

## STUDY OF THE POSSIBILITY OF INCREASING QUALITY INDICATORS OF THE ELECTRICAL ENERGY IN POWER SUPPLY SYSTEMS WITH NON-LINEAR LOAD

S. Baliuta, L. Kopylova, D. Sinyukov, M. Zhukov, M. Kondrashevsky,  
P. Zinkevych  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Power supply system  
Power quality indicators  
Higher harmonics  
Filter-compensating  
devices*

---

**Article history:**

Received 08.05.2025  
Received in revised form  
19.05.2025  
Accepted 11.06.2025

---

**Corresponding author:**

S. Baliuta  
**E-mail:**  
epp11@ukr.net

**Citation:** Балюта С. М.,  
Копилова Л. О., Сіню-  
ков Д. В., Жуков М. Ю.,  
Кондрашевський М. С.,  
Зінкевич П. О. (2025).  
Дослідження можливості  
підвищення показників  
якості електричної енергії  
в системах електрозабез-  
печення з нелінійним на-  
вантаженням. *Наукові  
праці НУХТ*, 31(3), 157—  
178.  
DOI: 10.24263/2225-2924-  
2025-31-3-12

---

**ABSTRACT**

In recent years, there has been a significant increase in the number of photovoltaic stations in low-voltage distribution networks, due to the use of constant tariffs for electricity from renewable energy sources. In addition, non-linear low-voltage loads such as variable frequency AC electric drive, electric heat pumps and charging stations for electric vehicles are now widely used. The presence of a source of distributed generation and non-linear loads causes the appearance of higher harmonic components of current and voltage in the network, which leads to a deterioration in the quality of electrical energy. Quality indicators of the electrical energy are given in GOST EN 50160:2014 "Characteristics of power supply voltage in electrical networks of general purpose." According to this standard, the total harmonic distortion factor of the power supply voltage, taking into account all harmonics up to the 40th inclusive, for low-voltage networks should be less than or equal to 8%. In order to ensure normal operating conditions of electrical equipment of electrical networks and electrical energy consumers, distribution system operators should develop measures to increase the quality indicators of the electrical energy effective and economic measures to reduce the level of higher harmonic components of current and voltage are the corresponding circuit solutions, as well as the use of reactors, passive, active and hybrid filters.

The possibilities of increasing the transmission capacity of the electrical network and reducing the loss of electrical energy by reducing the level of higher harmonic components current and voltage by controlling hybrid filters were identified. By means of simulation, calculation studies of various configurations of hybrid filter-compensating devices were carried out, which confirmed the effectiveness of the proposed structures. Control algorithms of hybrid filter-compensating devices providing maintenance of normative values of high-voltage current and voltage under various modes of nonlinear loads were proposed.

---

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2025-31-3-12

---

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

С. М. Балюта, Л. О. Копилова, Д. В. Сінюков, М. Ю. Жуков,  
М. С. Кондрашевський, П. О. Зінкевич

*Національний університет харчових технологій*

*В останні роки спостерігається значне зростання кількості фотоелектричних станцій у низьковольтних розподільчих мережах, що обумовлено використанням постійних тарифів на електричну енергію від ВДЕ. Крім того, нині широко використовуються такі нелінійні низьковольтні навантаження, як частотно-регульований електропривод змінного струму, електричні теплові насоси та зарядні станції для електромобілів. Наявність джерела розподіленої генерації та нелінійних навантажень обумовлює появу в мережі вищих гармонійних складових (ВГС) струму та напруги, що призводить до погіршення показників якості електричної енергії. Показники якості електричної енергії (ПЯЕЕ) наведені у ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». Згідно з цим стандартом сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги електропостачання, враховуючи всі гармоніки (до 40-ї включно) для мереж низької напруги має бути меншим чи рівним 8%. Для забезпечення нормальних умов роботи електричного обладнання електричних мереж і споживачів ЕЕ оператори системи розподілу (ОСР) повинні розробляти заходи підвищення ПЯЕЕ. Ефективними й економічними заходами зниження рівня вищих гармонійних складових (ВГС) струму та напруги є відповідні схемні рішення, а також використання реакторів, пасивних, активних і гібридних фільтрів.*

*У статті визначено можливість збільшення передавальної спроможності електричної мережі та зменшення втрат електричної енергії шляхом зниження рівня ВГС струму й напруги за допомогою керування гібридними фільтрами. Шляхом імітаційного моделювання проведені розрахункові дослідження різних конфігурацій гібридних фільтро-компенсуючих пристроїв, що підтвердили ефективність запропонованих структур. Запропоновано алгоритми керування гібридними фільтро-компенсуючими пристроями, що забезпечують підтримання нормативних значень ВГС струму і напруги при різних режимах нелінійних навантажень.*

**Ключові слова:** *система електрозабезпечення, показники якості електричної енергії, вищі гармоніки, фільтро-компенсуючі пристрої.*

**Постановка проблеми.** В системах електрозабезпечення споживачів з розподіленою генерацією (фотоелектростанції, вітроелектростанції, когенераційні установки) та нелінійним навантаженням (НН) унаслідок використання випрямлячів та інверторів на основі електронних комутаторів суттєво погіршуються показники

якості електричної енергії (виникають ВГС струму та напруги), що призводить до виникнення додаткових втрат енергії в елементах систем електропостачання, скорочення терміну експлуатації ізоляції електрообладнання, помилкових спрацьовувань систем релейного захисту. Чинний стандарт (ДСТУ EN 50160:2014, 2014) передбачає розробку енергопостачальною компанією заходів щодо нормалізації ПЯЕЕ. Найбільш широко використовуваними засобами підвищення ПЯЕ є активні та пасивні фільтрокомпенсуючі пристроїв (ФКП). Пасивні ФКП є найбільш економічними, однак за умови варіації спектра ВГС знижується їх ефективність рівня несинусоїдності. Активні ФКП також мають недоліки, зокрема при паралельній роботі з пристроями компенсації реактивної потужності можливо виникнення резонансних явищ. Крім того, в умовах систем розподіленої генерації та комбінованого електропостачання спроможність активних ФКП здійснювати компенсацію ВГС є обмеженою.

Гібридні ФКП (ГФП) дають змогу отримати переваги активних і пасивних ФКП, мають більш широкий набір функцій підвищення ПЯЕ шляхом зниження рівня ВГС струму й напруги, регулювання відхилень напруги, проведення корекції коефіцієнта потужності.

Зважаючи на ту обставину, що поширюється тенденція використання частотно-регульованого електроприводу та впровадження розподіленої генерації в електричній мережі, системи електрозабезпечення промислових та цивільних об'єктів, необхідним є використання і дослідження багатофункціональних технічних засобів підвищення ПЯЕ в умовах варіації параметрів мережі живлення та підключеного навантаження, до яких належать ГФП.

Оскільки найбільш ефективним і економічним методом забезпечення нормативних ПЯЕЕ є використання пасивних, активних та гібридних фільтрів, необхідно розробити методи адаптивного автоматичного керування гібридними фільтрами з використанням значень напруги у вузлових точках електричної мережі.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Широке використання в електричних мережах та електротехнічних комплексах ВДЕ та частотно-регульованого електроприводу (ЧРЕП), що у своєму складі містять випрямлячі, інвертори напруги і струму призводить до погіршення ПЯЕЕ (підвищення рівня ВГС струму і напруги). Зважаючи на це, виникає необхідність розробки методів і використання технічних заходів для зниження рівня ВГС до нормативних значень, наведених у ДСТУ EN 50160:2014, 2014. Найбільш відомими заходами є використання дроселів, ПФ та АФ послідовного та паралельного включення, а також гібридних фільтрових пристроїв (ГПФ).

Нині на промислових і цивільних об'єктах широко використовуються навантаження з нелінійною вольт-амперною характеристикою (нелінійні навантаження): джерела розподіленої генерації (ФЕС та ВЕС), системи з накопичувачами електричної енергії, електротехнічні комплекси систем частотно-регульованого електроприводу, електротехнологічні установки. Під дією цих навантажень у системах електрозабезпечення виникають нелінійні спотворення (несинусоїдальні режими) струмів і напруг, що обумовлюють появу вищих гармонійних складових (ВГС) струму та напруги (Жежеленко, Шидловський, Півняк, & Саєнко, 2009).

