи

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є принципова схема фільтра, що містить каскадне включення активних

фільтрів з паралельною компенсацією (АФПР) та послідовною компенсацією.

Предметом дослідження є:

1. Особливості взаємозв'язку та впливу активних фільтрів один на одного в каскаді, зокрема, вплив послідовного фільтра на попередньо включений паралельний фільтр через ланку $Z1(p)/Z4(p)$.

2. Властивості комбінованого фільтра, які впливають зі структурної схеми.

3. Загальний коефіцієнт фільтрації (q_n) фільтруючого пристрою, який включає пасивну і три активні складові.

4. Умови стійкості роботи комбінованого АФ.

5. Властивості передаточних функцій головних гілок обох активних фільтрів.

Методи дослідження

Для досягнення поставленої мети використовувались наступні методи:

1. Теоретичний аналіз та моделювання. Аналіз проводився на основі структурних схем каскадного АФ та виведення аналітичних виразів для комплексних величин струмів I_{Z1} та I_{Z2} . Також було знайдено вираз для загального коефіцієнта фільтрації q_n .

2. Аналіз передаточних функцій.

3. Комп'ютерне моделювання (Мультисім). Для проведення модельних досліджень була складена схема в середовищі моделювання.

4. Частотний аналіз. Для встановлення причини виникнення автоколивань (виявлених при моделюванні) була знята амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) комбінованого фільтра.

5. Метод корекції. Було застосовано внесення змін у схему, зокрема, встановлення компенсуючого трансформатора з індуктивностями розсіювання у гілку паралельної компенсації, з метою усунення резонансного сплеску та забезпечення стійкості.

Проблема, що вирішується, стосується розробки та забезпечення ефективної та стійкої роботи комбінованого активного фільтра, утвореного каскадним включенням активного фільтра з паралельною компенсацією (АФПР) та активного фільтра з послідовною компенсацією.

Зокрема, вирішуються такі ключові проблеми, пов'язані з каскадуванням АФ:

1. Проблема взаємодії та синтезу фільтрів. Необхідно проаналізувати особливості взаємозв'язку між АФПР (попередньо включеним) та послідовним АФ (наступним), оскільки вплив останнього фільтра на попередній визначається ланкою $Z1(p)/Z4(p)$. Хоча другий фільтр може проектуватися незалежно, елементи наступного фільтра входять у передаточну функцію попереднього. Це ускладнює синтез першого фільтра.

2. Проблема стійкості та автоколивань. Виявлено, що при певному (високому) контурному коефіцієнті підсилення другого АФ (фільтра з послідовною

схемою компенсації) вся схема збуджується, і виникають низькочастотні автоколивання на частоті 14–17 Гц. Модельні дослідження показали, що на частоті 16.7 Гц має місце резонансний сплеск до 21.2 дБ в амплітудно-частотній характеристиці (АЧХ) комбінованого фільтра.

3. Необхідність підвищення ефективності фільтрації. Необхідно досягти суттєвого підвищення ефективності фільтруючого пристрою порівняно з використанням окремих фільтрів.

4. Умови конструкції АФПР. Для усунення резонансного сплеску та забезпечення стійкої роботи виникла потреба визначити, чи повинен перший фільтр (АФПР) будуватися з використанням компенсуючого трансформатора. Також важливо встановити умову вибору величини конденсатора C у схемі, щоб контурний коефіцієнт підсилення по гілці, що охоплює обидва активні фільтри, був менше одиниці.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Принципова схема фільтра, що містить АФ з паралельною і послідовною компенсацією наведена на рис. 1.

Для ефективної роботи активного фільтра з паралельною компенсацією (АФПР) необхідно, щоб джерело пульсацій мало великий вихідний опір. Тому після джерела з пульсуючою напругою E_n встановлено дросель L . З іншої сторони, ефективна робота активного фільтра з послідовною компенсацією можлива лише у випадку, коли опір джерела пульсацій малий, що обумовлює установку конденсатора $C3$.

