УДК 631 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.5

Г. С. БЄЛОХА
кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4277-367X

В. О. МУЗИКА
аспірант кафедри електропостачання
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0003-2528-8696

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У даній роботі розглянуто актуальність проблеми забезпечення якості електричної енергії (ЯЕ) в сучасних системах електропостачання (СЕП), що пов'язана зі зростаючою інтеграцією розосередженої генерації (РГ) та широким використанням нелінійних навантажень. Проаналізовано ключові виклики, спричинені спотворенням синусоїдальності напруги та струму вищими гармоніками, а також труднощі в управлінні реактивною потужністю та підтриманні стабільності напруги. Розглянуто комплексний аналіз проблематики гармонічних спотворень та управління реактивною потужністю в СЕП з РГ, а також демонстрація масштабу цих проблем на основі експериментальних досліджень параметрів ЯЕ на реальному промисловому об'єкті. Методика дослідження включає аналіз науково-технічної літератури та нормативних документів, що регламентують показники ЯЕ. Проведено експериментальні вимірювання на комплектній трансформаторній підстанції (КТП) прокатного стану промислового підприємства з використанням спеціалізованого аналізатора ЯЕ. Проаналізовано часові тренди напруги, струму, коефіцієнта потужності, сумарних коефіцієнтів гармонійних спотворень напруги (THDU) та струму (THDI), а також спектральний склад гармонік. За результатами дослідження встановлено, що робота потужного нелінійного навантаження (прокатний стан) призводить до суттєвих спотворень ЯЕ. Зафіксовано значне перевищення нормативних значень THDU (середні значення 12–13 %, пікові – понад 20 %) та THDI (середні значення 45–90 %, пікові – понад 100 %). Наукова новизна полягає в отриманні та аналізі актуальних експериментальних даних щодо рівнів гармонічних спотворень, генерованих сучасним потужним промисловим обладнанням, та їх комплексного впливу на показники ЯЕ в умовах реальної СЕП, що доповнює існуючі теоретичні дослідження та моделі. Практична цінність отриманих результатів полягає в обґрунтуванні обмежень застосування стандартних засобів компенсації реактивної потужності за високих рівнів гармонік та у наданні рекомендацій щодо необхідності використання активних фільтрів або пристроїв статичної генерації реактивної потужності для ефективного покращення ЯЕ на аналогічних промислових об'єктах, що сприятиме підвищенню надійності та енергоефективності їх електропостачання.

Ключові слова: *якість електроенергії, гармонічні спотворення, THD, реактивна потужність, коефіцієнт потужності, розосереджена генерація, промислові навантаження, силовой активний фільтр, інвертор.*

H. S. BIELOKHA
PhD in Engineering, Associate Professor
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-4277-367X

V. O. MUZYKA
Postgraduate Student at the Department of Power Supply
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0003-2528-8696

ANALYSIS OF POWER SUPPLY QUALITY ISSUES IN MODERN ELECTRICAL SYSTEMS

This paper considers the urgency of the problem of ensuring the quality of electric power (EP) in modern power supply systems (PSS), which is associated with the growing integration of distributed generation (DG) and the widespread use of nonlinear loads. The key challenges caused by the distortion of voltage and current sinusoidality by higher harmonics,

© Бєлоха Г. С., Музика В. О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

as well as difficulties in managing reactive power and maintaining voltage stability are analyzed. The purpose of the article is to comprehensively analyze the problems of harmonic distortion and reactive power control in a PPS with DG, as well as to demonstrate the scale of these problems based on experimental studies of NP parameters at a real industrial facility. The research methodology includes an analysis of scientific and technical literature and regulatory documents governing power quality indicators. Experimental measurements were made at a complete transformer substation (CTS) of the rolling mill of an industrial enterprise using a specialized power quality analyzer. Time trends of voltage, current, power factor, total harmonic distortion coefficients of voltage (THDU) and current (THDI), as well as the spectral composition of harmonics were analyzed. The study found that the operation of a powerful nonlinear load (rolling mill) leads to significant distortions of NF. A significant excess of the standard values of THDU (average values of 12–13 %, peak values of more than 20 %) and THDI (average values of 45–90 %, peak values of more than 100 %) was recorded. The scientific novelty lies in obtaining and analyzing relevant experimental data on the levels of harmonic distortion generated by modern powerful industrial equipment and their complex impact on the NP indicators in a real EPS, which complements existing theoretical studies and models. The practical value of the results obtained is to substantiate the limitations of the use of standard means of reactive power compensation at high harmonic levels and to provide recommendations on the need to use active filters or static reactive power generation devices to effectively improve the EE at similar industrial facilities, which will help to increase the reliability and energy efficiency of their power supply.