У сучасних джерелах розподіленої генерації (ФЕС) та частотно-регульованих електроприводах регулювання рівня вихідної напруги найчастіше виконується з

використанням статичних перетворювачів, які можуть бути реалізовані на базі активних випрямлячів та автономних інверторів напруги (Жежеленко, Шидловський, Півняк, & Саєнко, 2009).

Керування напругою проводиться за допомогою регулятора напруги постійного струму (DC/DC) і методу широтно-імпульсної модуляції з використанням алгоритму керування силовими ключами автономного інвертора напруги, який забезпечує зміну тривалості напівхвилі відкриття транзисторів. При використанні цієї технологія, внаслідок включення регулятора змінного струму, як правило, погіршується гармонійний склад напруги (Costabeber, Tenti, Caldognetto, & Verri Librado, 2013).

У статті (Attaianesi, & Tomasso, 2002) пропонується оптимізована схема керування ШІМ-випрямлячами, що базується на алгоритмі прогнозування, який гарантує задане значення вихідної напруги ланки постійного струму та одночасно одиничну поведінку коефіцієнта потужності в мережі. Частина модуляції складається з цифрового просторово-векторного модулятора, який усуває падіння напруги через ефект мертвого часу, а також уникає явища фіксації струму нулем.

У праці (Бурбело, 2023) розглянуті методи фільтрації високого гармонійного струму НН на основі силових електронних пристроїв.

Ефективність компенсації ВГС напруги і струму за допомогою АФ та ПФ в умовах електротехнічних комплексів розглянуто у праці (Жаркін, Новський, & Малахатка, 2015). Розглянуто основні положення розробки ГФП на основі «розподільчих» D-СТАТКОМ та регульованих фільтросиметруючих пристроїв (РФСП). ГФП призначені для компенсації навантажувальних струмів у нульовому проводі трифазної мережі, регулювання (стабілізації) напруги навантаження та фільтрації струмів вищих гармонік у мережі.

У статті (Жаркін, Новський, & Малахатка, 2018) представлені особливості використання ГФП, що побудований на основі регульованого фільтро-симетруючого пристрою (РФСП), «розподільчого» статичного синхронного компенсатора реактивної потужності (D-СТАТКОМ) або багатофункціонального компенсатора реактивної потужності (БКРП), для комплексного покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання. ГФП забезпечують компенсацію навантажувальних струмів у нульовому проводі трифазної мережі низької напруги, симетричне регулювання (стабілізацію) рівня напруги навантаження та фільтрацію струмів вищих гармонік у мережі

У праці (Жаркін, Палачов, Пазєєв, & Малахатка, 2024) розглянуто моделювання режимів роботи інверторного обладнання, що використовується в мікромережах (Microgrid) низької напруги. Наведено опис розробленої імітаційної моделі Microgrid, однією з складових якої є двонапрявлений напівпровідниковий перетворювач з системою керування на основі застосування abc-dq0 перетворення. Виконано визначення впливу на показники якості електропостачання наявності в Microgrid інверторного обладнання, що працює в режимі генерації струму та регулювання реактивної потужності з урахуванням перехідних процесів, які виникають під час приєднання потужних навантажень.

Методологія моделювання АФ шляхом представлення схем силових перетворювачів у вигляді підсхеми, основні аспекти застосування ГФП, які виконано на

основі регульованого фільтросиметруючого пристрою (РФСР) та «розподільного» статичного синхронного компенсатора реактивної потужності (D-СТАТКОМ) та результати досліджень впливу ВГС напруги і струму на втрати ЕЕ в елементах систем електрозабезпечення представлені у (Жаркін, Малахатка, & Новський, 2018).

Топологічні схеми ГФП та методи керування АФ представлені в статті (Akagi, 2005), де розглядаються загальні чисті активні фільтри для кондиціонування живлення та специфічні гібридні активні фільтри для гармонічної фільтрації трифазних діодних випрямлячів. У статтях (Akagi, Watanabe, & Aredes, 2017; Costabeber, Tenti, Caldognetto, & Verri Liberado, 2013) розглянуто підхід до управління в Smart Grid, який базується на консервативних командах потужності, що дає змогу вибірково усунути основні причини, які впливають на ПЯЕЕ, тобто асиметрію напруги, вищі гармоніки та потоки реактивної потужності. У (Litran, Revuelta, Prieto, & Valles, 2014) запропоновано стратегію управління інтерфейсом, який пов'язаний між мікромережею та основною мережею. Інтерфейс побудований на активній конфігурації АФ послідовного підключення в мережі живлення. Запропонована стратегія управління дає змогу знизити рівень ВГС струму та зменшити дисбаланси напруги. У праці (Salmeron, & Litran, 2010) запропоновано алгоритм керування трифазним гібридним силовим фільтром. Він складається з послідовного активного фільтра і пасивного фільтра, з'єднаного паралельно з навантаженням. Стратегія управління базується на векторній теорії подвійного формулювання миттєвої реактивної потужності, тому форма сигналу напруги, що вводиться активним фільтром, здатна компенсувати реактивну потужність і гармоніки струму навантаження та збалансувати асиметричні навантаження. Запропонований алгоритм також покращує поведінку пасивного фільтра.

Однак у проаналізованих вище працях не виконані дослідження впливу зміни параметрів елементів електротехнічних комплексів і вузлів навантаження на ефективність використання ГФП для підвищення ПЯЕЕ.

**Мета дослідження:** визначення можливості підвищення ПЯЕЕ в електротехнічних комплексах промислових і цивільних об'єктів із широким використанням нелінійних навантажень (ЧРЕП) шляхом обґрунтованого використання ГФП на основі паралельного або послідовного активного фільтра.

**Матеріали і методи.** Для покращення гармонійного складу споживаного струму застосовувалися пасивні LC-фільтри (ПФ), налаштовані на гармоніки певного порядку. Активні фільтри (АФ), що функціонують на основі ідеї вприску в мережу додаткових гармонік, які перебувають у протифазі з наявними гармоніками, використовуються для компенсації реактивної потужності та зниження рівня ВГС струму і напруги.

Для НН великої потужності використовувалися гібридні фільтри, що складаються з послідовно і паралельно включених АФ та ПФ.

Методи імітаційного моделювання в середовищі Matlab/Simulink використовуються для проведення розрахункових досліджень у системах електрозабезпечення з нелінійним навантаженням (випрямлячі, частотно-регульований електропривод з векторним керуванням).

Метод фазових перетворень, теорія перетворювальної техніки, математичного моделювання й аналізу електромагнітних процесів використовується для розробки методу керування та моделювання процесів в електротехнічних комплексах з активними й пасивними фільтрами.

**Викладення основних результатів дослідження.** На сьогодні актуальним для компенсації ВГС струму і напруги (підвищення ПЯЕЕ) є використання гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв (ГФП), які складаються з активних та пасивних фільтрів. ГФП поєднують такі позитивні властивості пасивних та активних фільтрів:

1. За рахунок використання пасивних фільтрів (ПФ) зменшення потужності силових частин активних фільтрів (АФ), що є найдорожчим елементом ГФП, і, відповідно, зниження вартості ГФП та його масогабаритних характеристик.
2. Підвищення рівня компенсації ВГС порівняно з використанням лише ПФ в умовах зміни режимів роботи НН та його параметрів.
3. Зниження ймовірності появи резонансних явищ у ГФП порівняно з одиночними ПФ шляхом використання АФ.
4. Можливість адаптації активної частини ГФП для забезпечення ефективної компенсації ВГС при зміні характеристик НН.
5. Можливість використання ГФП в системах електрозабезпечення (СЕЗ) разом з уже встановленими пасивними фільтрами, при цьому активний фільтр у складі ГФП забезпечує корегування характеристик пасивних фільтрів.

Існують такі способи компенсації ВГС у СЕЗ за допомогою ГФП з використанням різних типів активної частини:

1. Компенсація ВГС струму за допомогою керованого джерела струму. В цьому випадку не має впливу як на характер споживання вищих гармонік НН, так і на наявність вищих гармонік напруги з боку передвключеної мережі (паралельна компенсація).
2. Компенсація ВГС напруги за допомогою керованого джерела напруги шляхом встановлення послідовного активного фільтра. В цьому випадку також не має впливу на характер споживання вищих гармонік НН.