Комплексні величини струмів, що протікають через навантаження і опір $Z = 1/j\omega C$ визначаються з виразів:

$$I_{Z2} = \frac{E_n Z_{k1} Z_H - E_{k1} Z_1 Z_H + E_{k2} Z_{k1} Z_1}{Z_{\Sigma}^3}; \quad (1)$$

$$I_H = \frac{E_n Z_{k1} Z_2 - E_{k1} Z_1 Z_2 - E_{k2} (Z_{k1} Z_2 + Z_1 Z_{k1} + Z_1 Z_2)}{Z_{\Sigma}^3}, \quad (2)$$

де $Z_{\Sigma}^3 = Z_4 (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{k1} + Z_{k1} Z_2) + Z_1 Z_{k1} Z_2$; $Z_4 = Z_{k2} + Z_H$.

Структурна схема каскадного АФ, що відповідає (1) і (2), наведена на рис. 3, а, де:

$$W_1(p) = \mathcal{L} \left[\frac{Z_1 Z + Z_{k1} (Z + Z_1)}{Z_{k1} Z} \right];$$

$$W_2(p) = \mathcal{L} \left[\frac{Z_{k1} Z}{Z_H (Z_1 Z + Z_{k1} Z + Z_{k1} Z_1) + Z_1 Z_{k1} Z} \right];$$

$$W_3(p) = \mathcal{L} \left[\frac{Z_1}{Z_{k1}} \right]; \quad W_4(p) = \mathcal{L} \left[\frac{Z_4}{Z_H} \right];$$

$K_{A1}(p)$, $K_{A2}(p)$ – передаточні функції підсилювачів; $\mathcal{L}$ – оператор перетворення Лапласа.

Структурна схема, що наведена на рис. 2, а. Після незначних перетворень представлена у вигляді, що

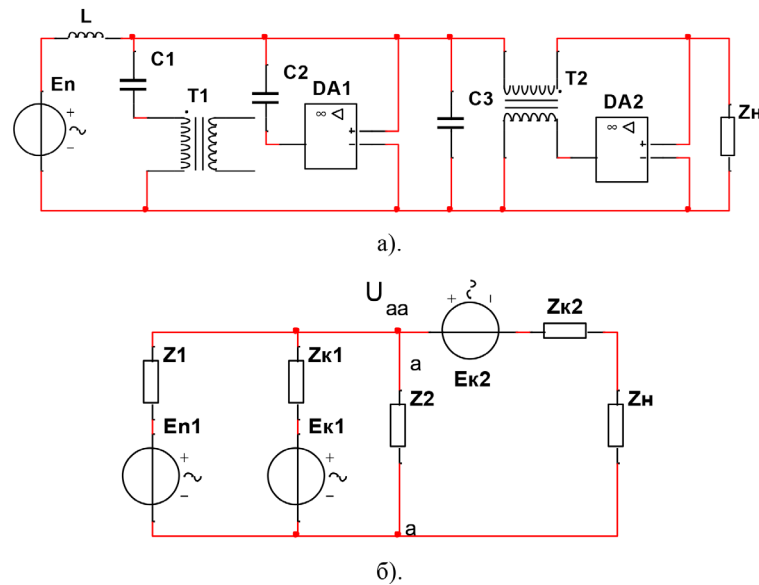


Рис. 1. Принципова схема фільтра

зображено на рис. 2, б, з якої витікають основні властивості комбінованого фільтра.

З отриманої структурної схеми витікає, що другий фільтр – фільтр з послідовною компенсацією, містить елементи, що належать лише йому, з чого можна зробити висновок, що на його роботу і стійкість, як замкненої структури, попередньо включений активний фільтр з паралельною компенсацією не впливає. Це означає, що при синтезі такого комбінованого АФ останній – фільтр з послідовною компенсацією може проектуватись без врахування попередніх ланок.