Key words: *power quality, harmonic distortion, THD, reactive power, power factor, distributed generation, industrial loads, active power filter, inverter.*

Постановка проблеми

Останніми роками електроенергетика швидко змінюється через нові технології та екологічні вимоги. Традиційна модель централізованого виробництва електроенергії поступово доповнюється моделями з розосередженою генерацією (РГ), що активно використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ), такі як сонячні (СЕС) та вітрові (ВЕС) електростанції. Цей перехід відкриває нові можливості для підвищення надійності та гнучкості систем електропостачання (СЕП), однак в той же час породжує низку технічних викликів, серед яких одне з ключових місць посідає забезпечення належної якості електричної енергії (ЯЕ) [1–10].

Під якістю електроенергії зазвичай розуміють здатність енергосистеми постійно постачати напругу з номінальними параметрами частоти та форми синусоїди. У реальних умовах досягнення такої якості є складним завданням через численні зовнішні та внутрішні фактори впливу. На практиці відхилення від цього ідеалу є розповсюдженим явищем, спричиненим як роботою самої системи, так і особливостями підключених навантажень. Погана якість електроенергії призводить до значних економічних та технічних проблем, включаючи підвищені втрати потужності, перегрівання, передчасне старіння та передчасний вихід з ладу електрообладнання, збої в роботі чутливих приладів та систем керування, а також зниження загальної ефективності СЕП [2, 4].

Якість електроенергії залежить від якості постачання, а також від якості споживання. Інтеграція джерел РГ, особливо тих, що підключаються до мережі через силові електронні перетворювачі, суттєво впливає на параметри ЯЕ. Нестабільний та імовірнісний характер генерації СЕС та ВЕС, зумовлений природними факторами, а також робота самих перетворювачів, стають джерелами додаткових спотворень та коливань параметрів режиму мережі. До основних проблем ЯЕ, що загострюються в умовах широкого впровадження РГ, належать спотворення форми напруги та струму (гармоніки) та проблеми пов’язані з балансом та перетоками реактивної потужності. Ці два аспекти взаємопов’язані та комплексно впливають на надійність, стабільність та економічність функціонування сучасних СЕП, особливо локальних електроенергетичних систем (ЛЕС) та мікромереж [9, 7, 6, 4].

Таким чином глибокий аналіз проблематики, пов’язаної з гармонічними спотвореннями та управлінням реактивною потужністю в мережах з РГ, є надзвичайно актуальним завданням. Розуміння джерел цих проблем, їхніх наслідків та існуючих методів оцінювання є необхідною передумовою для розробки ефективних технічних рішень та стратегій керування спрямованих на підтримання стабільної якості електропостачання в умовах переходу до нової енергетичної моделі.

Однією з найбільш значущих проблем ЯЕ в сучасних СЕП є спотворення синусоїдальності форми кривих напруги та струму, що проявляється у вигляді вищих гармонійних складових або гармонік. Гармоніки – це синусоїдальні напруги або струми, частоти яких кратні основній частоті мережі (50 або 60 Гц). Окрім гармонік, існують також інтергармоніки, субгармоніки та постійна складова [2, 6, 9].

Основним джерелом гармонік є нелінійні навантаження, струм споживання яких не є пропорційним прикладеній напрузі. До них належать пристрої силової електроніки (випрямлячі, інвертори, перетворювачі частоти, імпульсні джерела живлення, БДЖ, зарядні пристрої), інтерфейси ВДЕ (інвертори СЕС та ВЕС), специфічні промислові навантаження (дугові печі, зварювання, потужні приводи), сучасні освітлювальні прилади (люмінесцентні та LED лампи), а також насичення магнітопроводів трансформаторів та електричних машин. Висока частка комутації сучасних перетворювачів може генерувати також надгармоніки (supraharmonics) [2, 4, 6, 9, 10].

Присутність вищих гармонік у мережі призводить до додаткових втрат потужності та перегрівання елементів мережі й обладнання, зниження коефіцієнта потужності, електромагнітних завад для систем зв’язку та керування,

помилок у роботі лічильників, вібрацій та шуму в машинах і трансформаторах, прискореного старіння ізоляції та, що особливо небезпечно, до резонансних явищ, які можуть спричинити значні перенапруги та пошкодження обладнання, особливо конденсаторних батарей [2, 6, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для кількісної оцінки рівня гармонічних спотворень використовують показник сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень (Total Harmonic Distortion, THD), який відображає рівень спотворень напруги (THDU) або струму (THDI) відносно їх основної гармоніки. Міжнародні та національні стандарти (наприклад IEEE 519, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4, ДСТУ EN 50160) встановлюють граничні допустимі рівні THD та окремих гармонік для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) обладнання в СЕП, а стандарт IEEE 519 також встановлює ліміти на спотворення струму в точці загального приєднання співвідносячи їх з максимальним струмом навантаження споживача (Total Demand Distortion, TDD). Зазвичай, для THDU допустимий рівень обмежується 5–8 %, а ліміти для спотворень струму (THDI та TDD) залежать від параметрів мережі та навантаження [9; 2]. Особливо гостро проблема стоїть гармонік у ЛЕС та мікромережах в острівному режимі через менший демпфуючий вплив системи [9].

