

Павло Лещенко\*, <https://orcid.org/0009-0008-8109-5991>

Артур Запорожець, д-р техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-0704-4116>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна

\*Автор-кореспондент: [pavlo@pauliceman.com](mailto:pavlo@pauliceman.com)

## ОГЛЯД АРХІТЕКТУР КЛАСТЕРІВ МІКРОМЕРЕЖ НА БАЗІ РОЗПОДІЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

**Анотація.** Інтеграція розподілених джерел електричної енергії, таких як вітрові та сонячні електростанції, когенераційні установки, а також системи зберігання енергії, потенційно може зменшити викиди вуглецю, покращити якість електроенергії, підвищити надійність та енергоефективність. Застосування розподілених джерел енергії може зменшити потребу у традиційному розширенні енергосистеми, але керування потенційно великою кількістю джерел генерації є комплексною задачею з точки зору управління мережею та забезпечення її ефективної і безпечної роботи. Саме такі задачі можуть бути успішно вирішені за допомогою мікромереж. Мікромережі вважаються одним із найбільш перспективних рішень, що застосовуються з метою інтеграції розподіленої генерації з відновлюваних джерел в електроенергетичну систему. Вони дозволяють підвищити надійність та стійкість мережі, забезпечуючи безперервність постачання електроенергії до споживачів. Традиційний спосіб виробництва та використання енергії трансформувався у модель спільного використання енергії через зростаючу інтеграцію розподілених енергетичних ресурсів. Такі зміни перетворюють пасивних споживачів на активних «прос'юмерів», що не лише споживають, але й обмінюються з мережею або іншими споживачами надлишковою електроенергією, отриманою з розподілених джерел енергії. Протягом останнього десятиліття концепція мікромереж активно досліджувалася та розвивалася, і сьогодні вона фактично вже є реальністю. Декілька мікромереж можуть працювати у взаємозв'язаному режимі, утворюючи кластер мікромереж, де кожна окрема мікромережа (або кластер в цілому) отримує переваги від такої співпраці. В найближчі роки можна очікувати трансформації нинішньої електроенергетичної системи в систему з багатьма мікромережами. Дану роботу присвячено аналізу наукових публікацій щодо кластерів мікромереж на базі розподілених джерел енергії, наведено результати аналізу можливих архітектур їх побудови, основну увагу приділено структурам та стратегіям організації управління та комунікацій, висвітлено їх недоліки і переваги.

**Ключові слова:** розподілені джерела енергії, кластер мікромереж, мікромережа, управління, моніторинг, архітектура, протокол, комунікація, мережа.

### 1. Вступ

В умовах повномасштабного військового вторгнення агресора на територію України, включаючи цілеспрямовані атаки на її енергетичну інфраструктуру, особливої актуальності набуло питання використання розподілених джерел енергії та трансформації енергетичного сектору з акцентом на резервування та підвищення надійності системи енергопостачання. Водночас зростаючий глобальний світовий попит на надійні та стійкі енергетичні системи зумовлює перехід від традиційної централізованої архітектури електричних мереж до децентралізованих рішень [1]. Мікромережі, які характеризуються як локалізовані енергетичні системи з визначеними електричними межами, стали ключовим компонентом таких рішень [2]. І хоча окремі мікромережі пропонують значні переваги з точки зору енергоефективності, стійкості та інтеграції відновлюваних джерел енергії, їхній потенціал може бути суттєво збільшений при об'єднанні в кластер.

Система, що містить з'єднання двох або більше мікромереж, які працюють скоординовано, як незалежно, так і як частина більшої енергосистеми, з можливістю обміну енергією між собою та з розподільною мережею, називається кластером мікромереж (КМ). У КМ можлива двостороння передача енергії від однієї мікромережі до іншої або до розподільної мережі [3]. На відміну від автономних мікромереж, КМ використовують взаємозв'язки для підвищення надійності, оптимізації

використання енергії та забезпечення ефективної інтеграції розподілених енергетичних ресурсів, що робить їх перспективним рішенням для сучасних енергетичних систем. Використовуючи сильні сторони окремих мікромереж, кластери вирішують проблеми масштабування та надійності, знімають багато економічних обмежень.

## 2. Методи та матеріали

Мікромережі є основними будівельними блоками для КМ. Мікромережа – група взаємопов’язаних навантажень та розсереджених джерел енергії, що, працюючи в координований спосіб, з точки зору мережі поведуться як єдиний виробник або споживач. Вона може встановлювати або розривати з’єднання з мережею, працюючи, відповідно, в підключеному або ізольованому режимі [4].

Саме наявність скоординованого управління відрізняє мікромережу від звичайного поєднання між собою джерел генерації, навантажень та систем накопичення енергії. Тобто можна виокремити два рівні з’єднань в мікромережі [5] (а відповідно і в кластері мікромереж) – рівень розподілу енергії та рівень управління (рис. 1).

