

УДК 620.92

ОГЛЯД КОНФІГУРАЦІЙ І СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖАМИ НА ОСНОВІ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій,
аспіранти Д. А. Гордієнко, А. В. Синявський, Д. А. Шелест

REVIEW OF CONFIGURATIONS AND STRATEGIES OF CONTROL OF MICRONETWORKS BASED ON POWER ELECTRONICS

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate D. A. Hordiienko,
postgraduate A. V. Syniavskyi, postgraduate D. A. Shelest

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-852.204.2023.284141>



Анотація. У статті наведено огляд конфігурацій мікромережі, параметрів, структур та методів керування для установок розподільних енергетичних ресурсів з електронним з'єднанням, що відрізняється більшою гнучкістю та надійністю. Розглянуто параметри в структурах блоків розподільних енергетичних ресурсів і топології силової електроніки. Описано схеми керування електронно з'єднаних агрегатів розподільних енергетичних ресурсів при різних режимах експлуатації. Представлено методи керування миттєвою активною і реактивною потужністю для мікромереж змінного струму.

Ключові слова: мікромережа, перетворювач електроенергії, розподілений енергетичний ресурс, розподілення навантаження, система керування.

Abstract. The growing implementation of distributed energy resources requires the development of the architecture of traditional electricity systems. With the growing deployment of distributed energy resources, especially for small combined heat and power plants and renewable energy sources based on distributed generation units, the architecture of the future power supply system must be transformed in order to carry out more complex operations. The article provides an overview of micronetwork configurations with greater flexibility and reliability, parameters, structures, and control methods for electronically connected distributed energy resource installations. Of the configurations considered, DC micronetwork and high-frequency AC

micronetwork have shown better performance for some special applications, such as low-voltage and geographically small networks. The corresponding parameters in the structures of the blocks of distribution energy resources and the topology of power electronics are considered. With the increase in the nominal capacity of distribution power resource units, multilevel converters provide effective ways to reduce cost and increase efficiency. Methods of controlling electronically connected aggregates of distribution energy resources under different operating modes are described. Under the influence of load and line impedance characteristics, different strategies of load distribution among units of distribution energy resources, control of instantaneous active and reactive power are compared. A multi-level hierarchical control architecture, micronetwork power and energy management is described. A comparison of control architectures based on centralized and distributed technology indicates that the modern micronetwork must become smart and flexible with the help of telecommunication infrastructures and the next generation of information technology.

Keywords: *micronetwork, electricity converter, distributed energy resource, load distribution, control system.*

Вступ. Схильний до лібералізації ринок електроенергії, наявність екологічних проблем щодо викидів парникових газів, стрімкий розвиток транспортних технологій, не надто висока енергоефективність джерел енергії – все це є найважливішими рушійними силами, спрямованими на поширення розподільних енергетичних ресурсів (РЕР) в системах електропостачання. Зі зростанням процесу розгортання РЕР, особливо щодо невеликих комбінованих теплоелектростанцій і відновлюваних джерел енергії на основі блоків розподіленої генерації, системи розподілення більше не можуть розглядатися як пасивні мережі. Вся архітектура майбутньої системи електропостачання має бути трансформована з метою здійснювати більш складні операції. Як наслідок, передбачаються можливі концептуальні моделі мікромережі [1, 2].

Концепція мікромереж з'єднує кількох клієнтів з декількома блоками РЕР, включаючи блоки розподіленої генерації. У контексті мікромережі, клієнти та блоки РЕР можуть не тільки працювати паралельно з основною мережею, але і вимагати також плавного переходу до навмисного або ненавмисного ізольованого режиму під час аномальних умов роботи мережі. На відміну від звичайних систем розподілення, така мережева структура має набагато більше гнучкості в керуванні

блоками РЕР, а отже, і потенційні переваги кращої якості електроенергії, більш надійної електрики та диспетчеризації, а також вищої потужності щодо ефективності постачання завдяки оптимальному розташуванню мікротеплоелектростанцій [3, 4].

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих в роботах [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження мікромереж і низка всесвітніх демонстраційних проєктів, таких як мікромережа CERTS у США, мікромережа Hydro-Quebec у Канаді, мікромережа NEDO в Японії та мікромережа EU в Європі продемонстрували проблеми та рішення в галузі мікромережі [7, 8]. Останнім часом технологія силової електроніки швидко розвивалася завдяки швидкій еволюції силових напівпровідників, які покращують перехідну характеристику силового каскаду, а цифрові сигнальні процесори можуть скоротити час обробки та збільшити складність алгоритмів керування. Широке використання силових електронних перетворювачів в блоках РЕР не тільки забезпечує економічно ефективні та гнучкі інтерфейси РЕР до мереж, але також дає змогу мікромережам ефективно контролювати та керувати потоками електроенергії [9, 10].

У мікромережі CERTS система «plug-and-play» вимагає, щоб усі блоки розподіленої генерації мали уніфіковану динамічну продуктивність незалежно від типу основного джерела енергії [11, 12]. Це означає, що модуль зберігання енергії з двонаправленим перетворювачем має бути включений у кожен блок розподіленої генерації.

Перетворювачі Z-джерела і закріплені нейтральною точкою багаторівневі перетворювачі пропонують альтернативний підхід, якого слід уникати лінійно-частотним трансформаторам [13, 14]. Безтрансформаторний перетворювач все ще є новою топологією для фотоелектричних систем, що забезпечує переваги високої ефективності, малі розміри і вагу, а також знижену вартість. Тим не менш, додатковий струм витоку з'являється через гальванічне з'єднання мережі та джерела постійного струму.

Тенденція системи відновлюваної енергетики має збільшити номінальну потужність (до кількох мегават). Щоб зменшити вартість і покращити ККД систем перетворення електроенергії, багаторівневий перетворювач пропонує вигідний варіант для високої потужності блоків PEP з електронним з'єднанням. Крім закріпленої нейтральної точки і каскаду H-bridge багаторівневі перетворювачі, модульні багаторівневі конвертери також є перспективними топологіями [15, 16].

Характеристики навантажень і блоків PEP визначають стабільність частоти та напруги в мікромережах [17, 18]. Хоча ряд схем контролю було запропоновано для паралельної роботи безперебійного живлення інверторів, їх застосування для розподілення навантаження у мікромережах слід додатково вивчати.