Реактивна потужність (РП) необхідна для роботи електрообладнання зі змінним магнітним полем (двигуни, трансформатори), а її баланс у мережі безпосередньо впливає на рівень напруги. Ефективне управління РП є ключовим для стабільності напруги, мінімізації втрат та надійної роботи СЕП [10, 4].

Основними споживачами РП є індуктивні навантаження та лінії електропередачі. Джерелами РП традиційно є синхронні генератори та БСК. Сучасні пристрої, такі як STATCOM (Static Var Generator, SVG) та інтерфейси ВДЕ, також можуть брати участь у генерації чи споживанні РП, хоча деякі інвертори ВДЕ можуть працювати з одиничним коефіцієнтом потужності, не підтримуючи напругу мережі [10, 2].

Проблеми, пов'язані з РП. Незбалансованість або надмірні перетоки РП призводять до відхилень напруги (провалів, перенапруг, коливань), збільшення втрат активної потужності через зростання повного струму, зниження пропускної спроможності мережі та, у критичних випадках, до порушення статичної та динамічної стійкості енергосистеми мережі [2, 4, 6, 10].

– Формування ЛЕС та мікромереж на основі РГ створює специфічні умови, що загострюють проблеми ЯЕ:

– Зміна потоків потужності: поява двонаправлених та реверсивних потоків потужності ускладнює регулювання напруги та роботу систем захисту.

– Низька інерція: системи з високою часткою інверторної генерації ВДЕ більш чутливі до порушень балансу потужності та відхилень частоти, особливо в острівному режимі.

– Острівний режим роботи: Хоча потенційно підвищує надійність для локальних споживачів, цей режим створює значні виклики для підтримання стабільності напруги, частоти, балансу потужності та ЯЕ. Сучасні стандарти часто вимагають швидкого відключення РГ, хоча розвиток технологій спрямований на забезпечення стабільної роботи в такому режимі [4, 5].

– Взаємний вплив та ЕМС: концентрація перетворювачів та нелінійних навантажень підвищує ризик проблем з ЕМС, вимагаючи ретельного аналізу взаємного впливу [4].

– Складність керування та моніторингу: ефективне управління ЛЕС та мікромережами протребує розгортання сучасних систем моніторингу та складних систем керування для координації, оптимізації та забезпечення стабільності [5, 9].

Отже, проблематика гармонічних спотворень та управління реактивною потужністю є невід'ємною частиною забезпечення якості електропостачання в сучасних СЕП. Зростання частки РГ та розвиток ЛЕС і мікромереж висувають нові, більш жорсткі вимоги до параметрів ЯЕ та потребують комплексного підходу до їх аналізу, моніторингу та компенсації для забезпечення надійної, ефективної та сталої роботи енергетичних систем майбутнього.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз експериментально отриманих результатів вимірювання якості електроенергії на промисловому об'єкті та розробка силового активного фільтру для покращення якості електричної енергії.

Викладення основного матеріалу дослідження

Теоретичні положення щодо негативного впливу гармонічних спотворень на роботу електричних мереж та обладнання знаходять своє підтвердження у результатах практичних вимірювань на реальних об'єктах. Як приклад, розглянемо дані аналізу якості електричної енергії, проведеного в ході експериментальних досліджень на комплектній трансформаторній підстанції (КТП 24) ТОВ «МОДУЛЬ – УКРАЇНА», що живить прокатний стан – потужне промислове навантаження з вираженим нелінійним характером споживання електроенергії. Вимірювання проводилися в період з 27.08.2024 по 28.08.2024 за допомогою приладу Pure BlackBox (Elspec).

Статистичні дані за весь період вимірювань показали, що середні значення сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень фазної напруги (THDU) становили близько 7,21–7,29 %, при цьому максимальні значення досягали 21,52–23,20 %. Це вже вказує на періодичне перевищення гранично допустимих значень, встановлених стандартом ДСТУ EN 50160 (який зазвичай обмежує THDU на рівні 8 % для низьковольтних мереж).