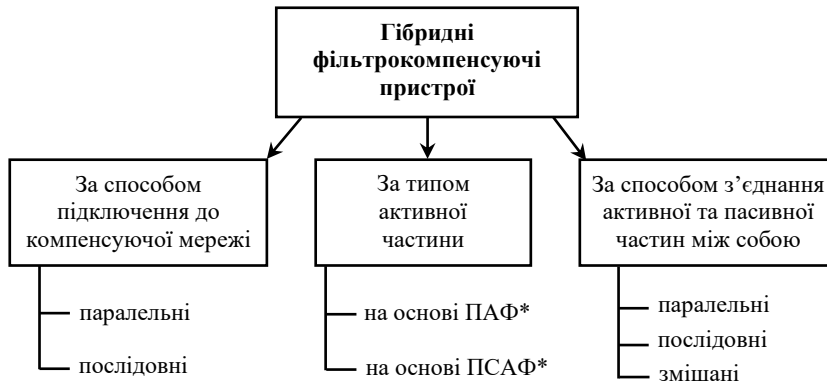
**Класифікація гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв та основні структурні схеми.** Класифікація ГФП на основі структурної схеми здійснюється за такими критеріями (рис. 1):

- спосіб підключення ФУ до компенсованої мережі;
- характер з'єднання активної та пасивної частини між собою;
- тип активної частини ГФП.

З множини модифікацій ГФП виділимо та проведемо аналіз структур, які можуть найбільш ефективно використані в умовах промислових і цивільних об'єктів з урахуванням особливостей їх електричних мереж та підключеного навантаження.

**Гібридна структура ГФП, що складається з послідовного активного та паралельного пасивного фільтрів.** До складу ГФП входять: блок резонансних пасивних фільтрів, приєднаних паралельно до навантаження, що створює ВГС та послідовний активний фільтр з використанням вольто-додаткового трансформатора ( $T_p$ ), первинна обмотка якого послідовно з'єднана з пасивним фільтром, а до вторинної обмотки трансформатора підключений інвертор.

У цій конфігурації ГФП активний фільтр впливає лише на гармонійні струми і підвищує ефективність компенсації ВГС пасивними фільтрами. Це дає змогу запобігти посилення гармонік напруги на резонансних частотах пасивних фільтрів до точки, що розглядається і мережею, а також шляхом зниження загального опору мережі незначно послаблює гармонічні струми між навантаженням і джерелом.



**Рис. 1. Класифікація ГФП:** \*ПАФ — паралельний активний фільтр;  
\*\*ПСАФ — послідовний активний фільтр

Оскільки у вказаній структурі не весь струм електричної мережі проходить через активний фільтр, тоді компоненти фільтра можуть бути зменшені (габарити, особливо за рахунок наявності трансформатора). Головним недоліком цієї структурної схеми є залежність ефективності від параметрів налаштування пасивних фільтрів для різних типів і режимів роботи нелінійного навантаження, тому з метою виключення резонансних явищ потрібне її попереднє дослідження. Область застосування цієї структури за умов промислових підприємств досить вузька і обмежена переважно високовольтними електричними мережами (6—10 кВ).

**Схема ГФП з послідовним активним та паралельним пасивним фільтрами.** Основною відмінністю є точка приєднання первинної обмотки трансформатора (послідовно між джерелом живлення та навантаженням), що забезпечує розширення функціональних можливостей цієї структурної схеми: послідовний активний фільтр забезпечує компенсацію ВГС напруги зі сторони передвключеної мережі, а пасивний фільтр (фільтри) — придушення ВГС струму нелінійного навантаження. Основною функцією АФ є формування компенсаційної напруги в протифазі до гармонійних складових передвключеної мережі. При цьому активний фільтр виступає як опір для гармонійних частот (Litran, Revuelta, Prieto, & Valles, 2014), що забезпечує підвищення ефективності пасивної фільтрації. В результаті послідовний фільтр ізолює навантаження від гармонійних складових з боку мережі і при цьому захищає пасивний фільтр від перевантаження.

Вказана структурна схема має недоліки, які обмежують область її застосування (Wolfe, Hurley, & Amoult, 2000; Wolfe, & Hurley, 2003), через трансформатор проходить загальний струм вузла навантаження; високі значення струму короткого замикання.

**Структурна схема ГФП з паралельним активним та паралельним пасивним фільтрами для компенсації вищих гармонік струму.** В основу цієї структурної схеми покладено паралельне з'єднання одного або більше налаштованих пасивних паралельного активного фільтрокомпенсуючих пристроїв. Така комбінація активного та пасивного фільтрокомпенсуючих пристроїв забезпечує досить ефективну компенсацію ВГС струму в СЕЗ. Найчастіше система керування активним фільтром у складі цього ГФП реалізується з використанням швидкого перетворення Фур'є, фазових перетворень чи теорії миттєвої потужності. Вказана структура використовується для підвищення ефективності компенсації вищих гармонік з використанням пасивних фільтрів та обмеження кількості пасивних фільтрів, налаштованих на придушення окремих гармонійних складових струму у мережі (3, 5, 7, 11, 13).

Однак вказана структурна схема не дає змоги запобігти перевантаженню ПФ або резонансних явищ з опором електричної мережі. Крім того, ця гібридна структура не має повною мірою всіх якостей паралельного АФ, оскільки ПФ обираються відповідно до величини гармонійних струмів, що споживаються НН. При зміні величини цих струмів пасивні фільтри переналаштовують. Наявність паралельного АФ дає змогу скоротити кількість пасивних фільтрів і підвищити їх ефективність. Крім того, при наявності ПФ знижується потужність активної частини (найдорожчі) (Бурбело, 2023).

Таким чином, на базі паралельного активного фільтрокомпенсуючого пристрою з вихідним пасивним фільтром і окремо підключеним пасивним фільтрокомпенсуючими пристроями створюється електротехнічний комплекс підвищення ПЯЕЕ.

**Основні принципи регулювання ГФП.** Враховуючи наявність різних теорій та розширення способів і методів активної фільтрації ВГС з'являється можливість керування параметрами пасивної частини ГФП. Крім того, при застосуванні окремих АФ з номінальними параметрами силових елементів, які розраховані на повну потужність нелінійного навантаження, зростає вартість такого пристрою. В той же час ПФ характеризуються обмеженою здатністю придушення вищих гармонійних складових. Таким чином, при використанні ГФП за рахунок ПФ знижується встановлена потужність силових елементів активної частини ГФП.

Принцип дії класичного ФГП передбачає формування електронними пристроями в колах ПФП струмів і напруг, які змінюють частотні характеристики фільтра і забезпечують підвищення ефективності компенсації ВГС за струмом та напругою в СЕЗ (Жежеленко, Шидловський, Півняк, & Саєнко, 2009). При цьому найчастіше використовуються автономні інвертори на повністю керованих перетворювачах змінного або постійного струму з імпульсною модуляцією. Найбільшого поширення набули ГФП, в яких активна частина з'єднана паралельно з пасивною частиною. Формування значень струму та напруги на виході активної частини ГФП проводиться шляхом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Для активної частини ГФП з ємнісним накопичувачем значення вихідного опору розраховується за виразом (1) (Бурбело, 2023):

$$Z_{ПАФ} = \frac{u_{ПАФ}}{i_{ПАФ}(t)} = \frac{K_{inv}(t) \cdot u_{dc}}{i_{ПАФ}(t)}, \quad (1)$$

де  $Z_{ПАФ}$  — значення вихідного опору;  $i_{ПАФ}(t)$  — модульований струм;  $u_{ПАФ}$  — модульована напруга) на виході ГФП;  $K_{инв}$  — функція модуляції.

Шляхом зміни  $K_{инв}$  можна забезпечити значення  $\frac{dZ_{ПАФ}(t)}{dt} = 0$ . В результаті  $Z_{ПАФ}$  буде дорівнювати еквівалентному активному опору.

Керуючи функцією  $K_{инв}(t)$ , можна настроїти фільтр на необхідну частотну характеристику ГФП. Це керування ГФП можна розглядати як зміну повного еквівалентного опору ГФП.