Отже, питання подальшого покращення енергоефективності електричних мікромереж є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є проведення

огляду конфігурацій і стратегії керування мікромережами на основі силової електроніки, що дасть змогу розробляти нові конфігурації мікромереж та робочі сценарії для деяких конкретних застосувань. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– розглянути конфігурації мікромережі щодо форми передачі та розподілення електроенергії;

– дослідити різні структури силової електроніки інтерфейсних блоків розподільних енергетичних ресурсів в мікромережі змінного струму;

– проаналізувати схеми керування установками розподільних енергетичних ресурсів;

– представити методи керування миттєвою активною і реактивною потужністю для мікромереж змінного струму.

Основна частина дослідження. Конфігурації мікромереж. Загальну конфігурацію силової електроніки на основі мікромереж наведено на рис. 1. Зазвичай мікромережа складається зі статичного перемикача, розподілених критичних та некритичних навантажень, кількох блоків PEP з різними інтерфейсами силової електроніки, пристроїв захисту, а також приладів вимірювання, контролю і блоків керування.

Мікромережі поділяються на три категорії залежно від застосування [19]:

- комунальні мікромережі;
- промислові та комерційні мікромережі;
- віддалені мікромережі.

Однак останні досягнення в силовій електроніці та системи FACTS пропонують більше можливостей для конфігурації мікромережі з різними вимогами замовника.

Ще одна класифікація конфігурацій мікромережі може бути здійснена відповідно до способу, який використовується для передачі та розповсюдження електроенергії мікромережами:

– мікромережі постійного струму;
– мікромережі високочастотного змінного струму;

– мікромережі лінійно-частотного змінного струму;
– гібридні мікромережі постійного та змінного струму.

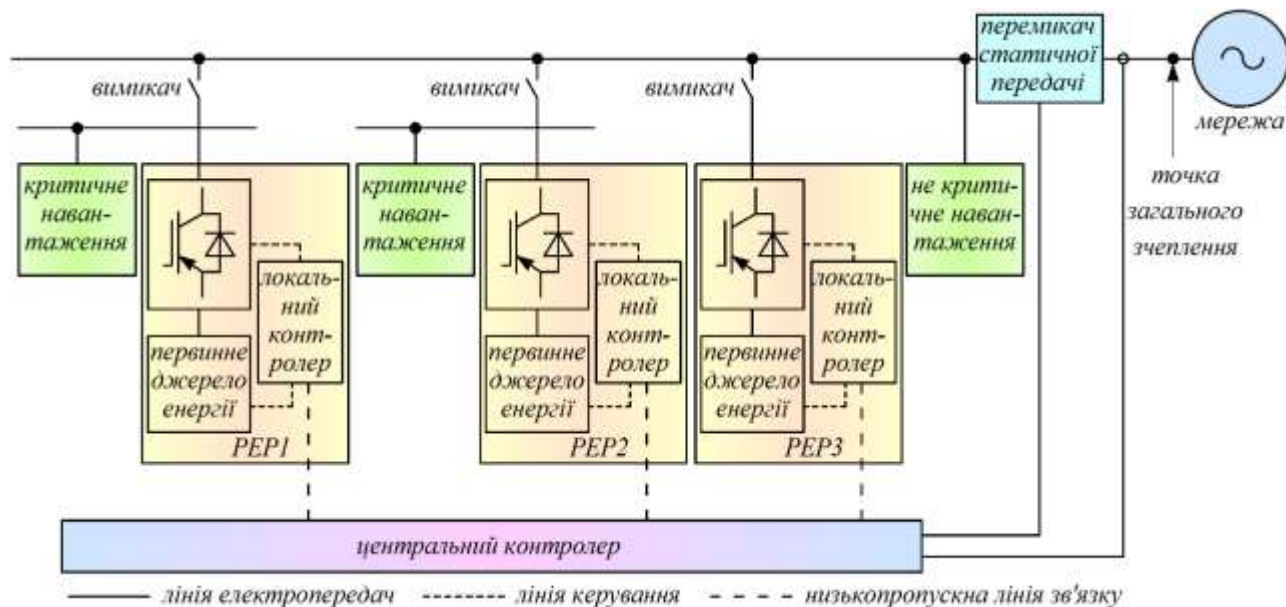


Рис. 1. Загальна конфігурація мікромережі на основі силової електроніки

Структури блоків PER з електронним зв'язком. Оскільки основні джерела енергії можуть виробляти постійну або змінну напругу, загальна структура PER з електронним зв'язанням поділяється на дві категорії. Для систем генерації вітрової турбіни, двигунів внутрішнього згорання і мікротурбін вихідною є змінна напруга, тоді як фотоелектричні системи, системи живлення на паливних елементах і системи акумуляторів виробляють постійну напругу. Вихідні напруги від енергоресурсів перетворюються за допомогою перетворювача силової електроніки до напруг, сумісних з мікромережею. Звідси тип вихідної напруги від основних джерел енергії визначає топології інтерфейсів силової електроніки. Крім того, очікуваний сценарій роботи мікромережі також накладає обмеження при виборі відповідної потужності та топології [20, 21].

На рис. 2 наведено систему накопичення енергії з вітровою турбіною, інтегровану з системою накопичення енергії батареєю. Двонаправлений перетворювач керує функціонуванням накопичувального агрегату на основі динаміки первинного джерела енергії. Використання накопичувальних елементів у колі постійного струму дає змогу покращити можливості проходження низької напруги.

Система керування інвертором від'єднана від випрямляча на стороні генератора. Разом із функціями для інвертора можна інтегрувати віртуальні моменти інерції. Отже, структури блоків PER з електронними зв'язками є не тільки визначальними типами основних джерел енергії, але також залежать від вимог до навантаження, структур мікромереж і пов'язаними з ними операційними сценаріями [22, 23].

На рис. 3 наведено базову конфігурацію одноступеневої системи перетворення електроенергії для фотоелектричної системи. Лінійно-частотний трансформатор зазвичай інтегрується в систему, коли необхідно

гальванічно розв'язати або забезпечити високий коефіцієнт перетворення напруги. Він має найпростішу структуру, на відміну від громіздкого та дорогого лінійного частотного трансформатора.