В той же час, в передаточну функцію попереднього – активного фільтра з паралельною компенсацією, входять як елементи власне цього фільтра, так і наступного. Вплив останнього фільтра на

попередній визначається ланкою $Z_1(p)/Z_4(p)$, яка встановлює взаємозв'язок між фільтрами, причому, направлена вона так, що з підвищенням глибини компенсації фільтра з послідовною компенсацією повинна зменшуватись ефективність першого фільтра. Фізично це пояснюється тим, що збільшення глибини компенсації послідовного фільтра еквівалентно збільшенню його вхідний опір. Це, відповідно, якщо $Z_2 \neq 0$, приведе до деякого підвищення напруги U_{aa} . При деяких умовах, завдяки наявності такого зв'язку можуть виникнути автоколивання, що охоплюють обидва фільтри.

Приводячи в структурі фільтра всі гілки до виходу і поєднавши трансформатори з ланками підсилювачів, знайдемо вираз для коефіцієнта фільтрації фільтруючого пристрою:

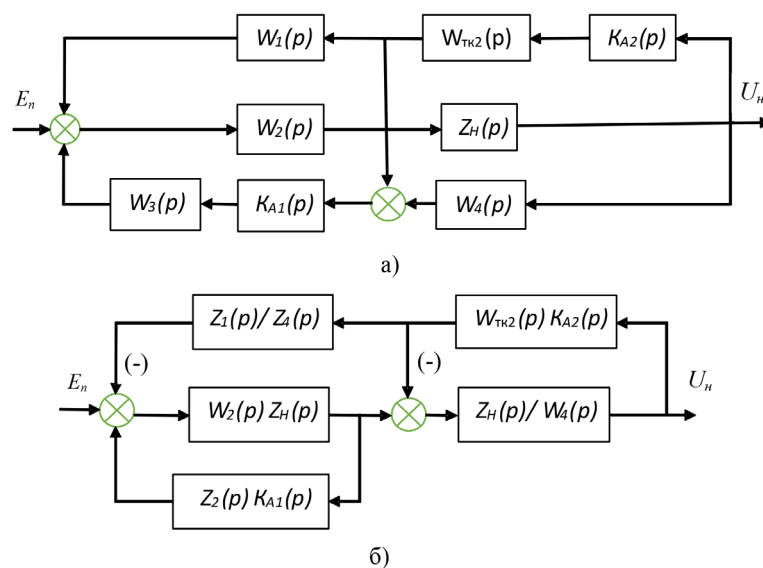


Рис. 2. Структурна схема фільтра

$$q_n = \text{Mod} \left[\frac{Z_{\Sigma}^3(p)}{Z_{\kappa 1}(p)Z_H(p)Z(p)} + \frac{Z_1(p)}{Z_4(p)}K_{A2}(p) + \right. \\ \left. + \frac{Z_1(p)}{Z_{\kappa 1}(p)}K_{A1}(p)K_{A2}(p) + \frac{Z_4(p)Z_1(p)}{Z_H(p)Z_{\kappa 1}(p)}K_{A1}(p) \right]_{p=j\omega} \quad (3)$$

З виразу (3) витікає, що загальний коефіцієнт фільтрації містить пасивну складову, яка визначається пасивними елементами схеми і три активні складові, що містять як коефіцієнти фільтрації кожного з активних фільтрів, так і їх добуток. Звідси витікає, що при каскадуванні АФ слід очікувати суттєвого підвищення ефективності фільтруючого пристрою.

Розглянемо передаточні функції головних гілок обох активних фільтрів. Для активного фільтра з послідовною компенсацією відношення

$$\frac{Z_H}{Z_4} = \frac{Z_H}{Z_H + Z_{\kappa 2}} \approx 1,$$

оскільки трансформатор компенсації виготовляється з невеликою кількістю витків вторинної обмотки і, відповідно, має малий, порівняно з опором навантаження опір. Звідси витікає, що задачі стійкості активного фільтра з послідовною компенсацією визначаються частотними властивостями підсилювача з трансформатором, що має передаточну функцію $W_{\text{тк}2}(p)$.