На реєстрограмі гармонічних спотворень лінійної напруги THDU видно, що середні значення THDU для міжфазних напруг часто перевищували 8 % і сягали 12 % та більше під час активної роботи прокатного стану (рис. 1). Максимальні ж значення фіксувалися на рівні понад 20 %.

Рис. 1. Реєстрограма зміни сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень міжфазних напруг

Спектральний аналіз (середні значення амплітуд) гармонійних складових міжфазних напруг (V12, V23, V31) показав, що домінуючою є 5-та гармоніка з амплітудою близько 5,5 % для міжфазних напруг, що характерно для мереж, які живлять напівпровідникові перетворювачі, широко використовувані в приводах прокатних станів (рис. 2).

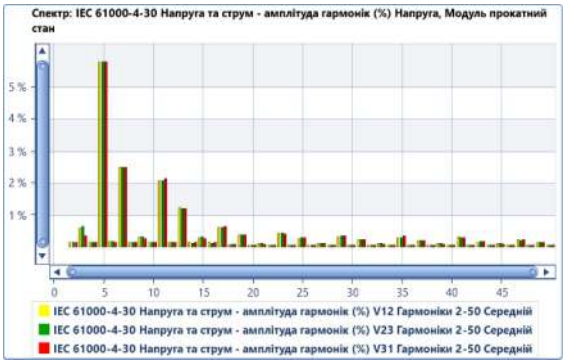

Рис. 2. Спектральний аналіз (середні значення амплітуд) гармонійних складових міжфазних напруг

Ситуація зі спотвореннями струму виявилася ще більш критичною. Середні значення THDI для фазних струмів за весь період вимірювань знаходилися в діапазоні 47,97–56,92 %, а максимальні значення по окремих фазах сягали 87,3–104,5 %. На реєстрограмі гармонічних спотворень фазних струмів THDI видно, що середні значення часто перевищували 50 %, зі значними піками (рис. 3).

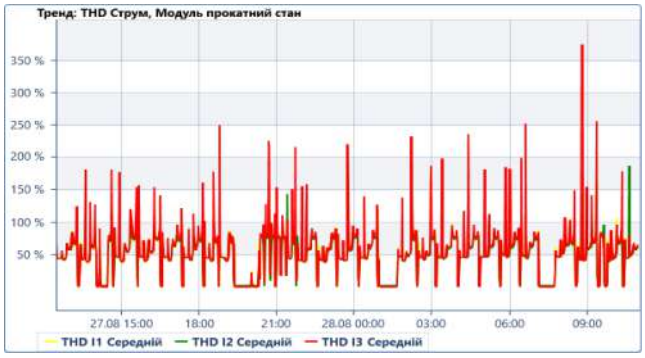

Рис. 3. Реєстрограма зміни сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень струмів

Спектральний аналіз струму (середні значення) виявив значне домінування 5-ї гармоніки (близько 40 % амплітуди) та суттєвий внесок 7-ї, 11-ї та 13-ї гармонік (рис. 4). Такі високі рівні спотворень струму є типовими для потужних нелінійних навантажень, якими є прокатні стани, і призводять до значних додаткових втрат в елементах

мережі (трансформаторах, кабелях), перегріву обладнання, підвищеного електромагнітного впливу на суміжні системи та потенційних збоїв у роботі чутливого обладнання.

Рис. 4. Спектральний аналіз (середні значення амплітуд) гармонійних складових струмів

За результатами вимірювань та аналізу статистичних даних, значення показників якості електроенергії, зокрема рівень гармонійних складових по струму та напрузі, перевищують гранично допустимі значення згідно ДСТУ EN 50160:2023 та ДСТУ IEC 61000-3-4:2009. Осцилограми напруг та струмів показано на рис. 5.

Високі середні значення THDU (12–13 % по напрузі при навантаженні) та THDI (45–90 % по струму при навантаженні) унеможливлюють використання стандартних або навіть посилених конденсаторних установок для компенсації реактивної потужності. Згідно з технічними характеристиками, стандартні конденсатори допускають THDU = 2 % і THDI = 20 %, посилені – THDU = 3 % і THDI = 30 %, а конденсатори з антирезонансними дроселями – THDU = 6 %. Перевищення цих рівнів може викликати перевантаження дроселів та конденсаторів, що призведе до їх виходу з ладу та пошкодження іншого обладнання.