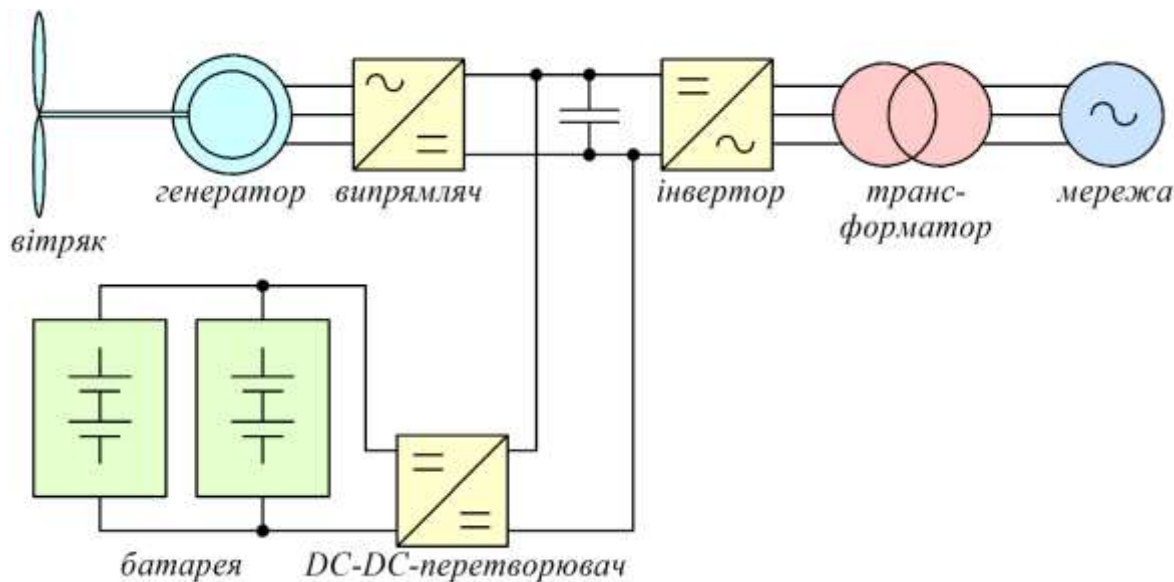


Рис. 2. Система вітрової турбіни з системою накопичення енергії батареєю

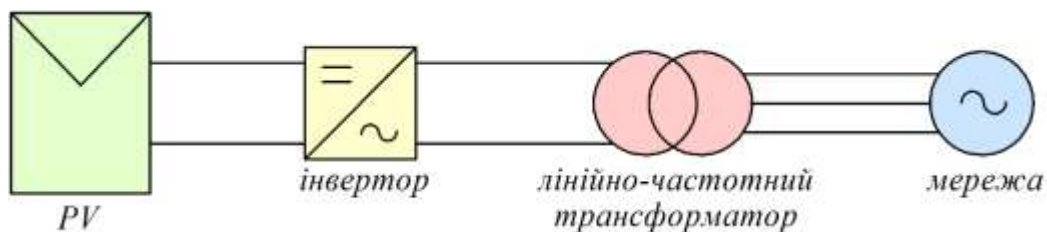


Рис. 3. Система перетворення електроенергії для фотоелектричної системи

Двоступеневі системи перетворення потужності є найпоширенішою конфігурацією для всіх електронно пов'язаних блоків PER [24, 25]. На рис. 4 наведено дві типові структури двоступеневого перетворення електроенергії: система для фотоелектричних систем (PV) та система з паливним елементом (FC). Зазвичай

двоступенева система перетворення електроенергії складається з DC-DC-перетворювача для джерел енергії з вихідною напругою постійного струму, або AC-DC-перетворювача для джерел енергії з вихідною напругою змінного струму, а також із підключеним до мережі DC-AC-перетворювачем.

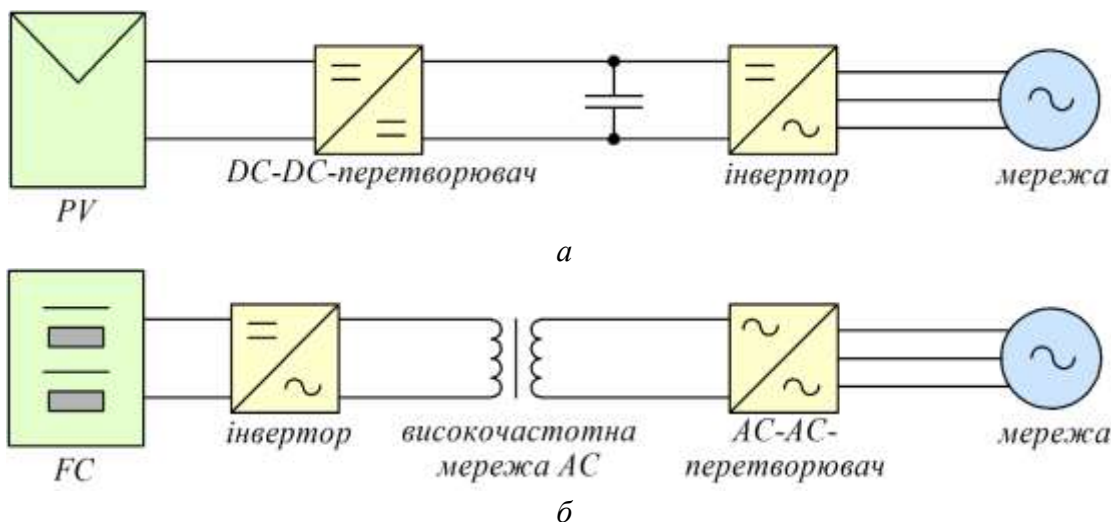


Рис. 4. Структури двоступеневих систем перетворення електроенергії для фотоелектричної системи (а) і системи з паливним елементом (б)

На рис. 4, а замість низькочастотного трансформатора в одноступеневій системі перетворення електроенергії використовується DC-DC-перетворювач для ізоляції та підвищення напруги. Іншою альтернативною топологією без низькочастотного трансформатора є високочастотний перетворювач лінії змінного струму, як наведено на рис. 4, б.