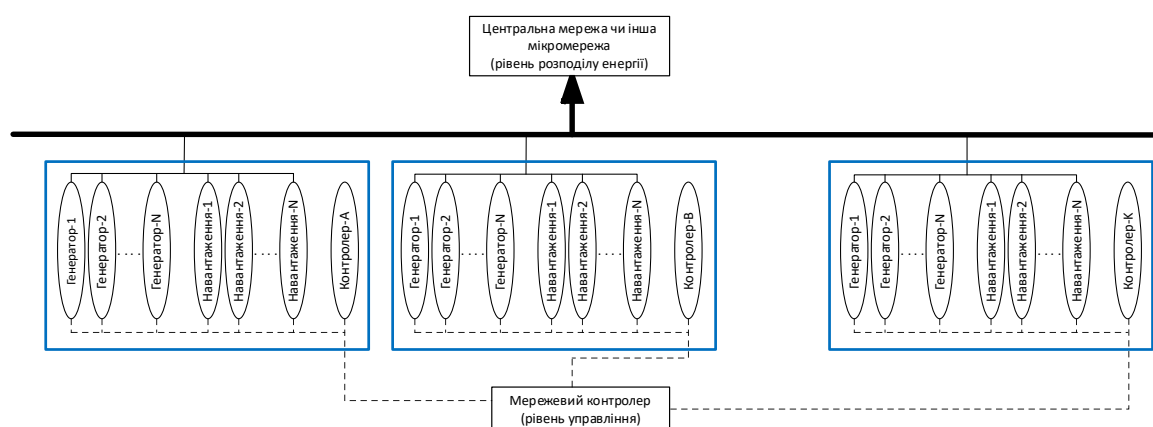


Рисунок 1. Два рівні з’єднань мікромереж

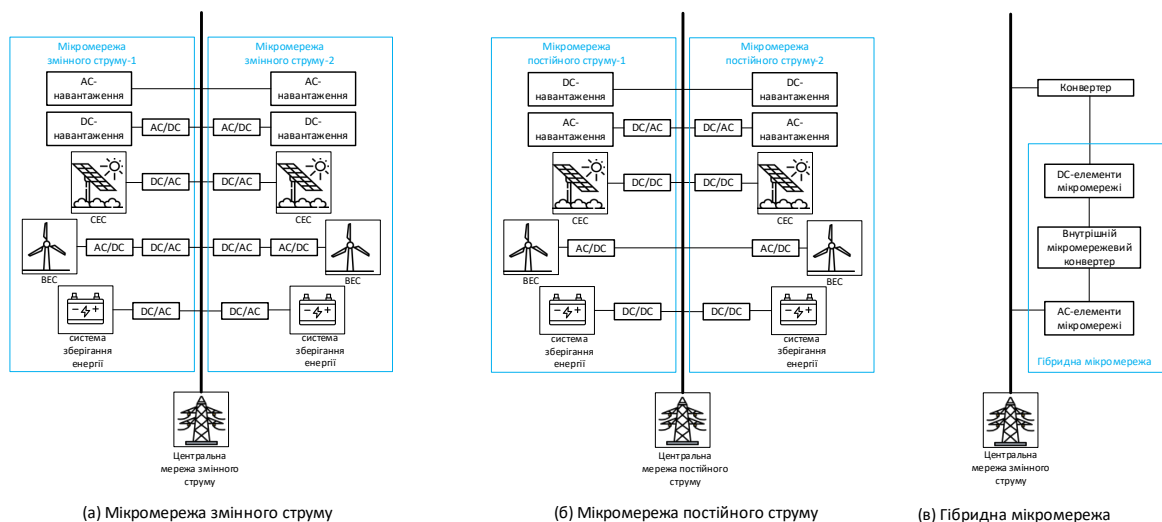
### Рівень розподілу енергії в КМ

Розглянемо рівень розподілу енергії. В цій статті під поняттям зовнішньої мережі маються на увазі як традиційні електричні мережі, що містять навантаження та генератори, так і мережа системного оператора чи інші мережі вищого ієрархічного рівня. Однією з ключових особливостей мікромереж є їх самодостатність, яка дозволяє їм працювати в одному з наступних режимів роботи [6, 7]:

- режим із підключенням до зовнішньої мережі, за якого дефіцит потужності локальних навантажень може бути забезпечений зовнішньою мережею, а надлишкова потужність, що виробляється в мікромережі, може використовуватись для надання допоміжних послуг [8];
- ізольований (або автономний) режим, за якого мікромережа може від’єднуватися від зовнішньої мережі через аварії або під час планового технічного обслуговування, працюючи незалежно. В цьому режимі активна та реактивна потужність, що виробляється в мікромережі, має бути збалансована з потребою локальних навантажень для забезпечення стійкості системи [9].

Деякі автори також виділяють перехідний режим роботи, що являє собою процес переходу мікромережі в ізольований режим (наприклад, під час наявності проблем в роботі мережі) або повторної синхронізації з мережею (наприклад, після усунення аварії) [10].

Залежно від типу розподільних ліній, що використовуються для інтеграції компонентів мікромереж, а саме джерел генерації, навантажень та пристроїв зберігання, виділяють мікромережі змінного (рис. 2а) та постійного струму (рис. 2б), а також гібридні мікромережі (рис. 2в) [11–15].



**Рисунок 2.** Мікромережі залежно від типу розподільних ліній

Відповідно, з'єднання мікромереж в КМ залежно від типу зовнішньої мережі також можуть бути постійного струму, змінного струму або гібридним. При цьому передача електроенергії в мікромережах змінного струму може бути організована за такими схемами: однофазною, трифазною з нейтраллю (чотирьохпровідною), трифазною без нейтралі (трихпроводною).

Для передачі електроенергії в мікромережах постійного струму використовуються схеми [16]: монополярна, біполярна, уніполярна.