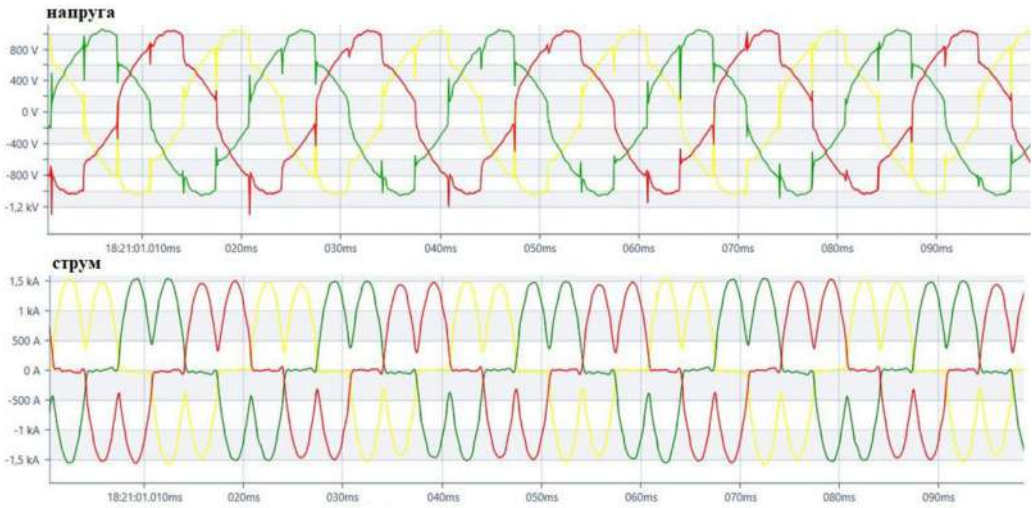

Рис. 5. Осцилограми струму та напруги

Методи фільтрації гармонік зазвичай використовуються для зменшення коефіцієнта гармонічних спотворень струму, а фільтри, засновані на цих методах, класифікуються на три основні категорії: пасивні фільтри, активні фільтри, гібридні фільтри.

Традиційним методом зменшення гармонік є метод пасивної фільтрації. Основний принцип якої полягає в запобіганні протіканню струмів вищих гармонік через енергосистему шляхом. Однак вони мають кілька суттєвих недоліків. Опір системи живлення впливає на характеристики компенсації фільтра.

Основний принцип активного фільтра полягає в точному введенні в систему гармонік напруги/струму з однаковою величиною та протилежним знаком, щоб вони компенсували одна одну, і в лінії електропередач отримують синусоїдну форму напруги/струму. Активні фільтри також менші за фізичними розмірами і, на відміну від традиційних пасивних фільтрів, мають додаткові функції до фільтрації гармонік.

Хоча активні фільтри мають кращі характеристики фільтрації та різноманітність функціональних можливостей, їх застосування зазвичай обмежене кількома МВт рівнями і зазвичай нижче 1 МВт. Для вищих номінальних

потужностей вони зазвичай страждають від високої вартості через великі номінальні значення потужності та експлуатаційні втрати.

Гібридні фільтри поєднують пасивні та активні фільтри в різних конфігураціях, щоб знизити початкову вартість та підвищити ефективність структури фільтра. Основний принцип гібридної фільтрації полягає в тому що пасивна частина налаштовується на компенсацію однієї або декілька найбільших гармонік. Активна частина фільтрує інші вищі гармоніки. Однак функціональність гібридних фільтрів обмежена порівняно з чисто активними фільтрами, і вони вимагають більших інженерних розрахунків та налаштувань.

Вибір фільтрувального рішення для зменшення гармонік залежить переважно від вартості, і призводить до різних типів фільтрів для різних рівнів потужності в кВА. Для прокатного стану, який розглядається, обраний гібридний фільтр. Силова частина гібридного силового активного фільтру (САФ) включає в себе інвертор на базі IGBT транзисторів, що живиться на стороні постійного струму від накопичувальних конденсаторів і вихідний індуктивний фільтр та пасивну частину, налаштованою на 5 та 7 гармоніки. (рис. 6).

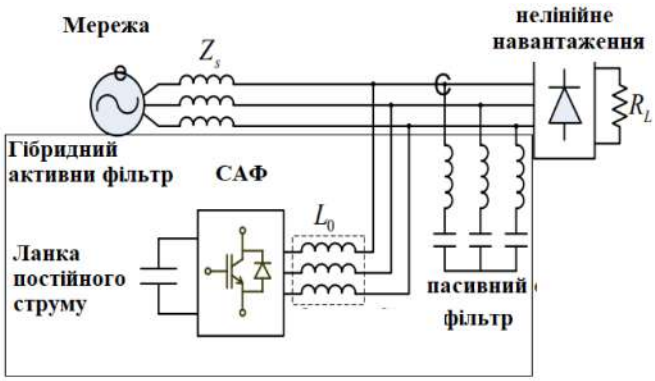

Рис. 6. Силова схема активного фільтру

Активний фільтр може бути встановлений в будь-якій точці розподільної мережі і здатний компенсувати вищі гармоніки від однієї або декількох нелінійних навантажень.