Методи керування блоками PEP з електронним зв'язком. Методи контролю для установок PEP розроблено на основі можливих умов експлуатації та бажаних функцій [26, 27]. Загальну систему керування для блоку PEP з електронним зв'язком у мікромережі змінного струму, де блоки PEP можуть працювати з електронним зв'язком як мережеутворювальні, мережеживильні та мережеопорні одиниці, наведено на рис. 5.

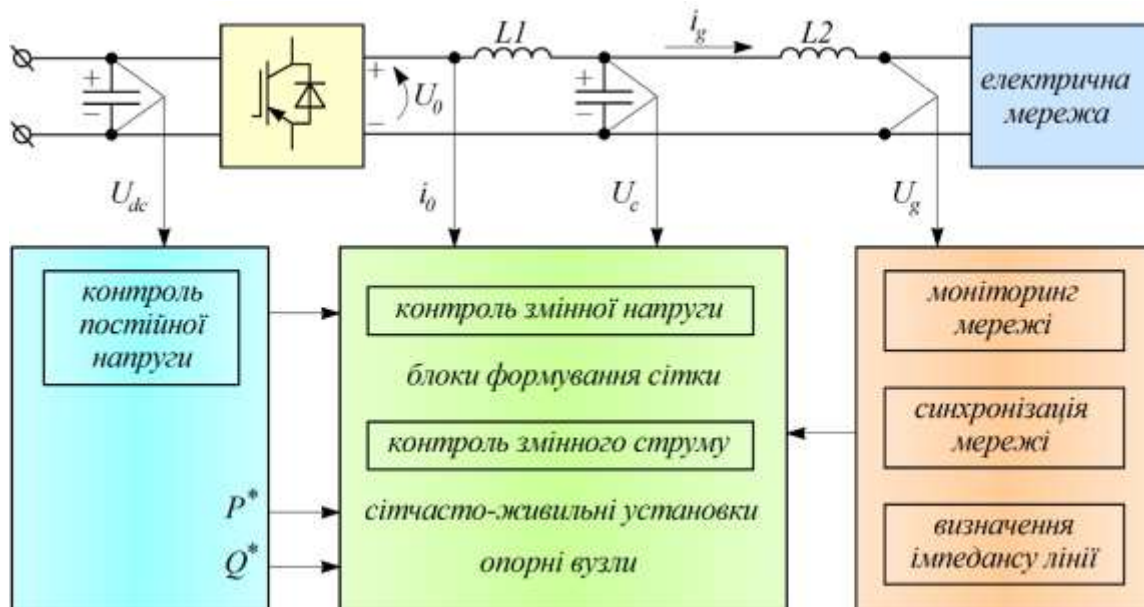


Рис. 5. Система керування блоком PEP з електронним зв'язком всередині

Блоки формування мережі регулюють напругу та частоту системи за рахунок збалансування генеруючої потужності та потреб у навантаженні, коли мікромережа працює в ізольованому режимі [28]. Проте в такому режимі роботи є відхилення опорної напруги та частоти від основної мережі, блоки формування змінюються, щоб працювати як джерело струму. Отже, методи керування для блоків формування мережі мають забезпечувати плавність перехідних процесів у режимі роботи мікромережі.

Блоки живлення мережі регулюють наявні активні та реактивні навантаження з метою дотримання вимог до відправки електроенергії і для компенсації коливань навантаження та потоку потужності у фідері. Методи контролю можна класифікувати на три категорії залежно від використання регуляторів струму: керування струмом, пряме керування потужністю та керування змінною напругою.

Метод керування струмом можна представити як метод керування, орієнтований на напругу і метод віртуального керування потоком. Замість синхронізації з напругою мережі, метод віртуального керування потоком робить систему керування синхронізованою на інтервалі напруги, яку можна розглядати як відфільтровану напругу мережі. Метод прямого керування потужністю регулює миттєві активні і реактивні потужності. Через відсутність внутрішнього контуру регулювання струму в схемі прямого керування потужністю, перетворення координат та роз'єднання між активним і реактивним силовим компонентом не є необхідним. Опорні блоки мережі керуються не тільки, щоб отримати максимальну активну потужність з їхнього первинного джерела енергії, а також для надання допоміжних послуг для покращення якості.

Керування мікромережею та живленням. Керування мікромережею та живленням включає кілька проблем, які відрізняються від розподільних мереж

низької напруги блоків PEP. Традиційні системи живлення зазвичай мають кінетичну енергію, що зберігається в роторах генератора, і вони розглядаються як необхідні для стабільності систем [29, 30]. В мікромережі на основі електроніки, навпаки, переважають блоки PEP з електронним з'єднанням, за своєю суттю без інерції, але з можливістю більш гнучкої роботи. Ще одна проблема пов'язана з резистивним характером в розподільних мережах низької напруги, який призводить до зв'язку між активною потужністю та системною напругою, і, як наслідок, ускладнює керування потоками електроенергії та профілем напруги мікромережі. Крім того, очікується, що вся енергетична система в контексті мікромережі буде інтерактивною, розумною і розподіленою, тому необхідні передові архітектури для керування енергоспоживанням. На рис. 6 наведено загальну трирівневу ієрархічну систему керування мікромережею.

Подібно до ієрархічного керування для традиційної системи живлення, ієрархічні системи керування для мікромережі організовані у такий спосіб. Перший рівень контролю має справу з миттєвими балансами активної та реактивної потужності. Другий рівень контролю відновлює напругу та частоту системи відхилення після перехідних процесів і повторно синхронізується з основною мережею. Третій рівень контролю призначено для виконання довгострокових завдань енергоменеджменту. Пропускна спроможність системи контролю поступово знижується з початкового рівня до вищого рівня. Основні відмінності від ієрархій керування великими енергосистемами полягають в методах керування, які використовуються на кожному рівні. Особлива увага приділяється первинним елементам контролю одиниць PEP для миттєвого балансу активної та реактивної потужності, а також архітектурам диспетчерського керування для тривалого терміну енергетичного менеджменту.