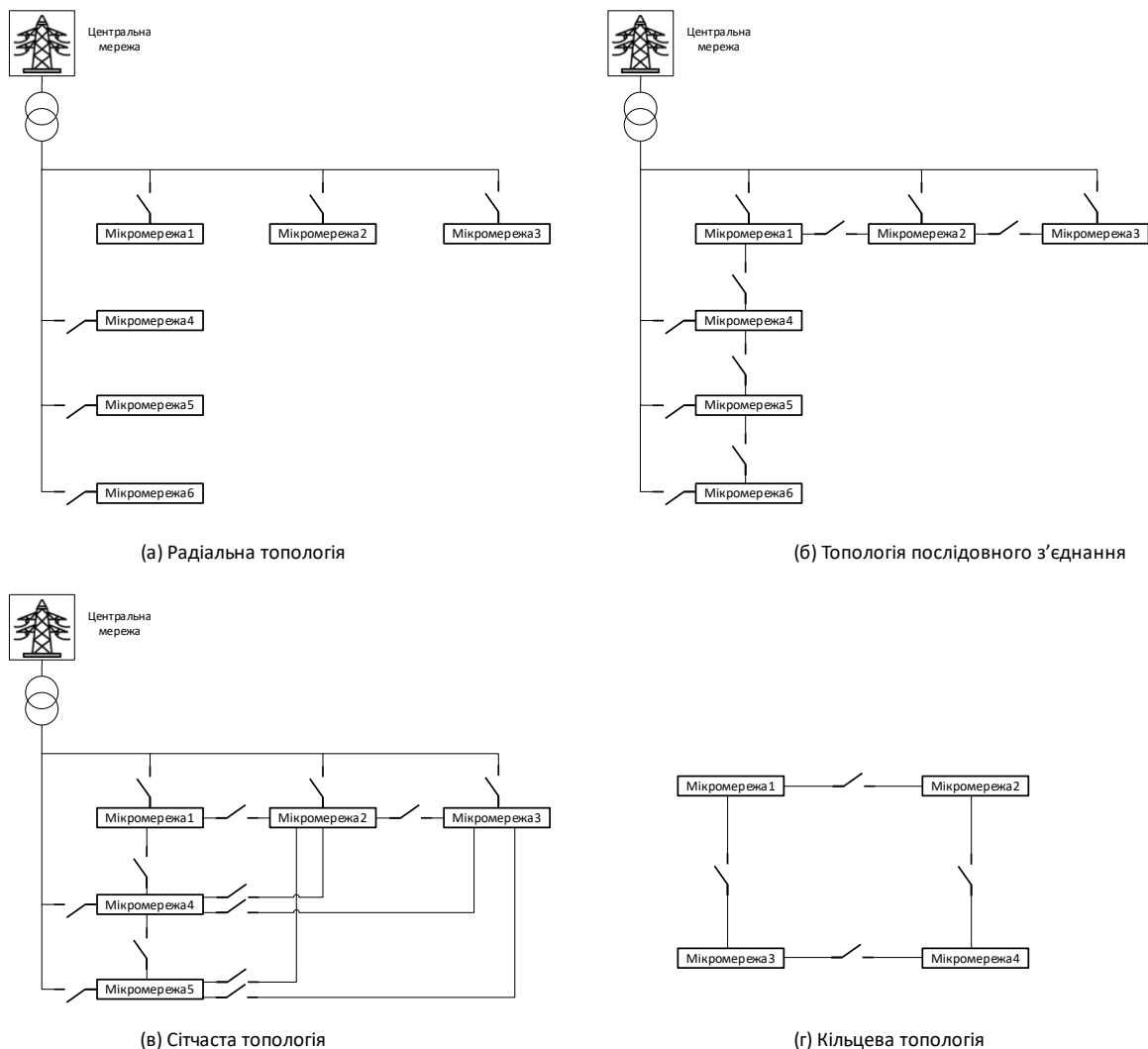
Розглянемо найбільш відомі топології побудови КМ, при цьому слід зазначити, що ті самі топології можуть використовуватись як на рівні розподілу потоків енергії, так і на рівні управління.

Радіальна топологія (типу «зірка») (рис. 3а) є найбільш широко вживаним методом поєднання мікромереж. Така топологія передбачає пряме підключення кожної мікромережі до центральної мережі, при цьому мікромережі не мають безпосередніх з'єднань між собою і весь обмін енергією (чи інформацією) проходить через центральну мережу.

Таким чином, кожна мікромережа може бути переведена в ізолюваний режим або в режим із підключенням до мережі незалежно від іншої мікромережі. Це дозволяє за потреби швидко ізолювати конкретну мікромережу (наприклад, в разі аварійної ситуації), при цьому інші мікромережі можуть продовжити свою роботу в нормальному режимі. Іншою особливістю такої топології є можливість легкого масштабування КМ, що робить привабливим її застосування у великих КМ [17]. Однак ця топологія не забезпечує високої надійності, оскільки мікромережа підключається лише одним фідером (каналом зв'язку), який у деяких випадках може бути пошкоджений або перевантажений. Саме тому застосовується топологія послідовного з'єднання.

Послідовне з'єднання (daisy-chain) (рис. 3б) – це топологія в якій мікромережі підключаються безпосередньо до основної мережі, при цьому мікромережі також з'єднуються із сусідніми мікромережами. Така топологія дозволяє КМ направляти енергію (інформацію) декількома альтернативними шляхами, коли це необхідно (наприклад, в разі проблем із центральною мережею) [18].

Для збільшення обсягів потужності, що розподіляється між мікромережею та іншими мікромережами, а також з метою підвищення надійності організуються прямі з'єднання між усіма мікромережами, таким чином формується сітчаста топологія (рис. 3в).



**Рисунок 3.** Топології побудови КМ

Кільцева топологія (рис. 3г) забезпечує двосторонній потік енергії для підвищення надлишковості та надійності, при цьому ускладнюється аналіз потоків потужності.

Окрім топологій, наведених вище, можна виділити й інші варіанти підключень. Наприклад, часто формують топологію, базуючись на кількості фідерів та способі підключення до них мікромереж. В такому випадку топологію, аналогічну розглянутому вище послідовному з'єднанню (рис. 3б), називають паралельним під'єднанням мікромереж до одного фідера.