Для ефективної роботи паралельного активного фільтру, його система керування повинна реалізовувати наступні алгоритми:

– *Алгоритм виділення гармонік навантаження*. Основна функція цього алгоритму полягає у вилученні гармонічної інформації з енергосистеми, забрудненої гармоніками, та застосуванні отриманої інформації для формування опорного сигналу струму $i_{саф}$. У цьому аспекті спотворений сигнал струму навантаження $i_н$ обробляється таким чином, що дозволяє розділити його гармонічні елементи $i_{вг}$ та фундаментальні елементи і i_1.

Струм нелінійного навантаження містить основну (i_1) і вищі ($i_{вг}$) гармоніки:

$$i_н = i_1 + i_{вг}, \quad i_{вг} = \sum_{n\geq 2} i_n. \tag{1}$$

Згідно алгоритму струм активного фільтру містить протифазні струму навантаження вищі гармоніки представлені виразом.

$$i_{саф} = -\sum_{n\geq 2} i_n. \tag{2}$$

Якість опорного сигналу струму головним чином визначатиме, наскільки добре працюватиме САФ.

В результаті струм, споживаний від джерела практично синусоїдальний, оскільки містить тільки першу гармоніку:

$$i_{мережа} = i_н + i_{саф} = i_1. \tag{3}$$

– *Алгоритм синхронізації*, функція якого полягає у відстеженні кутового положення сигналу напруги джерела та подальшому генеруванні кута фазової синхронізації для узгодження фази згенерованого i_1 з фазою мережі.

– *Алгоритм регулювання напруги конденсатора постійного кола*. Основна функція якого полягає в оцінці величини струму зарядки постійного кола, необхідного САФ для постійної підтримки напруги постійного кола на бажаному рівні. Цей алгоритм постійно порівнює виміряне значення напруги із заданим значенням та мінімізує результуючу похибку, використовуючи ПІ – регулятор.

– *Алгоритм керування вхідним струмом*. Основна функція полягає у формуванні імпульсів перемикання транзисторів, в даному досліджені використовувати релейне керування для підвищення швидкодії.

Всі ці алгоритми керування пов’язані один з одним та функціонують як загальна система керування. Розроблено систему керування гібридним активним паралельним фільтром та проведено аналіз режимів роботи. В якості

навантаження представлена модель некерованого трифазного випрямляча, яка імітує навантаження прокатного стану.

На рис. 7 представлено результати цифрового моделювання, продемонстрована працездатність САФ та можливість компенсації вищих гармонік, струм споживаний з мережі синусоїдний та має THD меньше 1 % (рис. 8, *б*), при цьому струм навантаження має THD близько 30 % (рис. 8, *а*).

Наведене дослідження з реальними вимірюваннями наочно демонструє масштаб проблеми гармонічних спотворень на промислових підприємствах з потужними нелінійними навантаженнями. Проведений аналіз підкреслює не тільки прямі негативні наслідки високих рівнів гармонік, такі як додаткові втрати та прискорене старіння обладнання, але й опосередковані, як, наприклад, обмеження у виборі та експлуатації засобів компенсації реактивної потужності. Це, в свою чергу, підтверджує актуальність розробки та впровадження ефективних методів та засобів фільтрації гармонік та покращення якості електроенергії в сучасних СЕП.