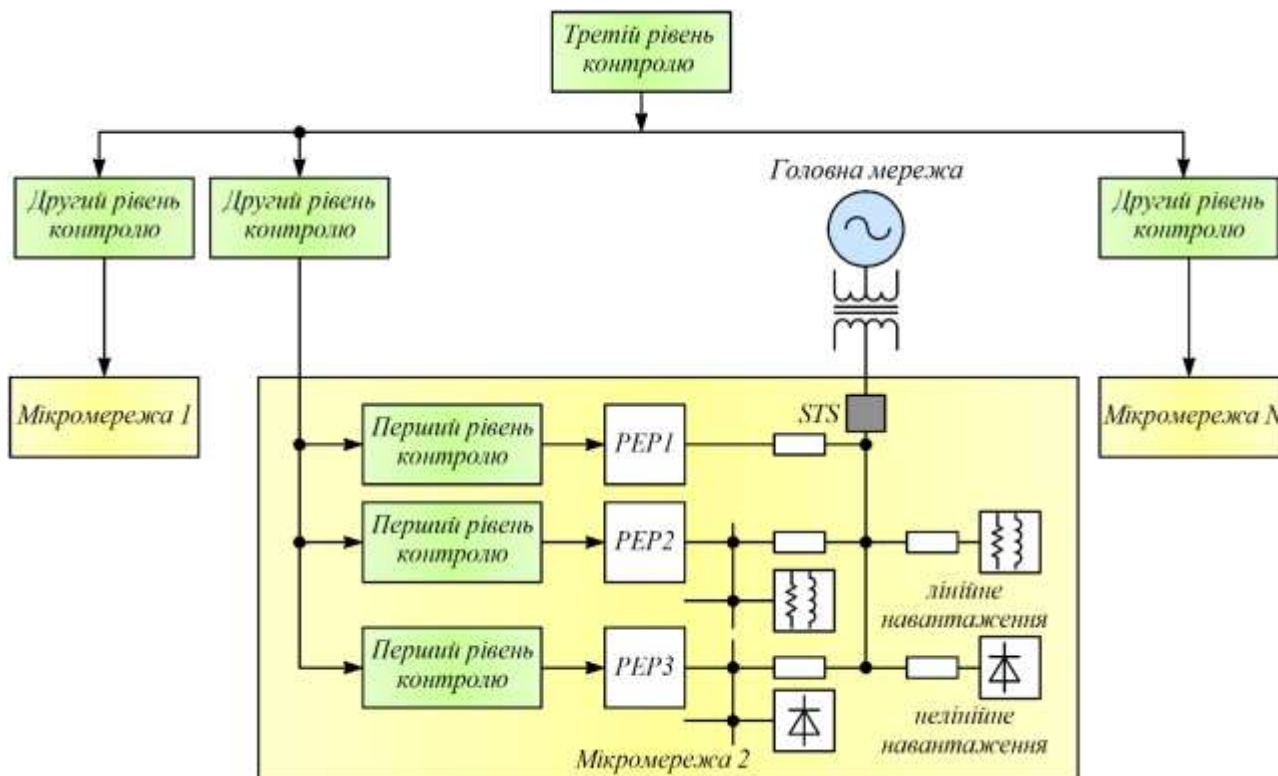


Рис. 6. Архітектура ієрархічної системи керування мікромережею

Характеристики навантаження мають значний вплив на такі характеристики мікромережі, як перехідна стабільність і стабільність напруги. Важливо добре розуміти характеристики навантаження та виконувати стратегії керування мікромережею. Моделювання навантаження здійснюється за рахунок

побудови фізичних моделей типових навантажень.

Відомо ряд моделей навантаження для аналізу стабільності системи. Такі моделі навантаження загалом класифікуються як статичні та динамічні моделі. Характеристики напруги статичного навантаження можна задати як

$$\begin{cases} P = P_n \cdot \left[a_p \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + b_p \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + C_p \right]; \\ Q = Q_n \cdot \left[a_q \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + b_q \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + C_q \right], \end{cases} \quad (1)$$

де U_n – номінальна напруга;
 P_n і Q_n – активна і реактивна потужності навантаження при номінальній напрузі;

$a_p, b_p, C_p, a_q, b_q, C_q$ – коефіцієнти, що являють пропорцію різних видів навантажень.

Коефіцієнти мають відповідати таким умовам:

$$\begin{cases} a_p + b_p + C_p = 1; \\ a_q + b_q + C_q = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Частотну залежність характеристики навантаження також можна виразити за допомогою поліномів:

$$\begin{cases} P = P_n \cdot \left[a_p \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + b_p \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + C_p \right] \cdot (1 + K_{pf} \cdot \Delta f); \\ Q = Q_n \cdot \left[a_q \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + b_q \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + C_q \right] \cdot (1 + K_{qf} \cdot \Delta f), \end{cases} \quad (3)$$

де Δf – відхилення частоти від номінальної частоти f_0 .

Виходячи з виразів (1) і (3), вплив статичного навантаження напруги і частотних характеристик на продуктивність системи першого рівня контролю падіння показує, що залежності напруги і частоти навантажень вимагають, щоб блоки РЕР приймали характеристики спаду частоти активної потужності і реактивної напруги.

Миттєві баланси активної та реактивної потужностей в мікромережах переважно гарантуються миттєвим відстеженням за навантаженням та розподіленням навантаження між блоками РЕР. Оскільки тут основна увага приділяється основним стратегіям контролю для блоків РЕР, алгоритми скидання навантаження для миттєвого відстеження за навантаженням не мають бути залученими.

При використанні критичних комунікаційних зв'язків виділяють дві групи стратегій, доступних для миттєвого розподілення навантаження в мікромережах, включаючи методи розподілення активного навантаження (струму або потужності) і методи контролю падіння.

Метод розподілення активного навантаження (струму або потужності) включає підхід «головний-підлеглий» і керування обмеженням струму. У цьому

виді стратегій керування блок РЕР працює як мережоутворюючий (головний) блок, який регулює напругу системи і частоту, тоді як решта блоків РЕР (підлеглих) отримують поточні посилення через зв'язок з будь-якого провідного пристрою або попередньо веденого пристрою. Будь-який блок РЕР в мікромережах може бути головним. Використання критичних каналів зв'язку може добре працювати при паралельній роботі інверторів в межах одного обладнання, але накладає кілька проблем для розподілення навантаження в мікромережі. Найбільш очевидним недоліком є обмеженість смуги пропускання сигналу зв'язку, який призводить до того, що головний пристрій сприймає більшість нелінійних навантажень у мікромережі. Отже, спотворені потужності часто компенсуються локально самим блоком РЕР без використання каналів зв'язку в удосконаленому методі активного розподілення навантаження.