Основні обмеження при керуванні: частотні характеристики ключів автономного інвертора та ємності накопичувального елемента активної частини ГФП.

Характер еквівалентного опору активної частини  $Z_{ПАФ}(t)$  залежить від структури ГФП, місця підключення ПАФ і функції модуляції  $K_{инв}(t)$ .

**Залежності між функціональними можливостями ГФП, його структурою та особливостями реалізації системи автоматичного керування.** Як вхідні сигнали системи автоматичного керування (САК) ГФП використовуються такі величини: ВГС струму і напруги в СЕЗ, напруга мережі  $U_c$ , струм мережі  $I_c$ , струм НН  $I_{НН}$ , а також струм ПФ  $I_{пф}$ .

Тип вхідної величини обумовлюється функціями, які повинен виконувати ГФП. Якщо необхідно придушувати вищі гармоніки струму зі сторони вузла навантаження, при керуванні ГФП для виділення опорних величин краще використовувати струм НН навантаження або вузла навантаження. У разі компенсації спотворень напруги зі сторони мережі живлення доцільним є використовувати ВГС напруги.

Для коригування коефіцієнта потужності мережі доцільно використовувати струми або напруги основної гармоніки. Крім цього, вказані сигнали можуть бути також використовуватися для керування ГФП при компенсації провалів і відхилень напруги мережі.

З погляду простоти реалізації САУ ГФП як вхідний сигнал найчастіше використовується струм мережі. Необхідно враховувати, що при застосування в якості вхідного сигналу струму НН  $I_{НН}$  можливе підвищення якості фільтрації вищих гармонік на частоті налаштування ГФП.

Варто зазначити, що при використанні струму НН його перевагою перед іншими вхідними сигналами є практично повна його незалежність від ВГС напруги. Отже, найбільшого поширення набули системи керування ГФП з використанням як вхідного сигналу струму мережі або струму ПФ.

При оцінці ефективності застосування структур ГФП при різних вхідних сигналах і законах регулювання, крім несинусоїдності струму НН, варто враховувати несинусоїдність напруги живлення. Однак у цьому випадку можливе виникнення резонансних явищ у СЕЗ та відбувається додаткове завантаження ПФ струмами ВГС (послідовний резонанс).

**Імітаційне моделювання ГФП в умовах систем електрозабезпечення промислових та цивільних об'єктів.** Імітаційне моделювання проводилося для СЕЗ у середовищі Simulink системи MATLAB.

**Імітаційне моделювання системи електрозабезпечення з НН і ПФ.** Перед розробкою імітаційної моделі ПФП виконано розрахунок їх параметрів для забезпечення придушення канонічних вищих гармонік, які споживаються перетворювачами частоти технологічних агрегатів (електрозанурювальних установок). Розрахунок проводився за методикою (Denysyuk, & Derevianko, 2019), яка передбачає визначення величини компенсованої реактивної потужності ПФ  $Q_{ПФ}$  (2), частоти настрійки  $f_s$  (3) і типового значення добротності ПФ  $Q$  (4):

$$Q_{ПФ} = \frac{U^2}{X_c} = \frac{U^2}{\frac{1}{\omega C_{ПФ}}} = \omega \cdot C_{ПФ} \cdot U^2 = 2\pi \cdot f \cdot C_{ПФ} \cdot U^2, \text{ Вар}; \quad (2)$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{ПФ} \cdot C_{ПФ}}}, \text{ Гц}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{X_0}{R_{ПФ}}; \quad (4)$$

де  $f$  — номінальна частота системи (50 Гц);  $U$  — діюче значення лінійної напруги системи (380 В),  $X_0$  — резонансний індуктивний опір.

З використанням вихідних даних, прийнятих для розрахунку (табл. 1), виконано попереднє моделювання і проведено розрахунки та моделювання ГФП.

*Таблиця 1. Вихідні дані для імітаційного моделювання*

$U_{Сф}$ , В	$S_{кз}$ , МВА	$U_{НН}$ , В	$S_{нтр}$ , кВА	$L$ , км	$R_{ПЛ}$ , Ом/км	$C_{ПЛ}$ , пкФ/км	$L_{ПЛ}$ , мГн/км
6000	100	380	160	0,3	0,3864	775	4,12
$C_{сф}$ , мФ	$L_{сф}$ , мГн	$C_{сф}$ , мкФ	$R_{сф}$ , Ом	$L_{НН}$ , мГн	$R_{НН}$ , Ом	$C_{НН}$ , мкФ	
20	0,3	25	0,0001	11	3	150	

Результати розрахунків зведені в табл. 2 та 3, а також використовуються як параметри імітаційного моделювання.

*Таблиця 2. Значення параметрів ПФ для усунення 5-ї гармонійної ВГС*

$Q_{ПФ}$ , Вар	$C_{ПФ}$ , мкФ	$f_s$ , Гц	$L_{ПФ}$ , мГн	$R_{ПФ}$ , Ом	$Q$
8921	196	250	2,07	0,05	13

*Таблиця 3. Значення параметрів ПФ для усунення 7-ї гармонійної ВГС*

$Q_{ПФ}$ , Вар	$C_{ПФ}$ , мкФ	$f_s$ , Гц	$L_{ПФ}$ , мГн	$R_{ПФ}$ , Ом	$Q$
8921	196	350	1,06	0,05	6,6

Розроблено комп'ютерну імітаційну модель системи електрозабезпечення з НН у вигляді некерованого діодного випрямляча, що входить до складу багатьох існуючих перетворювачів частоти.

Результати імітаційного моделювання ділянки СЕЗ (табл. 4) показали, невідповідність ПЯЕ щодо наявності ВГС згідно з вимогами ДСТУ EN 50160:2014, 2014.

Коефіцієнти зниження рівня ВГС струму та напруги, наведені в табл. 5, показують наявність ВГС у мережі СЕЗ до та після застосування ПФ.

Величина зниження рівня ВГС струми та напруги, а також окремих гармонік визначається таким чином (5):

$$\Delta k_U = \frac{k_{U1} - k_{U2}}{k_{U1}} \cdot 100\%, \quad \Delta k_I = \frac{k_{I1} - k_{I2}}{k_{I1}} \cdot 100\%; \quad (5)$$

$$\Delta k_{U5} = \frac{k'_{U5} - k''_{U5}}{k'_{U5}} \cdot 100\%, \quad \Delta k_{I5} = \frac{k'_{I5} - k''_{I5}}{k'_{I5}} \cdot 100\%; \quad (6)$$

$$\Delta k_{U7} = \frac{k'_{U7} - k''_{U7}}{k'_{U7}} \cdot 100\%, \quad \Delta k_{I7} = \frac{k'_{I7} - k''_{I7}}{k'_{I7}} \cdot 100\%; \quad (7)$$

де  $k_{U1}, k_{I1}, k'_{U5}, k'_{U7}, k'_{I5}, k'_{I7}$  — коефіцієнти до застосування ПФ;  $k_{U2}, k_{I2}, k''_{U5}, k''_{U7}, k''_{I5}, k''_{I7}$  — коефіцієнти після застосування ПФ.

*Таблиця 4. Результат імітаційного моделювання використання ПФ для компенсації ВГС*

	$k_{I5}, \%$	$k_{I7}, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$k_M$
Без фільтра	19,64	16,8	9,21	17,30	362	149	0,87
Із ПФ	5,5	4,0	2,2	7,4	370	146	0,93

Відхилення напруги та струму визначаються за (8):

$$\Delta U = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \cdot 100\%, \quad \Delta I = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \cdot 100\%; \quad (8)$$

де  $U_1, I_1$  — напруга та струм до застосування ПФ;  $U_2, I_2$  — напруга та струм після застосування ПФ.

*Таблиця 5. Рівні зниження рівнів ВГС струму та напруги до та після застосування ПФ*

$\Delta U, \%$	$\Delta I, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{I7}, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta k_M, \%$
2,2	2	72	76	76	57	6,9

За результатами імітаційного моделювання встановлено достатню ефективність використання ПФ для зниження рівня ВГС струму і напруги. Крім того, внаслідок компенсації реактивної потужності за допомогою ПФ знижується споживання повної потужності, що обумовлює розвантаження трансформатора живлення від мережі і збільшить його термін служби в 2—4 рази (Жежеленко, Шидловський, Півняк, & Саєнко, 2009).