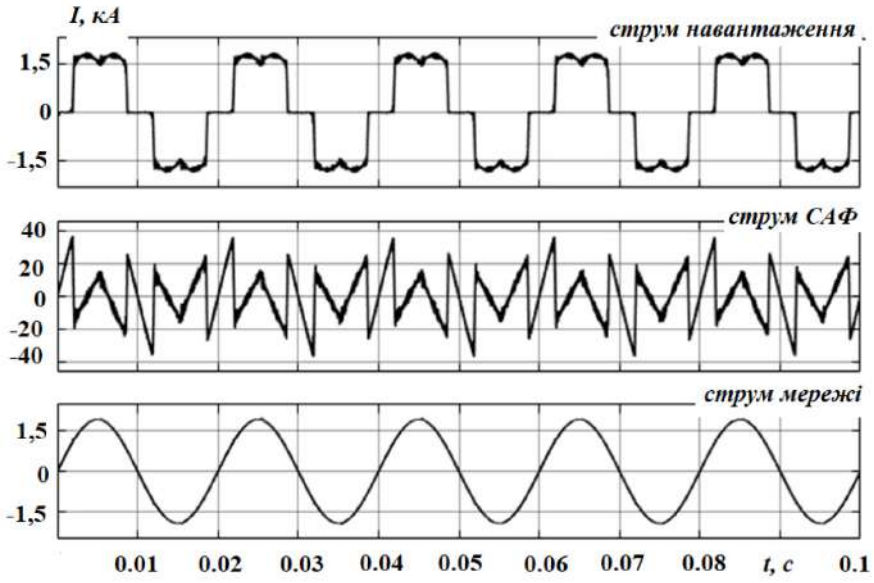

Рис. 7. Результати моделювання

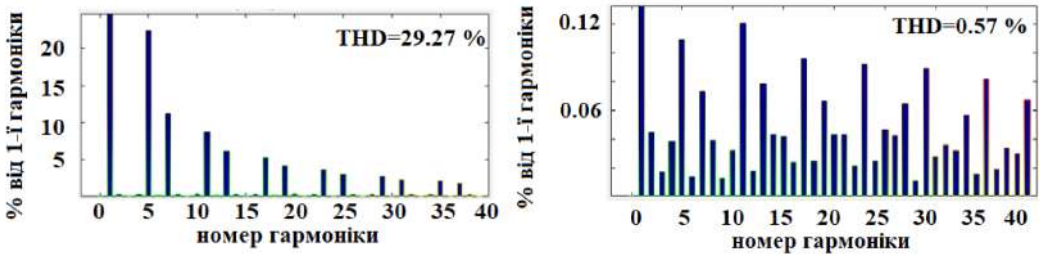

Рис. 8. Спектри струму навантаження (а) та струму мережі (б)

Висновки

Розглянуто проблеми якості електричної енергії в сучасних СЕП, проведені експериментальні дослідження, та за результатами вимірювань та аналізу статистичних даних, значення показників якості електроенергії, зокрема рівень гармонійних складових по струму та напрузі, перевищують гранично допустимі значення згідно ДСТУ EN 50160:2023 та ДСТУ IEC 61000-3-4:2009.

Визначено що високі середні значення THDU (12–13 % по напрузі при навантаженні) та THDI (45–90 % по струму при навантаженні) унеможливлюють використання стандартних або навіть посилених конденсаторних установок для компенсації реактивної потужності. Згідно з технічними характеристиками, стандартні конденсатори допускають THDU = 2 % і THDI = 20 %, посилені – THDU = 3 % і THDI = 30 %, а конденсатори з антирезонансними дроселями – THDU = 6 %. Перевищення цих рівнів може викликати перевантаження дроселів та конденсаторів, що призведе до їх виходу з ладу та пошкодження іншого обладнання.

Запропоновано використання силових активних фільтрів для компенсації реактивної потужності та активної фільтрації гармонік, що дозволить знизити THDI до 1 %.

Список використаної літератури

1. Кузнєцов М. П., Лисенко О. Забезпечення балансу енергії в локальній системі з відновлюваною генерацією. *Відновлювана енергетика*. 2023. №1(72). С. 6–18. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72)6-18

2. Hossain E., Tür M. R., Padmanaban S., Ay S., Khan I. Analysis and Mitigation of Power Quality Issues in Distributed Generation Systems Using Custom Power Devices. *IEEE Access*. 2018., Vol. 6. P. 16816–16833. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2814981

3. Будько В. І. Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів Дис. д-ра техн. наук: 05.14.08. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ІВЕ НАН України. Київ, 2019. 302 с.

4. Денисюк С. П., Дерев'янко Д. Г. Оцінювання якості електропостачання у локальних системах з джерелами розосередженої генерації: монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 166 с.

5. A. Blorfan, P. Wira, D. Flieller, G. Sturtzer and J. Mercklé. A three-phase hybrid active power filter with photovoltaic generation and hysteresis current control. *IECON 2011 – 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC, Australia, 2011, pp. 4316–4321, https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6120018

6. Ezhiljenekkha G. B., Marsaline Beno M. Review of Power Quality Issues in Solar and Wind Energy. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 24. P. 2137–2143.

7. Lezhniuk P., Hunko I. Local power system as balancing groups. Scientific practice: modern and classical research methods. *V International Scientific and Practical Conference "SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS"* Boston, USA, December 22, 2023. P. 161–163. https://doi.org/10.36074/logos-22.12.2023.044

8. Денисюк С. П., Бєлоха Г. С., Гілевич К. М., Чернещук І. С. Моніторинг ефективності роботи в локальних електроенергетичних системах. *Праці ІЕД НАН України*. 2024. Вип. 69. С. 46–55. https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.046

9. Hernández-Mayoral E., Madrigal-Martínez M., Mina-Antonio J. D., Iracheta-Cortez R., Enríquez-Santiago J. A., Rodríguez-Rivera O., Martínez-Reyes G., Mendoza-Santos E. A Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(12). 9847. https://doi.org/10.3390/su15129847

10. П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько Керування режимами електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії за умови їх оптимального секціонування. Вінниця : ВНТУ, 2018. 172 с.