Метод контролю падіння заснований на відомій кореляції між частотою і потоками активної потужності в традиційних енергосистемах. За аналогією для генераторів змінного струму частота одиниці РЕР зменшується, коли додаткове навантаження збільшується, а також збільшується, коли є надлишок активної потужності в мікромережах. Замість використання

критичних каналів зв'язку, методи контролю падіння дають змогу блокам РЕР автоматично розподіляти загальне навантаження за рахунок вимірювання локально доступних змінних (вихідної напруги та струму), та забезпечує тим самим більш високу надійність і гнучкість.

Зазвичай методи контролю падіння можна додатково розділити на два типи, тобто «головний-підлеглий» і «мульти-головний» контроль падіння. Керування падінням «головний-підлеглий» представляється комбінованим використанням контролю головного-підлеглою і контролю падіння. Це доречно для випадку, якщо один або кілька блоків РЕР виступають у ролі мережоутворювального (головного) блоку, а решта блоків працюють як одиниці живлення мережі (підлегли). З іншого боку, в керуванні «мульти-головний», немає різниці між блоками формування мережі і блоками живлення мережі. Всі блоки РЕР працюють як мережоутворювальні одиниці.

Однак відомо, що існує кілька обмежень на використання звичайного методу контролю падіння $P-\omega$ і $Q-V$ мікромережі через характеристики розподільних ліній і навантажень. Для статичних характеристик мікромереж низький X/R коефіцієнт опору розподільної лінії впливає на точність розподілення навантаження. Крім того, є гармонічні та незбалансовані потужності, які погано компенсуються в появі нелінійних і незбалансованих навантажень. Для динамічної поведінки мікромереж під час вибору характеристик падіння для блоків РЕР необхідно враховувати залежності напруги та частоти навантажень, інакше контролери можуть не забезпечити належний спільний доступ і це призведе до нестабільності.

Щоб пом'якшити вищезазначені недоліки, можна використати вдосконалені варіації на основі характеристик падіння $P-\omega$ і $Q-V$. Перший метод являє нові характеристики спаду між різними частотними компонентами контрольованого

сигналу (змінна напруга) і активною потужністю (P), реактивною потужністю (Q) і потужністю спотворень (D) відповідно.

Отже, необхідно уникати використання характеристики падіння $Q-V$, і ефект імпедансу лінії усувається. Більше того, спотворення потужності, яке є результатом нелінійних і незбалансованих навантажень, компенсуються за допомогою характеристики падіння $D-\omega d$, де ωd – спадаюча компонента частоти, викликана потужністю спотворення. Однак поява високочастотних сигналів обмежує номінальну потужність блоків РЕР і збільшує спотворення напруги на виходах блоків РЕР.

Друга група методів заснована на віртуальному виведенні концепції імпедансу. Ці альтернативи приймають кілька контурів зворотного зв'язку керування, де віртуальний імпеданс емулюється за допомогою прямої петлі струму навантаження. На рис. 7 наведено блок-схему на основі віртуального імпедансу методу контролю падіння.

На відміну від послідовного імпедансу синхронного генератора, який здебільшого є індуктивним, вихідний опір блоків РЕР з електронним зв'язком може бути вибраний довільно, що забезпечує гнучкий спосіб боротьби з впливом лінійного імпедансу та характеристики навантаження. Вихідний опір складається з індуктивності та пропонується паралельне підключення навантаження для точного розподілення нелінійних навантажень. Він розроблений незалежно для представлення поведінки індуктивності навколо основної частоти та резистивного характеру для струмів низьких гармонік. Головним недоліком цього методу є підвищені гармонічні спотворення напруги на клемі блоків установок РЕР.

Можливим є використання схеми резистивної активної фільтрації блоків РЕР з електронним зв'язком для активної компенсації спотворених навантажень. На рис. 8 наведено блок-схему на основі методу резистивної активної фільтрації.