Враховуючи, що конструкція ПФ не передбачає використання силової електроніки, використання ПФ є достатньо економічним порівняно з АФ та ГФ. Такий метод підвищення ПЯЕЕ є доцільним у системах з НН, що працюють з постійним навантаженням, наприклад, установки електролізу, електропривод насосних агрегатів.

**Імітаційне моделювання системи електрозабезпечення з АФ.** За результатами досліджень, представленими у (Жаркін, Малахатка, & Новський, 2018), з'ясовано, що при встановленні ПФ на вихід паралельного АФ підвищує його ефективність.

Проведено імітаційне моделювання мережі СЕЗ з НН при встановленні паралельного АФ з різними методами керування, на вихід якого підключаються ПФ різного виду.

Проведено моделювання СЕЗ з паралельним АФ, що керується алгоритмом на основі методу визначення опорного струму без будь-яких фазових перетворень (як найпростіший) (Бурбело, 2023). Результати моделювання представлені у табл. 6.

**Таблиця 6. Дані результатів моделювання СЕЗ з паралельним АФ (ПАФ), що керується за опорним струмом, і вихідними ПФ різного виду**

Конфігурація ПАФ та ПФ	$U, В$	$I, А$	$k_I, \%$	$k_{I5}, \%$	$k_{I7}, \%$	$k_{U}, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$	$k_M, \%$
Без фільтра	362	149	19,64	16,8	9,21	17,30	11,5	8,81	0,87
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою зірка	378	143	5,7	4,0	2,9	7,1	3,2	3,3	0,98
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою трикутник	378	143	5,7	4,0	2,9	7,1	3,3	3,3	0,98
ПАФ з вихідним активно-індуктивно-ємнісним ПФ	379	141	5,6	3,9	2,8	7,0	3,0	3,1	0,98

Отримані рівні зниження коефіцієнтів, що характеризують наявність ВГС у мережі до та після застосування ПАФ з різними вихідними фільтрами, представлені в табл. 7.

**Таблиця 7. Коефіцієнти зниження ВГС до та після застосування ПАФ з різними вихідними ПФ**

Конфігурація ПАФ та ПФ	$\Delta U, В$	$\Delta I, А$	$\Delta k_I, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{I7}, \%$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta k_M, \%$
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою зірка	4,4	4,0	71,0	76,2	68,3	59,0	72,4	63,1	12,6
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою трикутник	4,4	4,0	71,0	76,3	68,2	58,8	72,3	63,22	12,6
ПАФ з вихідним активно-індуктивно-ємнісним ПФ	4,7	5,4	71,0	76,5	68,9	59,4	73,8	65,1	12,6

Дані, наведені у табл. 6 та 7, показують відповідність всіх показників якості електроенергії нормам ДСТУ EN 50160:2014, 2014 і більш високу ефективність придушення ВГС та підвищення коефіцієнта потужності.

Проведено моделювання СЕЗ з паралельним АФ, що керується алгоритмом на основі фазових перетворень (Бурбело, 2023). Результати моделювання представлені в табл. 8 та 9.

Отримані рівні зниження коефіцієнтів, що характеризують наявність ВГС у мережі до та після застосування ПАФ з різними вихідними фільтрами, представлені в табл. 9.

**Таблиця 8. Дані результатів моделювання СЕЗ з паралельним АФ (ПАФ), що керується на основі фазових перетворень, і вихідними ПФ різного виду**

Конфігурація ПАФ та ПФ	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$k_I, \%$	$k_{I5}, \%$	$k_{I7}, \%$	$k_U, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$	$k_M, \%$
Без фільтра	362	149	19,64	16,8	9,21	17,30	11,5	8,81	0,87
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою зірка	378	142	4,2	3,5	2,0	5,7	2,8	2,6	0,985
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою трикутник	378	142	4,2	3,5	2,0	5,7	2,8	2,6	0,985
ПАФ з вихідним активно-індуктивно-ємнісним ПФ	378	142	4,2	3,5	1,9	5,4	2,8	2,6	0,985

**Таблиця 9. Коефіцієнти зниження ВГС до та після застосування ПАФ, що керується на основі фазових перетворень, з різними вихідними ПФ**

Конфігурація ПАФ та ПФ	$\Delta U, \text{В}$	$\Delta I, \text{А}$	$\Delta k_I, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{I7}, \%$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta k_M, \%$
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою зірка	4,42	4,7	78,5	79,1	78,1	66,9	75,5	70,3	13,2
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою трикутник	4,4	4,7	78,5	79,1	78,2	67,0	75,5	70,5	13,2
ПАФ з вихідним активно-індуктивно-ємнісним ПФ	4,5	6,1	78,7	78,8	67,7	68,3	76,0	71,4	13,2

Представлені засоби підвищення ПЯЕЕ забезпечують різний ступінь компенсації ВГС. Імітаційне моделювання з використанням алгоритму керування на основі фазових перетворень підтверджує, що ПАФ із керуванням на фазових перетвореннях забезпечує компенсацію ВГС струму та напруги краще, ніж ПАФ із керуванням з методом визначення опорного струму. Отже, можна рекомендувати використовувати ПАФ із системою керування на фазових перетвореннях та ПФ на виході для розробки ГФП.

Проведено моделювання СЕЗ з установкою послідовного активного фільтра (ПСАФ), що керується за алгоритмом на основі перетворень Фортеस्क'ю, і ПФ різного виду на виході (Бурбело, 2023). Результати моделювання представлені у табл. 10.

Отримані рівні зниження коефіцієнтів, що характеризують наявність ВГС у мережі до та після застосування ПСАФ з різними вихідними фільтрами, представлені в табл. 11.

За результатами імітаційного моделювання встановлено, що при використанні послідовного активного фільтра (ПСАФ) забезпечується компенсація ВГС напруги та відхилення напруги на стороні мережі, що, на відміну від ПАФ, не має впливу на рівень ВГС струму.

*Таблиця 10. Дані результатів моделювання СЕЗ з послідовним АФ (ПСАФ), що керується на основі перетворень Фортеск'ю, і вихідними ПФ різного виду*

Конфігурація ПАФ та ПФ	$U, V$	$k_U, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$	$k_M, \%$
Без фільтра	362	17,30	11,5	8,81	0,87
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою зірка	380	3,3	2,1	1,8	0,91
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою трикутник	380	3,3	2,1	1,8	0,91
ПАФ з вихідним активно-індуктивно-ємнісним ПФ	380	3,3	2,1	1,8	0,915

*Таблиця 11. Коефіцієнти зниження ВГС до та після застосування ПАФ, що керується на основі фазових перетворень, з різними вихідними ПФ*

Конфігурація ПАФ та ПФ	$\Delta U, V$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta k_M, \%$
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою зірка	4,9	80,8	81,7	79,5	4,6
ПАФ з вихідним активно-ємнісним ПФ за схемою трикутник	4,9	81,0	81,7	79,5	4,6
ПАФ з вихідним активно-індуктивно-ємнісним ПФ	4,9	81,0	82,7	79,5	5,17

Отже, для забезпечення нормативних ПЯЕЕ необхідно враховувати наявний рівень ВГС струму і напруги в СЕЗ та застосовувати ФП на основі ПАФ із керуванням на фазових перетвореннях, а для ефективної компенсації ВГС — напруги на основі ПСАФ.

Дослідження (Жаркін, Новський, & Малахатка, 2018) підтверджують необхідність встановлення пасивних фільтрів на виході ПАФ, тому розглянемо структуру гібридного електротехнічного комплексу з використанням ПАФ, на виході якого підключений ПФ певної конфігурації. Зазначимо, що при застосуванні ПАФ без вихідного ПФ підвищується рівень ВГС напруги.

**Імітаційне моделювання СЕЗ з гібридними фільтруючими пристроями (ГФП).** Розглянемо імітаційне моделювання гібридного ГФП з ПФ, що налаштовані на придушення канонічних ВГС, і АФ на основі ПАФ та ПСАФ. До складу імітаційної моделі входить джерело необмеженої потужності, що відповідає централізованій системі електропостачання, силовий трансформатор 6/0,4 кВ зі схемою з'єднань обмоток трикутник/зірка з глухо-заземленою нейтраллю та нелінійне навантаження.