11. Дозоренко О. В. Енергоефективна система електропостачання територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів. Дис. д-ра філософії: 141. Кривий Ріг, 2022

12. Binh, Le & Minh Thuyen, Chau. Three-phase hybrid active power filter: an overview. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2025.,Vol. 15. 1361. https://doi.org/10.11591/ijece.v15i2.pp1361-1371

13. Popescu, M.; Bitoleanu, A.; Suru, C.V.; Linca, M.; Alboteanu, L. Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review. *Energies*. 2024, 17, 2867. https://doi.org/10.3390/en17122867

References

1. Kuznetsov M. P., Lysenko O. (2023) Zabezpechennya balansu enerhiyi v lokal'niy systemi z vidnovlyuvanoyu heneratsiyeyu. [Ensuring energy balance in a local system with renewable generation]. *Renewable energy*. Vol. (72). pp. 6–18. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72)6-18. (In Ukrainian).

2. Hossain E., Tür M. R., Padmanaban S., Ay S., Khan I. (2018) Analysis and Mitigation of Power Quality Issues in Distributed Generation Systems Using Custom Power Devices. *IEEE Access*. Vol. 6. pp. 16816–16833. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2814981

3. Budko V. I. (2019) Vykorystannia enerhii soniachnoho vyprominiuvannia ta vitru dlia zariadzhannia elektromobiliv [Using solar radiation and wind energy for charging electric vehicles] (Dr. Tech. Sciences) NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Institute of Electrical and Electronic Engineering of the NAS of Ukraine. Kyiv.

4. Denisyuk S. P., Derevyanko D. G. (2019) Otsiniuvannia yakosti elektropostachannia u lokalnykh systemakh z dzherelamy rozoseredzhenoi heneratsii [Assessment of the quality of electricity supply in local systems with distributed generation sources]: Monograph. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. 166 c. (In Ukrainian).

5. A. Blorfan, P. Wira, D. Flieller, G. Sturtzer and J. Mercklé, (2011) A three-phase hybrid active power filter with photovoltaic generation and hysteresis current control. *IECON 2011 – 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Melbourne, VIC, Australia. pp. 4316–4321, https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6120018

6. Ezhiljenekkha G B, Marsaline Beno M. (2020) Review of Power Quality Issues in Solar and Wind Energy. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 24. pp. 2137–2143.

7. Lezhniuk P., Hunko I. (2023) Local power system as balancing groups. Scientific practice: modern and classical research methods. *V International Scientific and Practical Conference "SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS"* Boston, USA. P. 161–163. https://doi.org/10.36074/logos-22.12.2023.044

8. Denisyuk S. P., Bielokha H. S., Gilevich K. M., Cherneschuk I. S. (2024) Monitorynh efektyvnosti roboty v lokalnykh elektroenerhetychnykh systemakh [Monitoring of work efficiency in local electric power systems]. *Pratsi IED NAN Ukrainy*. Vol. 69. pp. 46–55. https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.046 [In Ukrainian].

9. Hernández-Mayoral E., Madrigal-Martínez M., Mina-Antonio J. D., Iracheta- Cortez R., Enríquez-Santiago J. A., Rodríguez-Rivera O., Martínez-Reyes G., Mendoza-Santos E. A (2023) Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources. *Sustainability*. Vol. 15(12). https://doi.org/10.3390/su15129847

10. P. D. Lezhnyuk, O. E. Rubanenko, I. O. Gunko (2018) Keruvannia rezhymamy elektrychnykh merezh z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii za umovy yikh optymalnoho sektsionuvannia [Control of modes of electric networks with renewable energy sources under the condition of their optimal sectioning] Vinnytsia : VNTU. P. 172. (In Ukrainian).

11. Dozorenko O. V. (2022) Enerhoefektyvna systema elektropostachannia terytorialno viddalenykh spozhyvachiv elektrychnoi enerhii hirnycho-zbahachuvalnykh kombinativ [Energy-efficient power supply system for territorially remote consumers of electricity in mining and processing plants] (PhD Thesis), Kryvyi Rih.

12. Binh, Le & Minh Thuyen, Chau. (2025). Three-phase hybrid active power filter: an overview. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 15. 1361. https://doi.org/10.11591/ijece.v15i2.pp1361-1371

13. Popescu, M.; Bitoleanu, A.; Suru, C. V.; Linca, M.; Alboteanu, L. (2013) Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review. *Energies*. Vol. 17. 2867. https://doi.org/10.3390/en17122867

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025