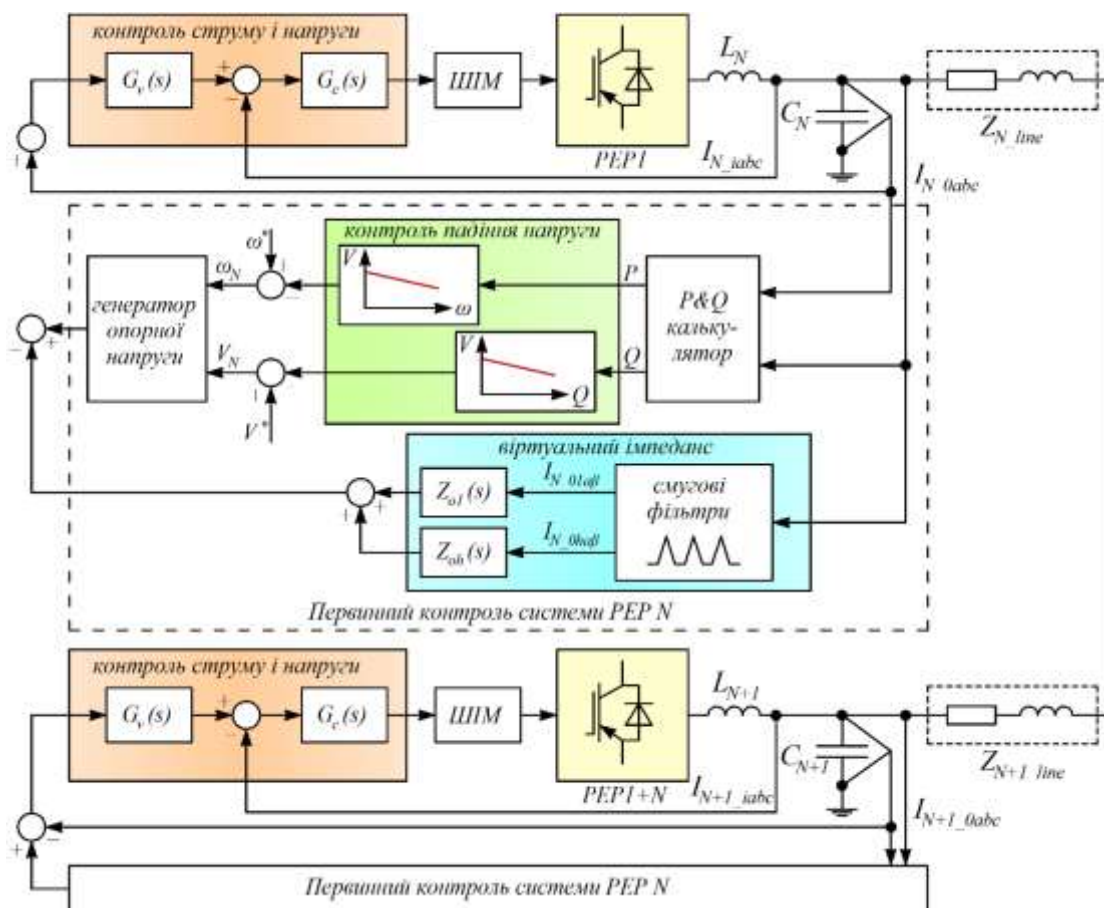


Рис. 7. Блок-схема методу контролю падіння на основі віртуального імпедансу

Порівняно зі схемою віртуального імпедансу, цей метод ефективно гасить гармонічні спотворення напруги на виході блоків PEP, потрібен лише контур керування струмом з високою пропускнуною спроможністю, що спрощує внутрішню напругу та струм контуру керування. Однак продуктивність цього методу погіршується через невідповідність між гармоніками індуктивності і опору розподільної лінії.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– з розглянутих конфігурацій мікромереж кращу ефективність для деяких спеціальних застосувань, таких як низьковольтні і географічно невеликі мережі, мають мікромережі гібридного постійного та змінного струму, оскільки

забезпечують вигідну продуктивність для агрегатів розподільних енергетичних ресурсів;

– при дослідженні параметрів в структурах блоків розподільних енергетичних ресурсів і топології силової електроніки визначено, що зі збільшенням номінальної потужності блоків розподільних енергетичних ресурсів підвищується ефективність багаторівневих перетворювачів, що може бути дуже корисним для галузі транспортних технологій;

– з описаних схем керування електронно з'єднаних агрегатів розподільних енергетичних ресурсів при різних режимах експлуатації підхід багатоконтурного керування є перспективним рішенням для формування мережі;

– з представлених методів керування миттєвою активною і реактивною потужністю для мікромереж змінного струму найбільш ефективним є використання методу резистивної активної фільтрації блоків розподільних

енергетичних ресурсів з електронним зв'язком для активної компенсації спотворених навантажень, що ефективно гасить гармонічні спотворення напруги на виході блоків розподільних енергетичних ресурсів.

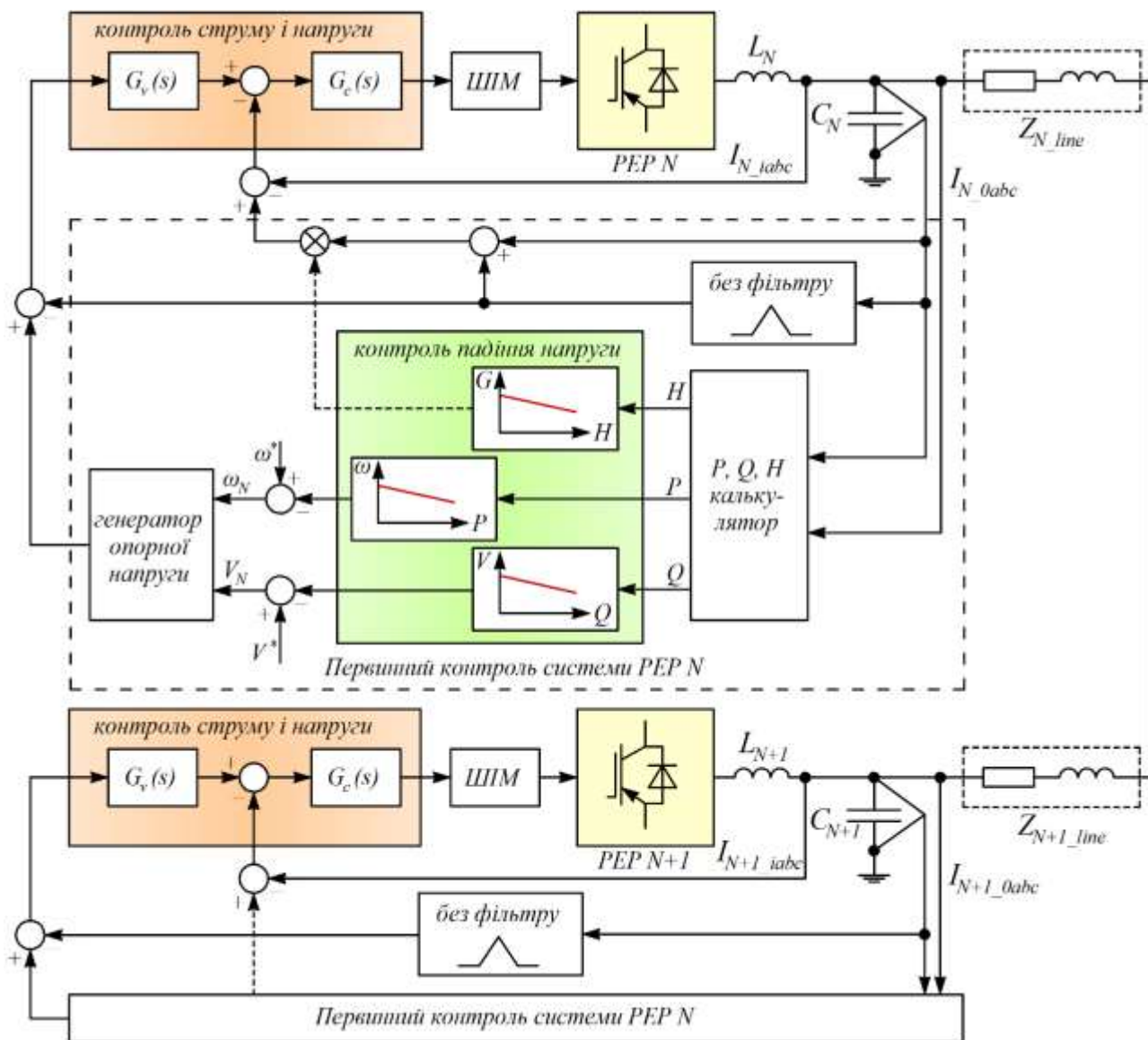


Рис. 8. Блок-схема методу контролю падіння на основі резистивної активної фільтрації

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).