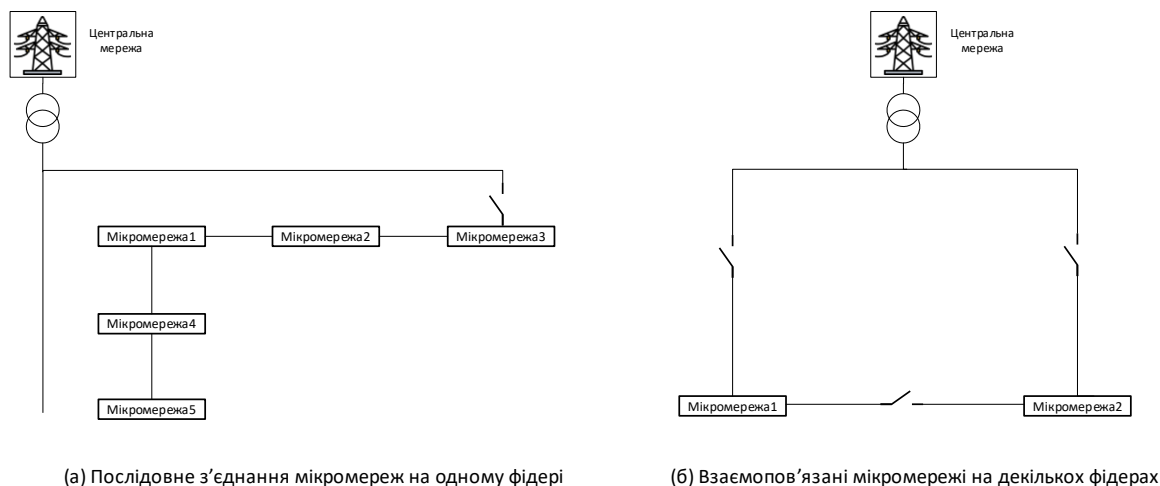
Якщо до центральної мережі підключена лише одна з декількох послідовно з'єднаних мікромереж, то така топологія називається послідовним з'єднанням мікромереж на одному розподільному фідері (рис. 4а).

Також можливі змішані паралельно-послідовні варіанти підключення мікромереж, що являють собою комбінації вже наведених раніше топологій.

Взаємопов'язані мікромережі, що підключені до декількох фідерів, де дві або більше мікромережі підключені окремо до різних фідерів, називають взаємопов'язаними мікромережами на декількох розподільних фідерах (рис. 4 б).

В такій топології мікромережі можуть бути підключені безпосередньо до зовнішньої мережі або утворювати кластери з послідовно підключених мікромереж. Кожен із цих кластерів має принаймні одне з'єднання із зовнішньою мережею. Це дозволяє мікромережам отримувати підтримку від інших мереж у випадку відключення або перевантаження зовнішньої мережі. Крім того, у режимі

підключення до мережі вони можуть надавати допоміжні послуги за запитом оператора основної мережі.



**Рисунок 4.** Способи підключення мікромереж до розподільних фідерів

Виходячі з операційних характеристик мікромереж, що входять до КМ, їх поділяють на два типи: попередньо визначені та динамічні.

Незалежно від умов роботи попередньо визначені мікромережі зберігають постійно сталу конфігурацію мережі. Такі мікромережі функціонують за попередньо встановленими правилами, що регламентують взаємодію з іншими елементами КМ.

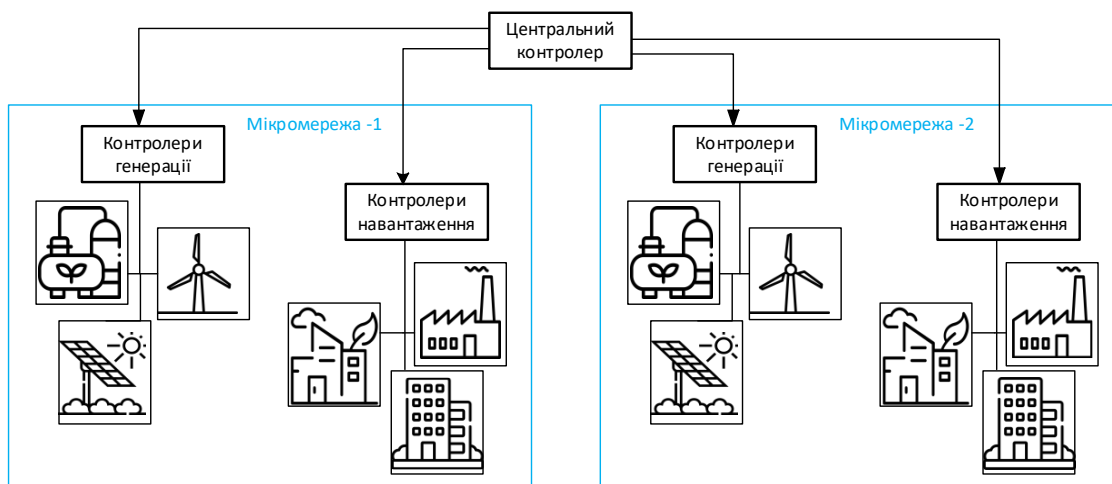
Більш прогресивною формою мікромереж є динамічні мікромережі. Такі мікромережі можуть змінювати свої межі та конфігурацію мережі, щоб підтримувати баланс між генерацією та споживанням [21–23]. Їхня гнучкість дозволяє оптимізувати роботу в реальному часі, забезпечуючи ефективне використання ресурсів і задоволення потреб системи, що змінюються з плином часу. Завдяки своїй адаптивній структурі останнім часом вони набувають все більшої популярності.

### Рівень управління КМ

Виходячи з наявності великої кількості архітектур КМ та різномітних умов їх роботи, керування мікромережами являє собою складну комплексну задачу. Архітектура управління КМ відіграє ключову роль у визначенні того, як різні компоненти системи, такі як генератори, накопичувачі енергії, навантаження та контролери, взаємодіють і обмінюються інформацією для забезпечення стабільної та надійної роботи КМ. Вона визначає процес збору, аналізу та використання даних для прийняття обґрунтованих рішень щодо керування. Для КМ виділяють такі основні варіанти архітектури управління: централізована, децентралізована, розподілена, мультиагентна та ієрархічна.