При розробці імітаційної моделі параметри СЕЗ задавалися у відносних одиницях (в. о.). Для визначення найбільш ефективної структури ГФП моделювалося

спотворення струму НН в діапазоні від 9 до 30%, а також напруги мережі — від 2 до 15%.

**Моделювання СЕП з гібридною структурою на основі ПАФ.** Гібридний фільтр складався з паралельного АФ(ПАФ) без вихідного фільтра та двох ПФ ВГС струму.

При застосуванні ГФП на основі ПАФ відбувається компенсація реактивної потужності і, відповідно, зниження повної потужності, що споживається з мережі.

Дані щодо активних та реактивних потужностей, а також за значеннями  $k_M$  при використанні ГФП на базі ПАФ наведені в табл. 12.

*Таблиця 12. Енергетичні показники СЕП при використанні ГФП на базі ПАФ та двох ПФ*

Режим роботи	$P$ , в. о.	$Q$ , в. о.	$k_M$
Без ГФП	0,292	0,067	0,974
Із ГФП	0,293	0,001	0,999

За результатами моделювання були отримані ПЯЕ та значення зниження коефіцієнтів наявності ВГС у мережі до та після використання ФКП, які представлені в табл. 13.

*Таблиця 13. ПЯЕЕ та значення зниження рівня ВГС при використанні ГФП на базі ПАФ і двох ПФ*

Конфігурація ГФП	$U$ , В	$I$ , А	$k_I$ , %	$k_{IS}$ , %	$k_{IT}$ , %	$k_{UI}$ , %	$k_{UIS}$ , %	$k_{UIT}$ , %	$k_M$ , %
ПАФ та 2 ПФ	380	192	0,5	0,4	0,3	1,4	1,2	1,1	0,999
Конфігурація ГПФ	$\Delta U$ , В	$\Delta I$ , А	$\Delta k_I$ , %	$\Delta k_{IS}$ , %	$\Delta k_{IT}$ , %	$\Delta k_{UI}$ , %	$\Delta k_{UIS}$ , %	$\Delta k_{UIT}$ , %	$\Delta k_M$ , %
ПАФ та 2 ПФ	5,1	0,4	97	93	92	86	83	83	2,6

Імітаційне моделювання показало, що при використанні ГФП на основі ПАФ та ПФ рівень напруги не змінюється і відбувається більш ефективна компенсація ВГС порівняно з окремим використанням ПАФ та ПФ. Крім того, ГФП на основі ПАФ забезпечує компенсацію реактивної потужності в СЕЗ.

**Імітаційне моделювання СЕЗ з ГФП на основі послідовного АФ та двох ПФ.** За результатами моделювання були отримані ПЯЕЕ та значення зниження коефіцієнтів наявності ВГС у мережі до та після використання ФКП, які представлені в табл. 14.

*Таблиця 14. ПЯЕЕ та значення зниження рівня ВГС при використанні ГФП на базі ПСАФ двох ПФ*

Конфігурація ГФП	$U$ , В	$k_{UI}$ , %	$k_{UIS}$ , %	$k_{UIT}$ , %
ПСАФ та 2 ПФ	380	2,2	2,0	1,9
Конфігурація ГПФ	$\Delta U$ , В	$\Delta k_{UI}$ , %	$\Delta k_{UIS}$ , %	$\Delta k_{UIT}$ , %
ПСАФ та 2 ПФ	5,1	85	76,5	33

Результати моделювання дали змогу встановити, що при використанні ГФП з ПСАФ та двох ПФ підтримується нормативний рівень напруги у споживача і забезпечується пригнічення ВГС напруги. Такий метод підвищення ПЯЕЕ може бути використаний у випадках, коли в умовах протяжних ліній електропередачі через підключення навантаження відхилення напруги перевищує допустимі значення.

При побудові автоматизованої системи підвищення ПЯЕЕ в системі електрозабезпечення для компенсації реактивної потужності, підтримання заданого рівня напруги та зниження рівня ВГС струму та напруги доцільно використовувати комбіновані ГФП на основі ПАФ або ПСАФ та двох ПФ. В результаті використання ПФ, на відміну від розглянути вище засобів, вказана схема забезпечує зменшення потужності АФ і відповідності вартості ФКП.

**Імітаційне моделювання ГФП на основі паралельного АФ в СЕП з частотно-регульованим електроприводом.** Імітаційна модель СЕП розроблена в середовищі Simulink системи MATLAB. Для перевірки ефективності ГФП з ПАФ проведено моделювання СЕЗ з НН у вигляді частотно-регульованій асинхронний електропривод (ЧРЕП) з векторною системою керування. На виході ПАФ встановлені дросель і ємнісний фільтр, а зі сторони НН (ЧРАЕП) для зниження рівня 5-ї і 7-ї ВГС струму встановлені два ПФ.

Алгоритм функціонування активної частини ГФП побудований на фазових перетвореннях струмів і напруг компensoваної мережі з використанням фазового автопідстроювання частоти.

Енергетичні показники СЕП з ГФП наведені в табл. 15.

*Таблиця 15. Енергетичні показники СЕЗ з ГФП*

Режим роботи	$S$ , в. о.	$P$ , в. о.	$Q$ , в. о.	$k_M$
Без ГФП	0,339	0,329	0,084	0,97
Із ГФП	0,329	0,329	-0,001	1

Результати використання ГФП та коефіцієнтів зниження ВГС представлені в табл. 16.

*Таблиця 16. Коефіцієнти зниження ВГС напруги і струму до та після застосування ГФП*

Конфігурація ГПФ	$\Delta k_I$ , %	$\Delta k_{I5}$ , %	$\Delta k_{I7}$ , %	$\Delta k_U$ , %	$\Delta k_{U5}$ , %	$\Delta k_{U7}$ , %
ПАФ та 2 ПФ	95,2	98,1	94,0	86,3	96,2	88,2

Дані результатів моделювання показали, що при використанні ГФП ефективність компенсації ВГС є достатньою: рівень ВГС напруги  $k_U$  зменшився на 86,3%, а струму  $k_I$  — на 95,25%. Крім того, за рахунок використання з ГФП відбувається компенсація реактивної потужності в СЕЗ з ЧРЕП ( $Q_{ком}=0,085$  в. о.).

Отже, при СЕЗ з ЧРЕП доцільно використовувати ГФП з ПАФ та двох ПФ для забезпечення компенсації реактивної потужності і, відповідно, збільшення пропускної здатності ЛЕП, розвантаження силового трансформатора, від якого живиться НН, і забезпечення нормативного рівня ВГС струму.

**Оцінка впливу режимів роботи СЕЗ на ефективність ГФП.** Ефективність роботи ГФП значною мірою залежить від режимів роботи СЕЗ, які визначаються такими параметрами: відношення повної потужності НН  $S_{HH}$  до повної потужності силового трансформатора  $S_{Tp}$ , відношення реактивної потужності (РП) ПФ налаштованого на придушення 5-ї гармоніки ( $Q_{ПФ5}$ ) і, відповідно, ПФ налаштованого на придушення 7-ї гармоніки ( $Q_{ПФ7}$ ) до реактивної потужності НН ( $Q_{HH}$ ).

Для оцінювання зниження рівня ВГС струму і напруги, а також рівня споживання за результатами моделювання побудовані залежності (рис. 2).

$$k_U = f\left(\frac{S_{HH}}{S_{Tp}}\right), \quad k_I = f\left(\frac{S_{HH}}{S_{Tp}}\right), \quad k_M = f\left(\frac{S_{HH}}{S_{Tp}}\right).$$

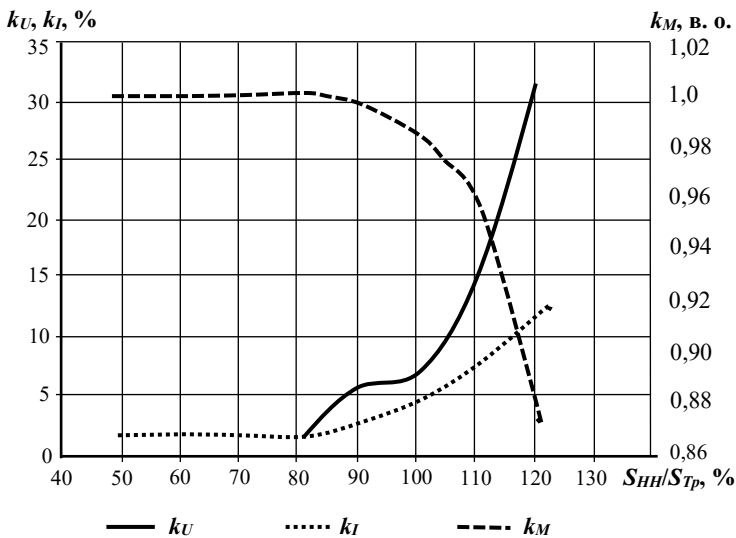


Рис. 2. Залежність  $k_U$ ,  $k_I$ ,  $k_M$  від завантаження трансформатора  $S_{HH}/S_{Tp}$

Отримані графіки показують, що максимальна ефективність придушення ВГС напруги і струму досягається при відношенні  $S_{HH}/S_{Tp} \leq 80\%$ .