Передаточна функція ланки $W_2(p)Z_H(p)$ може бути представлена у вигляді:

$$W_2(p)Z_H(p) = \frac{W_{11}(p)W_{12}(p)}{W_{12}(p)[W_{13}(p) + W_{11}(p)W_{14}(p)] + W_{11}(p)W_{15}(p)W_{16}(p)}, \quad (4)$$

$$\text{де: } W_{11}(p) = R_{A1}C_{\kappa}p + 1, \quad W_{14}(p) = LCp^2, \quad W_{15}(p) = \frac{L}{R_H}p, \\ W_{16}(p) = \frac{L_{22}}{R_{A2}^*}p + 1,$$

$$W_{12}(p) = \frac{L_{22}L_H}{R_{A2}^*R_H}p^2 + \left(\frac{L_{22}}{R_{A2}^*} + \frac{L_H}{R_H} + \frac{L_{22}}{R_H} \right)p + 1,$$

$$W_{13}(p) = W_{14}(p)W_{15}(p).$$

Вираз (4) без значних похибок в усьому частотному діапазоні роботи фільтра може бути заміщений формулою:

$$W_2(p)Z_H(p) = \frac{R_{A1}C_{\kappa}p + 1}{(LC_{\kappa}p^2 + R_{A1}C_{\kappa}p + 1) + LCp^2(R_{A1}C_{\kappa}p + 1)}, \quad (5)$$

яка при $C = 0$ прийме вигляд:

$$W_2Z_H(p) = \frac{R_{A1}C_{\kappa}p + 1}{LC_{\kappa}p^2 + R_{A1}C_{\kappa}p + 1}.$$

Використання трансформатора в активному фільтрі з паралельною компенсацією приведе до

підвищення порядку полінома чисельника на одиницю. Цей факт міг би при деяких відношеннях між параметрами фільтра привести до умови, при якій $W_2Z_H(p) = 1$ і суттєво спростити задачу синтезу паралельного фільтра при $C = 0$. Але, з іншої сторони, виконання цієї умови може привести до виникнення автоколивань, що охоплюють обидва АФ. Тому конденсатор C в схемі обов'язковий і його величина повинна вибиратись з умови, щоб контурний коефіцієнт підсилення по гілці, що охоплює обидва активні фільтри був менше одиниці.

Аналіз формули (5) показує, що без трансформаторний спосіб компенсації гармонік першого фільтра дозволяє простіше розв'язувати задачі стійкості комбінованого фільтра, оскільки суттєво зменшується кількість параметрів, які необхідно враховувати.

Для проведення модельних досліджень в Мультисім складена схема, вигляд якої наведено на рис. 3, а. Аналіз її роботи показав, що при установці контурного коефіцієнта підсилення другого АФ (фільтра з послідовною схемою компенсації) вся схема збуджується і pojawiaються низькочастотні коливання на частоті, яка за допомогою курсорів осцилографа визначається в межах 14–17 Гц. (рис. 3, б, осцилограма червоного кольору).

Для встановлення причини автоколивань була знята амплітудно – частотна характеристика (АЧХ) комбінованого фільтра, яка наведена на рис. 3, б. З вигляду АЧХ витікає, що на частоті 16.7 Гц має місце резонансний сплеск до 21.2 дБ., тобто комбінований фільтр має на цій частоті контурний коефіцієнт підсилення, який і приводить до появи автоколивань. Природою такого сплеску є частотна характеристика пасивного фільтра, і усунути його можливо або зменшенням добротності фільтра, або створити послідовне резонансне коло на близькій часті. Така задача розв'язується шляхом включення індуктивності послідовно з конденсатором $C1$. Але в такому випадку в гілці паралельної компенсації краще встановити трансформатор з вибраною індуктивністю розсіювання обмоток. Встановивши трансформатор з індуктивностями розсіювання 100 мкГн була отримана АЧХ комбінованого фільтра, що наведена на рис. 4, а. В такому випадку автоколивання в схемі не виникають в діапазоні зміни коефіцієнта підсилення фільтра з послідовною компенсацією до 30 одиниць. На рис. 4, б наведені осцилограми напруг. На вході пасивного фільтра (осцилограма синього кольору з постійною складовою) амплітуда пульсацій складає 84 В. Пасивний фільтр зменшує амплітуду пульсацій до 45 В. Осцилограма червоного кольору відповідає напрузі на виході активного фільтра. Її амплітуда має величину біля 3 В. Другий АФ працює практично не залежно від першого і може забезпечувати коефіцієнт подавлення пульсацій в 10–20 раз.