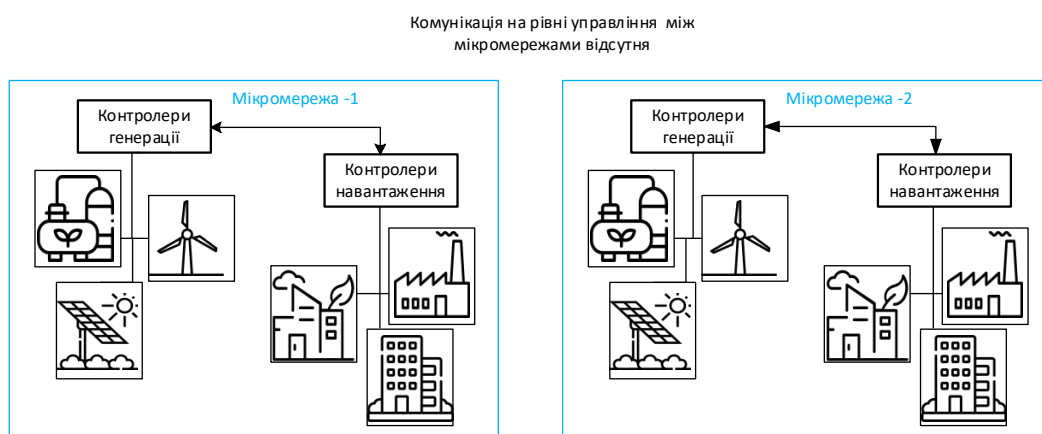
При централізованій архітектурі управління (рис. 5) єдиний центральний контролер забезпечує управління джерелами генерації, навантаженнями та системами зберігання енергії кожної мікромережі, комунікуючи з ними безпосередньо.

Основною перевагою централізованого управління є простота його реалізації, що дозволяє легко оптимізувати та координувати роботу мікромереж [24], водночас головним недоліком такої архітектури є створення ризику виникнення єдиної точки відмови для всього КМ [25–27]. Крім того, така система має труднощі з ефективним управлінням великою кількістю агентів. Масштабованість такого кластера обмежується наявними обчислювальними і комунікаційними ресурсами центрального контролера, що робить таку архітектуру більш придатною саме для невеликих мікромереж [28].



**Рисунок 5.** Централізована архітектура управління мікромережами

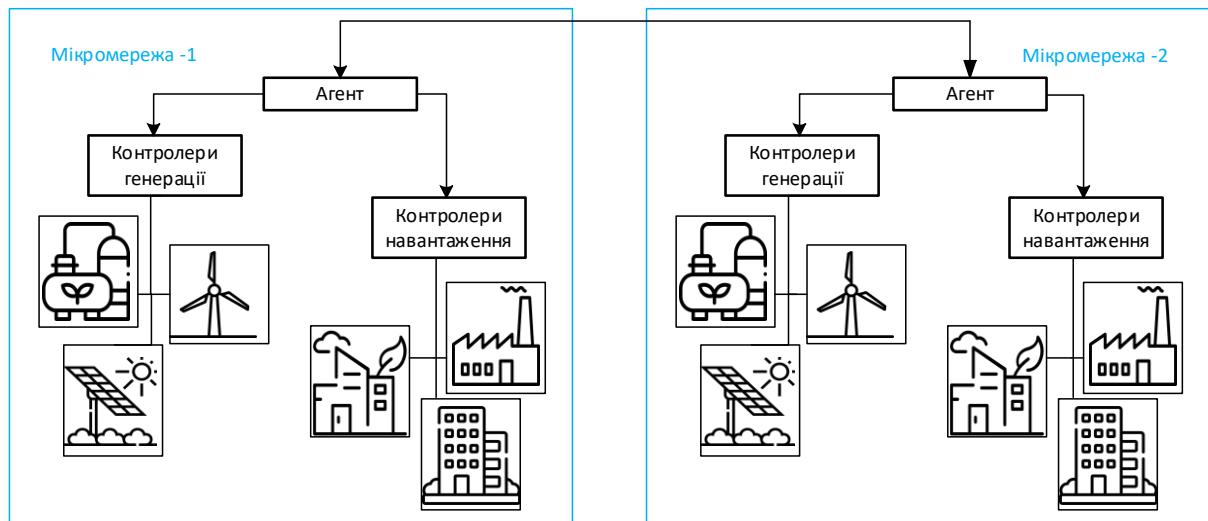
Децентралізоване управління (рис. 6) ґрунтується на організації процесу прийняття рішень на рівні мікромережі елементами даної мікромережі, базуючись виключно на даних від локальних елементів цієї мікромережі.



**Рисунок 6.** Децентралізована архітектура управління мікромереж

Така архітектура управління забезпечує повну автономність і підвищену стабільність кожної мікромережі [24]. Децентралізована структура керування також дозволяє КМ легко масштабуватися як за розміром, так і за складністю. Проте цей підхід не може гарантувати оптимальну роботу всього кластера через відсутність комунікаційних зв'язків між мікромережами, а загальна ефективність КМ може бути не оптимальною через конкуренцію між окремими елементами [24, 27].

Підхід розподіленого управління (рис. 7) базується на використанні центральних контролерів або агентів для координації роботи локальних одиниць. Кожен центральний агент використовує дані, надані агентами інших мікромереж, а також інформацію від локальних контролерів джерел генерації, навантаження та зберігання енергії.