При перевантаженні трансформатора виникають резонансні явища на 5-й ВГС, підвищуються струми, кратні 5-й гармонійній складовій, при цьому відбувається зростання споживання реактивної потужності і, як наслідок, зниження коефіцієнта потужності навантаження  $k_M$ .

Проведено дослідження впливу на ефективність компенсації ВГС ГФП рівня споживання РП НН, шляхом зміни співвідношення РП ПФ  $Q_{ПФ5}$  і реактивної потужності НН  $Q_{HH}$ .

За даними результатів моделювання побудовані залежності (рис. 3):

$$\bar{k}_U = f\left(\frac{Q_{ПФ5}}{Q_{HH}}\right), \quad \bar{k}_I = f\left(\frac{Q_{ПФ5}}{Q_{HH}}\right), \quad \bar{k}_M = f\left(\frac{Q_{ПФ5}}{Q_{HH}}\right).$$

За результатами моделювання встановлено, що максимальна ефективність компенсації ВГС за допомогою ГФП досягається при співвідношенні  $\frac{Q_{\text{ПФ5}}}{Q_{\text{НН}}} = 80\%$ . При збільшенні споживання РП ефективність роботи ГФП погіршується.

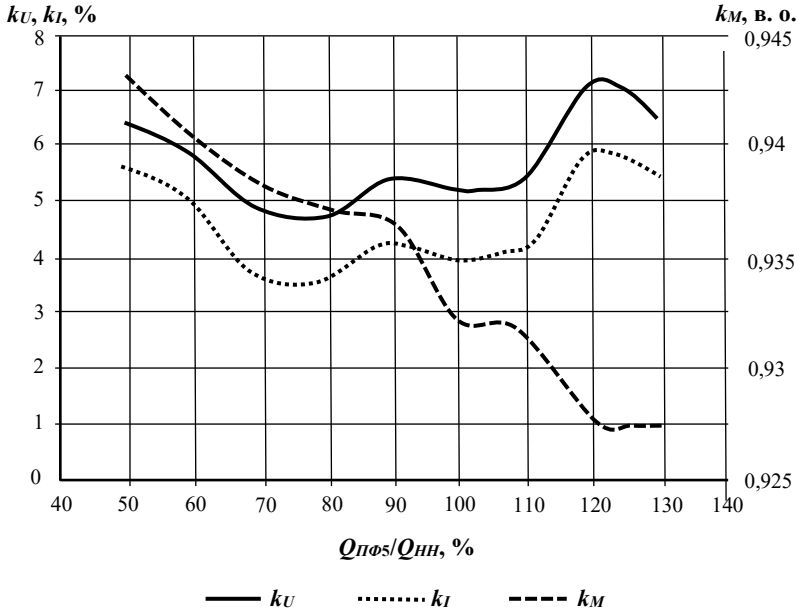


Рис. 3. Залежність  $k_U, k_I, k_M$  від  $Q_{\text{ПФ5}}/Q_{\text{НН}}$

Проведено дослідження впливу співвідношення реактивної потужності  $Q_{\text{ПФ7}}$  ГФП, налаштованого на 7-у вищу гармонійну складову, до реактивної потужності нелінійного навантаження  $Q_{\text{НН}}$  на ефективність компенсації ВГС та реактивної потужності.

За результатами моделювання побудовані залежності (рис. 4).

$$k_U = f\left(\frac{Q_{\text{ПФ7}}}{Q_{\text{НН}}}\right), \quad k_I = f\left(\frac{Q_{\text{ПФ7}}}{Q_{\text{НН}}}\right), \quad k_M = f\left(\frac{Q_{\text{ПФ7}}}{Q_{\text{НН}}}\right).$$

Аналіз отриманих залежностей показав, що ефективність роботи ГФП значною мірою обумовлюється режимом роботи СЕЗ. При зміні навантаження СЕЗ для забезпечення нормативних значень необхідно змінювати параметри ГФП на основі ПАФ з двома ПФ з урахуванням заданого ступеня корекції ПЯЕЕ та ступеня компенсації РП з використанням відповідного алгоритму.

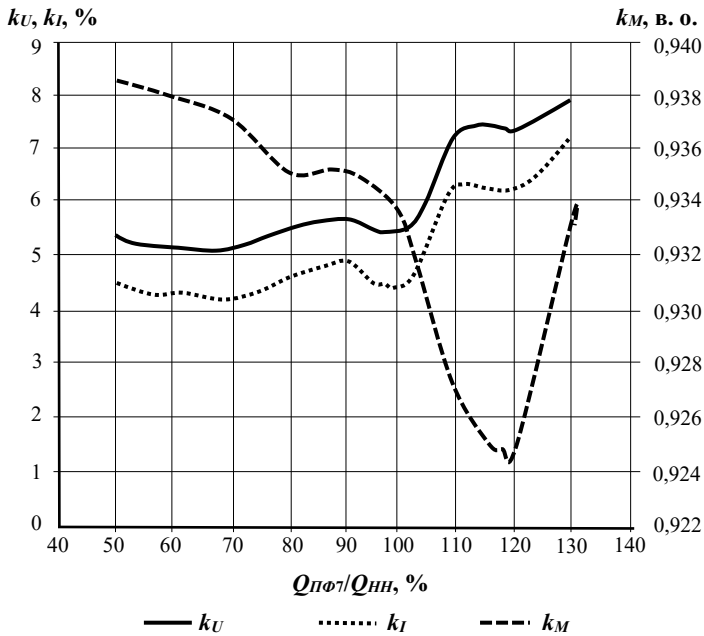
**Алгоритм керування ГФП.** Робота СЕЗ з НН характеризується змінною амплітуди та спектрального складу споживаного несинусоїдального струму. Це обумовлюється такими чинниками:

- зміною режиму роботи окремого НН;

- відключенням групи НН в аварійному режимі під час переходу СЕЗ з одного джерела живлення на інше.

Для забезпечення нормативних ПЯЕЕ необхідно виконати певну послідовність дій з ГПФ. Залежно від технологічного режиму роботи окремого НН для компенсації ВГС і регулювання рівня РП, можна використовувати пасивну частину ГПФ або його активну частину з меншим номінальним компенсаційним струмом.

При переході в аварійний режим живлення СЕЗ від основного джерела на резервне джерело іншої потужності існує необхідність відключення НН, що не відповідають з точки зору технологічного процесу. Наприклад, це може бути відключення частини НН та перемикання найбільш відповідальних споживачів від газотурбінної установки. При цьому також потрібно змінювати режим корекції ВГС та компенсації РП.



**Рис. 4. Залежність  $k_U, k_I, k_M$  від  $Q_{ПФ}/Q_{НН}$**

Встановлено, що максимальна ефективність компенсації ВГС за допомогою ГПФ досягається при відношенні  $\frac{Q_{ПФ}}{Q_{НН}} = 70\%$ .

Вибір параметрів та конфігурації ГПФ проводять за алгоритмом, наведеним на рис. 5.