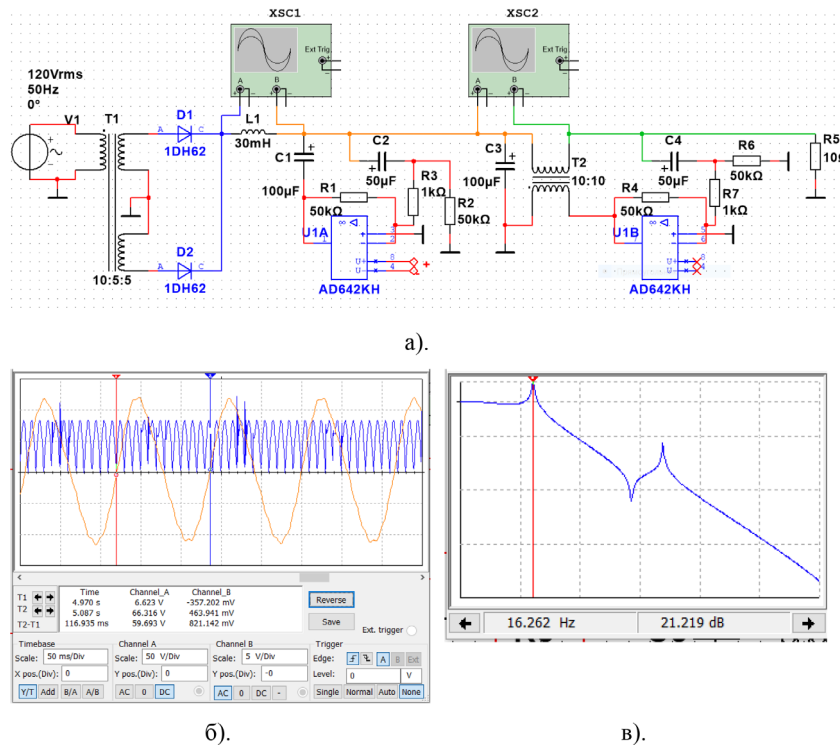


Рис. 3. Моделювання роботи фільтра

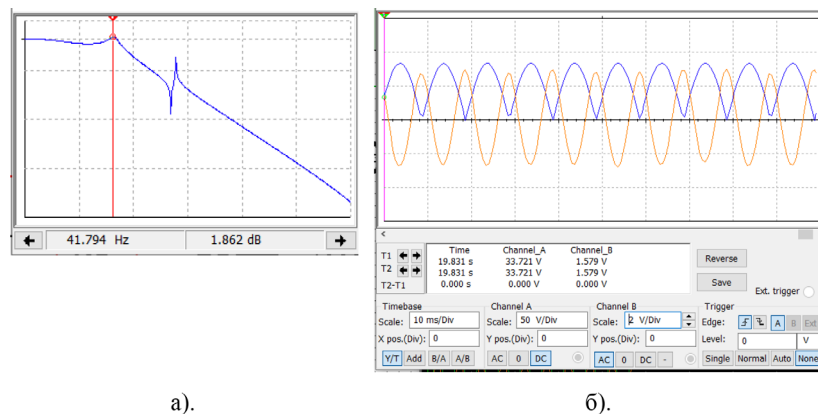


Рис. 4. Моделювання роботи фільтра

Звідси витікає, що при використанні такої комбінації активних фільтрів перший фільтр з паралельною компенсацією повинен будуватись з використанням компенсуючого трансформатора.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу структурних схем та моделювання каскадного включення активних фільтрів (АФ) з паралельною та послідовною компенсацією встановлено наступне:

Загальний коефіцієнт фільтрації фільтруючого пристрою містить пасивну складову та три активні складові (що включають як коефіцієнти фільтрації кожного з активних фільтрів, так і їх добуток), що дозволяє очікувати суттєвого підвищення

ефективності фільтруючого пристрою при каскадуванні АФ.