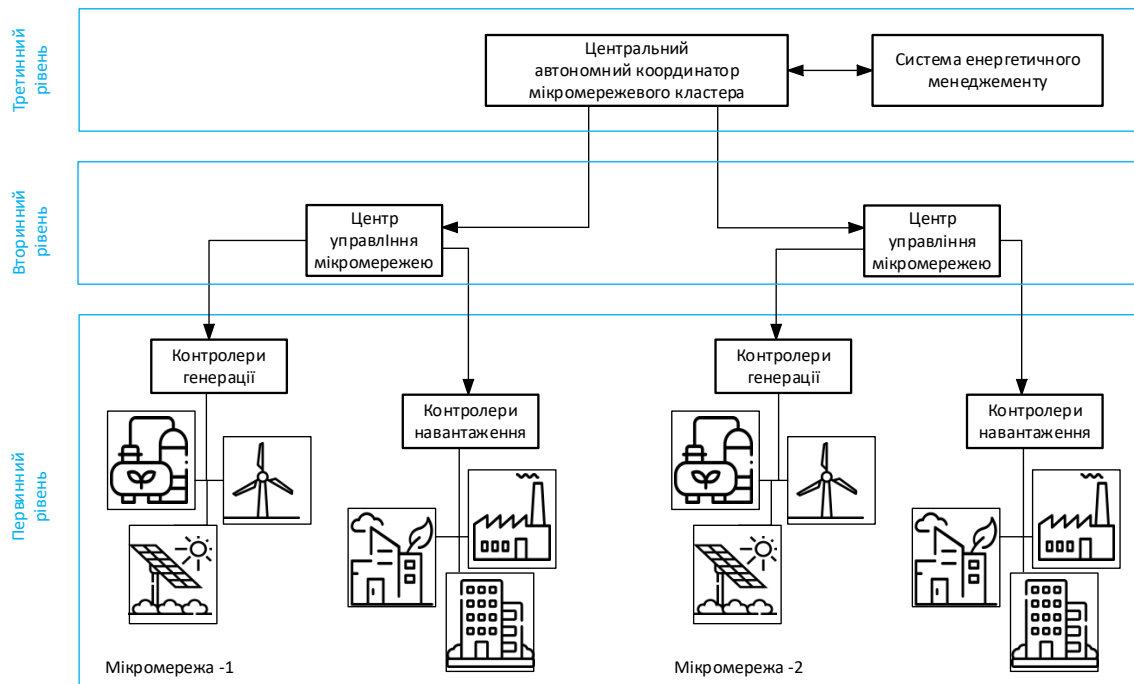
**Рисунок 7.** Розподілена архітектура управління мікромережами

Таким чином, робота кожної мікромережі, що бере участь у кластері, контролюється та координується кількома розподіленими центральними агентами, що враховують сукупну продуктивність КМ. Це дозволяє зменшити конкуренцію між окремими мікромережами в КМ, відповідно таким чином досягається оптимізація роботи кластера в цілому [27]. До недоліків такої архітектури управління можна віднести потребу в надійних каналах зв'язку, а також вимоги до організації захисту комунікацій, адже всі дані передаються між декількома розподіленими системами, що створює загрозу інформаційній безпеці [29].

Часто окремо виділяють мультиагентні системи, які являють собою варіант реалізації архітектури розподіленого управління. В мультиагентних системах агенти мікромереж виступають інтерфейсами різних компонентів мікромереж (джерел генерації, систем зберігання енергії, навантажень) або/та її функцій. Кожен такий агент приймає рішення, базуючись на локальних даних та на інформації, отриманій від інших агентів. Мультиагентні системи застосовуються для вирішення завдань, які є складними або неможливими в реалізації з одним агентом [30]. Удосконалені або спеціалізовані агенти управління можуть вирішувати значно складніші проблеми координації задля досягнення загальної мети КМ або ж індивідуальної мети мікромережі [31]. Оскільки мультиагентні системи є варіантом реалізації розподіленої архітектури управління, їм притаманні ті самі недоліки.

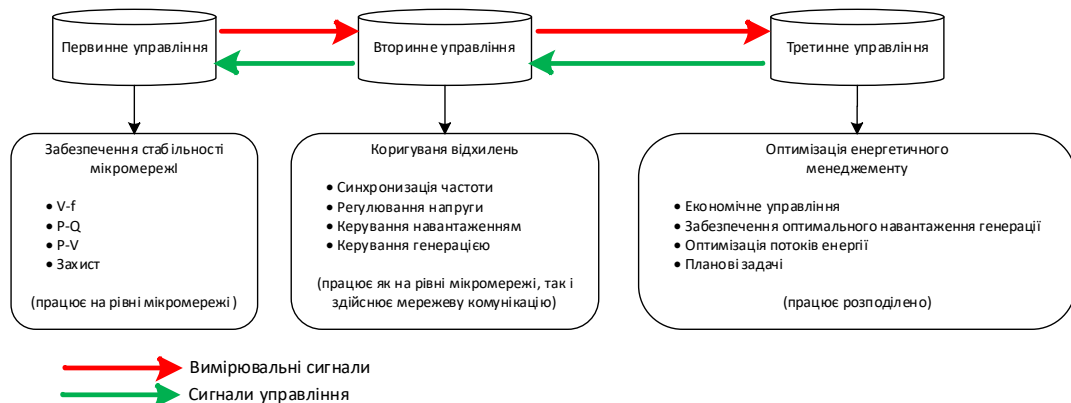
КМ являють собою комплексні системи, що вимагають надійних та інтелектуальних схем управління, тому організація керування КМ в цілому виключно за допомогою однієї з розглянутих вище архітектур є недоцільною. Ієрархічна архітектура розділяє систему управління на декілька рівнів, кожен з яких відповідає за певні функції з чітко визначеними завданнями та цілями. На верхньому рівні знаходиться центральний координатор, який встановлює високорівневі цілі та координує роботу нижчих рівнів. Більш низькі рівні виконують локалізовані завдання з управління та контролю, такі як управління мікромережами або окремими їх елементами. Таким чином, робота кожної мікромережі, що входить в КМ, контролюється та координується на декількох різних рівнях управління.

Ієрархічна стратегія управління є загальновживаним стандартним рішенням для організації управління КМ. Така ієрархічна структура зазвичай складається з трьох основних рівнів управління. Наприклад, як зображено на рис. 8, ієрархічне управління кластером мікромереж може здійснюватися з використанням контролерів генерації і контролерів навантаження на первинному рівні управління, центрів управління мікромережами на вторинному рівні, а також центрального автономного координатора мікромережевого кластера на третинному рівні, що слугує інтерфейсом до системи енергетичного менеджменту [32].



**Рисуюнок 8.** Варіант реалізації ієрархічної стратегії управління мікромережами

Основні цільові функції для кожного рівня керування зображено на рис. 9.