При розробці алгоритму використані особливості роботи ГПФ при різних режимах НН і враховувалося, що для компенсації ВГС струму і напруги найбільш економічним є використання ПФ. На першому етапі вимірюються параметрів СЕЗ та підключеного НН, а також визначається ступінь компенсації рівня ВГС струму та напруги. Для компенсації використовується найпростіший ПФ, що налаштований на придушення окремих ВГС. Якщо дія ПФ є недостатньою для компенсації

рівня ВГС, тоді використовується ГФП з вибором активної частини. Активними частинами ГФП є ПАФ або ПСАФ із різними алгоритмами керування. При недостатності компенсації ВГС за допомогою АФ, використовують додатковий ПФ, що встановлюється на виході активної частини ГФП.

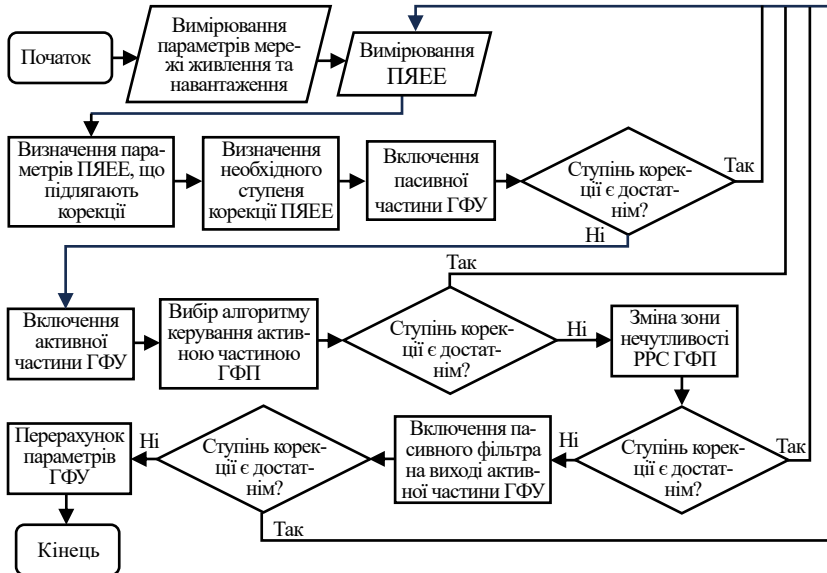


Рис. 5. Алгоритм керування ГФП

## Висновки

У статті пропонується рішення актуального науково-технічного завдання підвищення ПЯЕЕ в СЕЗ з НН шляхом обґрунтованого використання ГФП для підвищення коефіцієнта потужності, зниження рівня ВГС струму і напруги.

За результатами досліджень можна зробити такі висновки.

1. Конфігурацію ГФП, яку потрібно використати в конкретних умовах СЕЗ з НН, необхідно визначати на основі поточних значень ПЯЕЕ в СЕЗ шляхом аналізу основних топологій ГФП.

2. У результаті імітаційного моделювання встановлено, що ГФП з паралельним АФ та двома ПФ забезпечує зниження рівня ВГС струму та напруги відповідно більш ніж на 90 і 70%, а з послідовним АФ та двома ПФ — зниження рівня ВГС лише напруги більше ніж на 80%.

3. Для забезпечення нормативних показників ПЯЕЕ при зміні параметрів мережі живлення СЕЗ та підключеного НН вибір структури ГФП і алгоритму керування АФ доцільно проводити з використанням запропонованого алгоритму керування ГФП.

## Література

Бурбело, М. Й. (2023). *Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання комбінованого (локального та мережного) використання*: електронний навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ.

- Жежеленко, В. В., Шидловський, А. К., Півняк, Г. Г., & Сасенко, Ю. Л. (2009). *Електромагнітна сумісність у системах електропостачання*. Дніпро: Національний гірничий університет.
- Жаркін, А. Ф., Новський, В. О., & Малахатка, Д. О. (2015). Гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі для трифазних систем з нелінійними та змінними навантаженнями. *Технічна електродинаміка*, 25—30.
- Жаркін, А. Ф., Новський, В. О., & Малахатка, Д. О. (2018). Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів. *Технічна електродинаміка*, 1, 69—77. <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.069>.
- Жаркін, А. Ф., Палачов, С. О., Пазєєв, А. Г., & Малахатка, Д. О. (2024). Оцінювання впливу роботи двонапрявленого напівпровідникового перетворювача на показники якості електропостачання в MICROGRID. *Технічна електродинаміка*, 4, 73—79. <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.073>.
- Жаркін, А. Ф., Малахатка, Д. О., & Новський, В. О. (2018). Моделювання режимів роботи гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів при забезпеченні електромагнітної сумісності в трифазних системах. *Технічна електродинаміка*, 4, 73—79. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.106>.
- Шестеренко, В. Є. (2010). *Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств*. Вінниця: Нова Книга.
- Akagi, H. (2005). Active Harmonic Filters. *Proceedings of the IEEE*, 93(12), 2128—2141. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603>.
- Akagi, H., Watanabe, E., & Aredes, M. (2017). *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning* (IEEE Press Series on Power Engineering). New York: Wiley-IEEE Press.
- Attaianese, C., & Tomasso, G. (2002). Optimized modulation for PWM rectifiers. Conference: *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002. IEEE, 2. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985219>.
- Costabeber, A., Tenti, P., Caldognetto, T., & Verri Liberado, E. (2013). *Selective compensation of reactive, unbalance, and distortion power in smart grids by synergistic control of distributed switching power interfaces*. 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6634622>.
- Costabeber, A., Tenti, P., Erseghe, T., Tomasin, S., & Mattavelli, P. (2011). *Distributed control of smart microgrids by dynamic grid mapping*. 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. (IECON 2011). <https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6119500>.
- Costabeber, A., Tenti, P., Mattavelli, P., Erseghe, T., & Tomasin, S. (2011). *Optimization of Micro-Grid Operation by Dynamic Grid Mapping and Token Ring Control*. 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE).
- Costabeber, A., Tenti, P., & Mattavelli, P. (2012). *Distributed cooperative control of low-voltage residential microgrids*. 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEDG.2012.6254042>.
- Costabeber, A., Tenti, P., Caldognetto, T., & Verri Liberado, E. (2013). *Selective compensation of reactive, unbalance, and distortion power in smart grids by synergistic control of distributed switching power interfaces*. European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6634622>.
- Denysyuk, S., & Derevianko, D. (2019). *Power Electronics: Electronics devices modelling in MATLAB Simulink. Computer practicum*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
- Krylov, D., Kholod O., & Radohuz S. (2020). *Active rectifier with different control system types*. 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) IEEE, 273—278. <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263226>.
- Krylov, D. S., & Kholod, O. I. (2021). The efficiency of the active controlled rectifier operation in the mains voltage distortion mode. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2, 30—35. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.05>.

Litran, S. P., Revuelta, P. S., Prieto, J., & Valles, A. P. (2014). *Control strategy for an interface to improve the power quality at the connection of AC microgrids*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14, 12(6)). <https://doi.org/10.24084/repqj12.498>.

Salmeron, P., & Litran, S. P. (2010). Improvement of the electric power quality using series active and shunt passive filters. *IEEE transactions on power delivery*, 25(2), 1058—1067. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2034902>.

Salmon, J. C. (1994). *Comparative evaluation of circuit topologies for 1-phase and 3-phase boost rectifiers operated with a low current distortion*. Proc. Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering, Sep. 25—28, 30—33.

Liu, X. (2021). Subway Traction Power Supply System Based on PWM Rectifier. *Journal of Physics*, 2136(1), 1—5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2136/1/012019>.

Vazquez, N., Rodriguez, H., Hernandez, C., Rodriguez, E., & Arau, J. (2009). Three-Phase Rectifier With Active Current Injection and High Efficiency. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(1), 110—119.

Wang, P., Li, H., Cao, T., & Wang, X. (2019). Proof of Equivalence Between Two Interlaced Two-level PWM Rectifiers and Three-level PWM Rectifiers. *Journal of the China Railway Society*, 41(1), 59—64. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2019.01.008>.

Wolfe, W. H., Hurley, W. G., & Amoult, S. (2000). *Power factor correction for ac/dc converters with cost effective inductive filtering*. 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (PESC'00). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PESC.2000.878872>.

Wolfe, W. H., & Hurley, W. G. (2003). Quasi-active power factor correction with a variable inductive filter: theory, design and practice. *IEEE Trans, on Power Electron*, 18(1), 248—255. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.807135>.