Елементи наступного фільтра (послідовного) входять у передаточну функцію попереднього фільтра (зпаралельною компенсацією). Вплив останнього фільтра на попередній визначається ланкою $Z1(p)/Z4(p)$. Встановлено, що зі збільшенням глибини компенсації послідовного фільтра повинна зменшуватись ефективність першого фільтра.

При моделюванні було виявлено, що при високому контурному коефіцієнті підсилення другого АФ виникають низькочастотні автоколивання в діапазоні 14–17 Гц. Це спричинено резонансним сплеском до 21.2 дБ на частоті 16.7 Гц, який має природу частотної характеристики пасивного фільтра.

Для забезпечення стійкої роботи комбінації активних фільтрів та уникнення автоколивань перший фільтр (з паралельною компенсацією) повинен будуватись з використанням компенсуючого трансформатора, наприклад, з індуктивностями розсіювання 100 мкГн, що дозволило усунути автоколивання. Крім того, конденсатор С в схемі обов'язковий, і його величина повинна вибиратись з умови, щоб контурний коефіцієнт підсилення по гілці, що охоплює обидва АФ, був менше одиниці.

Пасивний фільтр зменшує амплітуду пульсацій з 84 В до 45 В, а амплітуда напруги на виході активного фільтра становить близько 3 В. Другий АФ працює практично не залежно від першого і здатний забезпечувати коефіцієнт подавлення пульсацій у 10 – 20 раз. Хоча безтрансформаторний спосіб компенсації першого фільтра дозволяє простіше розв'язувати задачі стійкості комбінованого фільтра, оскільки суттєво зменшується кількість параметрів, які необхідно враховувати.

REFERENCES

- [1] Ryabenkyi, V. M., et al. (2025). Osoblyvosti proyektuvannya aktyvnykh enerhetychnykh fil'triv [Design features of active energy filters]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, (6), 3–8. Retrieved from: <https://doi.org/10.15407/techned2025.06.003>. [in Ukrainian].
- [2] Ryabenkyi, V. M., et al. (2025). Kaskadne naroshuvannya aktyvnykh enerhetychnykh fil'triv iz poslidovnoyu kompensatsiyeyu [Cascaded build-up of active energy filters with sequential compensation]. *Collection of Scientific Publications NUS*, (2), 500), 201–207. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).28](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).28). [in Ukrainian].
- [3] Ryabenkyi, V. M., et al. (2025). Porivnyannya aktyvnykh enerhetychnykh fil'triv z poslidovnoyu i paralel'noyu shemkamy kompensatsii harmonyk. [Comparison of active power filters with series and parallel harmonic compensation schemes]. *Collection of Scientific Publications NUS*, 2(2), 500, 193–200. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).27](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).27). [in Ukrainian].
- [4] Shcherbak, Y., Semenenko, Y., Semenenko, O., Karpenko, N., Suprun, O., Plakhtii, O., & Nerubatskyi, V. (2021). Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(2 (110)), 71–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229827>
- [5] Li, L., et al. (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>
- [6] Xiao, L., & Zhang, L. (1998). Simulation study of an active DC filter using frequency-domain control system. In *Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives* (IEE Conf. Publ. No. 456) (pp. 483–488). London, UK: IEE. <https://doi.org/10.1049/cp:19980574>
- [7] Li, H., Zhang, K., & Zhao, H. (2011). Active DC-link power filter for single phase PWM rectifiers. In *International Conference on Power Electronics – ECCE Asia* (pp. 2920–2926). Jeju, Korea: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPE.2011.5944792>
- [8] Engelhart, B. R., & Bazzi, A. M. (2020). Design and control of a series DC active filter (SDAF) for MVDC marine applications. In *IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)* (pp. 948–953). Chicago, IL, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITEC48692.2020.9161757>
- [9] Wang, Y., et al. (2018). A simplified minimum DC-link voltage control strategy for shunt active power filters. *Energies*, 11(9), 2407. <https://doi.org/10.3390/en11092407>
- [10] 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>
- [11] 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 L. M. Camarinha-Matos, N. S. Barrento, & R. Mendonça (Eds.), *Technological Innovation for Collective Awareness Systems. DoCEIS 2014. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 423. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54734-8_47
- [12] Figueroa, D., et al. (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>
- [13] 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>
- [14] Firek, C. (n.d.). Active filters control EMI, save PCB space and enhance airflow. *Vicor Corporation*. Retrieved from: https://www.vicorpower.com/documents/industry_articles/ta-Active-Filters.pdf
- [15] Analog Devices TI. (n.d.). Using an active EMI filter in power converters to reduce EMI filter size and cost. TI.com. Retrieved from: <https://www.ti.com/lit/ml/slyp833/slyp833.pdf>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Рябенський, В. М., Губаревич, В. М., Маруня, Ю. В., Худякова, І. М., Трибулькевич, І. Л. (2025). Особливості проектування активних енергетичних фільтрів. *Техн. електродинаміка*, (6), 3–8. <https://doi.org/10.15407/techned2025.06.003>
- [2] Рябенський, В. М., Трибулькевич, І. 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)
- [3] Рябенський, В. М., Трибулькевич, І. Л., Худякова, І. М., Кудрявцев, О. С. (2025). 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)