**Рисуюнок 9.** Основні функції трирівневої ієрархічної стратегії управління мікромережами

Основна функція первинного рівня управління полягає в локальному управлінні роботою кожного елемента мікромережі, керуванні напругою та частотою (V-f), керуванні активною та реактивною потужністю (P-Q), керуванні активною потужністю та напругою (P-V) [33]. Первинне управління зосереджене саме на підтримці стабільності роботи мікромережі і зазвичай працює в часовому діапазоні від мілісекунд до секунд. Цей рівень управління є локально-ефективним та зазвичай не потребує наявності комунікаційних каналів. На вторинному рівні амплітуда напруги та частота регулюються до їх номінальних значень, відбувається коригування відхилень, спричинених первинним управлінням [34, 35]. Також вторинний рівень управління може мати централізовану або розподілену архітектуру, що розглядалися вище. До функцій вторинного рівня відносять: управління якістю електроенергії та потоками потужності, синхронізацію частоти мікромережі із зовнішньою мережею. Вторинне управління працює в більш повільних часових шкалах, часто в діапазоні від хвилин до годин.

Оптимальне управління енергоспоживанням, таке як економічний розподіл навантаження, прогнозування навантаження та оптимізація ресурсів на рівні розподільної мережі, виконується на третинному рівні ієрархічної структури керування [36, 37]. Аналогічно вторинному рівню третинний може базуватись на централізованій або розподіленій архітектурі. Всі комутації мікромереж управляються системою енергетичного менеджменту КМ через контролери мікромереж. Третинне управління працює в часових шкалах, які варіюються від годин до днів і навіть тижнів. Варто зазначити, що надійні канали зв'язку є критично важливим елементом цієї стратегії керування.

Таким чином, ієрархічна стратегія управління забезпечує масштабованість і модульний дизайн КМ, що полегшує інтеграцію нових компонентів. Однак процеси прийняття рішень в такій системі можуть бути відносно повільними через необхідність багаторівневої координації.

### **Комунікація в КМ**

Робота КМ в цілому і, зокрема, рівня управління мікромережами спирається на здатність мікромереж до комунікації. Комунікаційні мережі є критично важливими для КМ, оскільки вони забезпечують обмін даними, без яких КМ не може повноцінно функціонувати [38]; саме мережі та протоколи комунікації надають можливість координувати та використовувати розподілені енергетичні ресурси для покращення продуктивності системи, а також відіграють важливу роль у контролі та захисті системи [39]. Водночас при проектуванні та експлуатації КМ необхідно вирішувати питання, пов'язані із можливими збоями в комунікаційних мережах, виходу з ладу їх елементів, затримками та втратами пакетів даних при передачі. Фактично, ефективність функціонування управління КМ напряду залежить від надійності та ефективності системи комунікацій [40]. Можна виділити декілька широко вживаних моделей мережевої взаємодії КМ.

У моделі «головний-підлеглий» обов'язково присутній один головний та один чи декілька підлеглих контролерів. Головний контролер збирає інформацію від підлеглих та надсилає їм команди управління. Для цього головний контролер має володіти даними про підключення підлеглих, що накладає обмеження на легкість масштабування КМ. Зазвичай модель мережевої комунікації «головний-підлеглий» використовується при роботі мікромережі в ізолюваному режимі [41], при цьому застосовуються протоколи Modbus, Distributed Network Protocol 3 (DNP3) та IEC 61850. Modbus є широко вживаним протоколом через свою простоту та стабільність, безпека передачі даних при застосуванні цього протоколу має забезпечуватись на нижчому рівні, а саме на транспортному. Протокол DNP3 зазвичай застосовується для організації зв'язку між обладнанням підстанцій, системами управління та віддаленими термінальними пристроями. DNP3 має декілька додаткових функцій, які відсутні в Modbus, наприклад можлива комунікація з пристроями на великих відстанях. Також слід зазначити, що DNP3 підтримує власну безпечну аутентифікацію. IEC 61850 є серією стандартів для моделей даних, обміну інформацією та управління подіями між елементами енергосистем. Однак IEC 61850 не враховує аспекти кібербезпеки, для чого існує інший стандарт – IEC 62351.

В моделі «публікація-підписка» елементи КМ можуть широкомовно транслювати (публікувати) певну інформацію визначеним групам елементів КМ (підписникам). Група елементів КМ, яка бажає отримувати певну інформацію, повинна попередньо підписатись на неї [42]. Така комунікаційна модель широко знаходить своє застосування в операціях реального часу КМ. Основними перевагами, що надає така модель, є можливість самоналаштування мережі без використання центрального вузла управління, що полегшує масштабування КМ, а також зменшення вимог до пропускної спроможності мережі, адже принцип підписки дозволяє суттєво зменшити об'єм даних, що передається мережею. Нижче наведено найбільш широко вживані протоколи, що використовують модель «публікація-підписка».

До недоліків AMQP можна віднести ресурсоємність, що накладає обмеження на застосування в мережах з низькою пропускною здатністю, а також в пристроях з низьким енергоспоживанням та обмеженою кількістю обчислювальних ресурсів.

XMPP є одним із відкритих стандартних протоколів IoT, який підтримує асинхронну та синхронну модель «публікація-підписка», що дозволяє обмін повідомленнями у форматі XML. Саме використання XML надає йому можливість застосування в дуже різноманітних комунікаційних середовищах, але водночас саме необхідність XML-парсингу ускладнює цей протокол і робить фактично неможливим його застосування в задачах реального часу.

MQTT – це протокол із відкритим стандартом, що базується на стеку TCP/IP і включає трьох основних учасників: видавця (publisher), підписника (subscriber) та брокера (broker). Видавці та підписники обмінюються повідомленнями за темами через брокерів, які виконують контроль повноважень і забезпечують обмін інформацією з використанням TLS. MQTT є легким протоколом, який не потребує високої пропускну здатності, тому він підходить для розподілених датчиків. Однак існують певні проблеми із застосуванням MQTT у пристроях з обмеженими ресурсами. Довгі назви тем роблять MQTT непридатним для застосування у мережах з низькою пропускну здатністю. Ще одним недоліком є те, що на транспортному рівні MQTT використовує TCP, з чого випливає необхідність підтримувати постійне з'єднання для того, щоб брокер міг сповіщати підписників про будь-які зміни у темі, що сповільнює цикл передачі. Існує версія протоколу, яка називається MQTT-SN. Вона усуває вищезазначені недоліки, використовуючи UDP, двобайтовий псевдонім та пасивних підписників [43].