Список використаних джерел

1. Guerrero J. M., Blaabjerg F., Zhelev T., Hemmes K., Monmasson E., Jemei S., Comech M. P., Granadino R., Frau J. I. Distributed generation: Toward a new energy paradigm. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2010. Vol. 4, No. 1. P. 52–64.
2. Garg V. K., Sharma S. Overview on Microgrid System. *2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*. 2018. P. 694–699. DOI: 10.1109/PDGC.2018.8745849.
3. Hernandez-Aramburo C., Green T., Mugniot N. Fuel consumption minimization of a microgrid. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2005. Vol. 41, No. 3. P. 673–681.
4. Timbus, Liserre M., Teodorescu R., Rodriguez P., Blaabjerg F. Evaluation of current controllers for distributed power generation systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2009. Vol. 24, No. 3. P. 654–664.
5. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of Operating Modes and Features of Integration of Renewable Energy Sources into the Electric Power System. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
6. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskyi H. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multilevel inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Issue 3. P. 118–121.
7. Lasseter R. Smart distribution: Coupled microgrids. *IEEE Proc.* 2011. Vol. 99, No. 6. P. 1074–1082.
8. Barnes M., Kondoh J., Asano H., Oyarzabal J., Venkataramanan G., Lasseter R., Hatziargyriou N., Green T. Real-world microgrids – an overview. *Proc. IEEE SoSE*. 2007. P. 1–8.
9. Chakraborty S., Weiss M. D., Simoes M. G. Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency ac microgrid. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2007. Vol. 54, No. 1. P. 1–13.
10. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks. *2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2021. P. 114–117. DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610907.
11. Lasseter R., Eto J., Schenkman B., Stevens J., Vollkommer H., Klapp D., Linton E., Hurtado H., Roy J. CERTS microgrid laboratory test bed. *IEEE Trans. Power Del.* 2011. Vol. 26, No. 1. P. 325–332.
12. Peng F. Z source inverter. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2003. Vol. 39, No. 2. P. 504–510.
13. Gonzalez R., Gubia E., Lopez J., Marroyo L. Transformerless single-phase multilevel-based photovoltaic inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008. Vol. 55, No. 7. P. 2694–2702.
14. Maharjan L., Inoue S., Akagi H., Asakura J. State-of-charge (SOC) balancing control of a battery energy storage system based on a cascade PWM converter. *IEEE Trans. Power Electron.* 2009. Vol. 24, No. 6. P. 1628–1636.
15. Watson A., Dang H., Mondal G., Clare J., Wheeler P. Experimental implementation of a multilevel converter for power system integration. *IEEE ECCE*. 2009. P. 2232–2238.
16. Pai F. An improved utility interface for microturbine generation system with stand-alone operation capabilities. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2006. Vol. 53, No. 5. P. 1529–1537.
17. Kim H., Yu T., Choi S. Indirect current control algorithm for utility interactive inverters in distributed generation systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2008. Vol. 23, No. 3. P. 1342–1347.
18. Guerrero J. M., Huang L., Uceda J. Control of distributed uninterruptible power supply systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008. Vol. 55, No. 8. P. 2845–2859.

19. Driesen J., Katiraei F. Design for distributed energy resources. *IEEE Power and Energy Mag.* 2008. Vol. 6, No. 3. P. 30–40.
20. Nikkhajoei H., Lasseter R. Distributed generation interface to the CERTS microgrid. *IEEE Trans. Power Del.* 2009. Vol. 24, No. 3. P. 1598–1608.
21. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Improving the energy efficiency of traction power supply systems by means the implementation of alternative power sources. *26th International Scientific Conference Transport Means 2022.* 2022. Part I. P. 459–464.
22. Chen Z., Guerrero J. M., Blaabjerg F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. *IEEE Trans. Power Electron.* 2009. Vol. 24, No. 8. P. 1859–1875.
23. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskiy A. V., Philipjeva M. V. Use of modern technologies in the problems of automation of data collection in intellectual power supply systems. *Modern engineering and innovative technologies.* 2022. Issue 19, Part 1. P. 38–51. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-19-01-058.
24. Inoue S., Akagi H. A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system. *IEEE Trans. Power Electron.* 2007. Vol. 22, No. 2. P. 535–542.
25. Song Y., Chung S., Enjeti P. A current-fed link direct DC/AC converter with active harmonic filter for fuel cell power systems. *IEEE IAS.* 2004. P. 123–128.
26. Tirumala R., Mohan N., Henze C. Seamless transfer of grid- connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes. *IEEE APEC.* 2002. P. 1081–1086.
27. Teodorescu R., Blaabjerg F. Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode. *IEEE Trans. Power Electron.* 2004. Vol. 19, No. 5. P. 1323–1332.
28. Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. Microgrids management. *IEEE Power and Energy Mag.* 2008. Vol. 6, No. 3. P. 54–65.
29. Pogaku N., Prodanovic M., Green T. Modeling, analysis and testing of an inverter-based microgrid. *IEEE Trans. Power Electron.* 2007. Vol. 22, No. 2. P. 613–625.
30. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Sushko D., Syniavskiy A., Shelest D. Thermal-powerloss approximation method for determination of efficiency in semiconductor devices. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO).* 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756.

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Синявський Андрій Владиславович, аспірант кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 634-39-00. E-mail: andreivladislavovich10@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9588-6737.

Шелест Дмитро Андрійович, аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6095-658X.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Olexandr Andriiovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Syniavskiy Andrii Vladyslavovych, postgraduate of Department of Transport Communications, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 634-39-00. E-mail: andreivladislavovich10@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9588-6737.

Shelest Dmytro Andriiovych, postgraduate of Department of Electricity Transmission, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Tel.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6095-658X.

Статтю прийнято 07.06.2023 р.