- [4] Shcherbak, Y., Semenenko, Y., Semenenko, O., Karpenko, N., Suprun, O., Plakhtii, O., & Nerubatskyi, V. (2021). Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(2 (110)), 71–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229827>
- [5] Li, L., et al. (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>
- [6] Xiao, L., & Zhang, L. (1998). Simulation study of an active DC filter using frequency-domain control system. *1998 seventh international conference on power electronics and variable speed drives (IEE conf. publ. no. 456)*, 483–488. <https://doi.org/10.1049/cp:19980574>
- [7] Li, H., Zhang, K., & Zhao, H. (2011). Active DC-link power filter for single phase PWM rectifiers. *8th international conference on power electronics – ECCE asia*, 2920–2926. <https://doi.org/10.1109/ICPE.2011.5944792>
- [8] Engelhart, B. R., & Bazzi, A. M. (2020). Design and control of a series DC active filter (SDAF) for MVDC marine applications. *2020 IEEE transportation electrification conference & expo (ITEC)*, 948–953. <https://doi.org/10.1109/ITEC48692.2020.9161757>
- [9] Wang, Y., et al. (2018). A simplified minimum DC-link voltage control strategy for shunt active power filters. *Energies*, 11(9), 2407. <https://doi.org/10.3390/en11092407>
- [10] 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>
- [11] 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 L. M. Camarinha-Matos, N. S. Barrento, & R. Mendonça (Eds.), *Technological innovation for collective awareness systems: DoCEIS 2014* (Vol. 423). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54734-8_47
- [12] Figueroa, D., et al. (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>
- [13] 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>
- [14] Firek, C. (n.d.). *Active filters control EMI, save PCB space and enhance airflow*. Vicor corporation. Retrieved December 5, 2025, Retrieved from: https://www.vicorpower.com/documents/industry_articles/ta-Active-Filters.pdf
- [15] Texas Instruments. (n.d.). *Using an active EMI filter in power converters to reduce EMI filter size and cost*. Retrieved December 5, 2025, Retrieved from: <https://www.ti.com/lit/ml/slyp833/slyp833.pdf>

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

Дата надходження статті до редакції: 12.09.2025

Дата затвердження статті до друку: 01.10.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0