Однорангова («peer-to-peer») модель передбачає, що кожна мікромережа може комунікувати з усіма іншими мікромережами в КМ. Мікромережі є «прос'юмерами», тобто можуть як споживати зовнішню енергію, так і надавати її за запитом іншої мікромережі. Саме завдяки використанню однорангової моделі з'являється можливість здійснювати торгівлю енергією безпосередньо між мікромережами (при цьому обмін інформацією відбувається лише між зацікавленими сторонами [44]) або із залученням посередника (центрального координатора). Отже, однорангова модель комунікації надає можливість побудувати мережу без центрального елементу управління [45]. Це, зі свого боку, дозволяє покращити інтеграцію розподілених джерел енергії завдяки можливості організації споживання енергії з найменш віддалених джерел, тобто покращується управління розподіленими енергоресурсами та зменшуються втрати енергії. Однорангова модель покладається на двосторонню мережеву комунікацію між декількома мікромережами, що робить систему вразливою до різноманітних атак, включаючи неавторизований доступ до інформації, розподілені атаки відмови в обслуговуванні (DDoS), атаки типу «людина посередині» тощо. Для вирішення цих проблем запропоновано низку рішень, одним з яких є використання методів на основі блокчейну [46].

Для ефективного функціонування КМ інформація з різноманітних датчиків має зчитуватись якомога частіше, в ідеалі – через безмежно малі проміжки часу. Очевидно, що чим частіше проводиться опитування, тим більша кількість інформації передається за одиницю часу. Однак пропускну здатність мереж передачі даних є обмеженою, тому використовується керована подіями (event-triggered) модель мережевої комунікації. Принцип її дії базується на тому, що за певних умов датчики самостійно надсилають інформаційне повідомлення контролеру. Іншим позитивним аспектом використання такої моделі мережевої комунікації є зменшення споживання енергії елементами комунікаційної мережі.

### 3. Висновки

Зростаючий світовий тренд до децентралізації енергосистем, а також нагальна потреба в підвищенні надійності енергопостачання, що є особливо важливим для України в нинішніх умовах, роблять мікромережі та їх об'єднання у кластери надзвичайно перспективним рішенням. Такі системи сприяють ефективній інтеграції відновлюваних джерел енергії та залученню споживачів до активної участі в енергетичному обміні.

Показано, що існує два основних рівні з'єднання в кластерах мікромереж: рівень розподілу енергії та рівень управління. Розуміння цих рівнів є важливим для проєктування та експлуатації ефективних систем.

Проведений огляд сучасних архітектур кластерів мікромереж на базі розподілених джерел енергії дав змогу систематизувати інформацію щодо різних аспектів побудови та функціонування таких

систем, зокрема, починаючи від топологій з'єднання та закінчуючи стратегіями управління та комунікації.

Виконаний аналіз топологій розподілу енергії, основних варіантів з'єднання мікромереж у кластери, включаючи радіальну, послідовну, сітчасту та кільцеву топології, а також їх комбінації, виявив характерні особливості, переваги та недоліки кожної з цих топологій, особливо з точки зору надійності передачі енергії та можливостей масштабування системи.

Аналіз архітектур управління КМ, таких як централізоване, децентралізоване, розподілене, мультиагентне та ієрархічне управління, показав, що для складних кластерів мікромереж найбільш прийнятною є ієрархічна архітектура управління, яка забезпечує багаторівневу координацію та дозволяє ефективно керувати системою в цілому, поєднуючи централізований контроль з локальною автономією окремих мікромереж.

Показано критичну роль комунікаційних моделей та протоколів для забезпечення повноцінної роботи кластерів мікромереж. Розглянуто моделі «головний-підлеглий», «публікація-підписка» та однорангову, а також основні протоколи, що використовуються в кожній з них, такі як Modbus, DNP3, IEC 61850, AMQP, XMPP та MQTT. Встановлено, що вибір відповідної комунікаційної інфраструктури є визначальним фактором для забезпечення надійного обміну даними та ефективної координації між елементами КМ.

Проведений всебічний огляд ключових аспектів проєктування та експлуатації кластерів мікромереж виявив їх важливість для розвитку стійких та децентралізованих енергетичних систем. Подальші дослідження в цій галузі мають зосередитися на оптимізації управління, комунікацій та забезпеченні безпеки таких складних енергетичних комплексів.

**Внесок авторів.** Постановка завдання та висновки – А. Запорожець; аналіз та систематизація інформації, візуалізація, висновки – П. Лещенко.

**Фінансування роботи.** Стаття підготовлена в межах НДР «Розроблення структури і забезпечення функціонування самодостатньої розподіленої генерації» (0125U000001), що виконується за пріоритетним напрямом «Енергетичні технології і системи, розподілена енергетика та водопостачання» на 2025–2026 рр. бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

## Посилання

1. Каплун В.В., Заблудський М.М., Троханяк В.І., Шворов С.А., Радько І.П., Станиціна В.В., Нечаєва Т.П., Тесленко О.І., Макаревич С.С., Сорокін Д.С., Ковальчук С.І., Горський В.В., Якименко І.Ю. Формування технологічних структур енергонезалежних громад: монографія. За заг. ред. В.В. Каплуна. Національний університет біоресурсів і природокористування України, Інститут загальної енергетики НАН України. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2024. 312 с.
2. Козачук О., Лежнюк П. Формування локальних електроенергетичних систем в складі об'єднаної електроенергетичної системи. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 337. № 3(2). С. 352–356. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-53>
3. Anvari-Moghaddam A., Abdi H., Mohammadi-Ivatloo B., Hatzigargyriou N. Advances in Operation, Control, and Protection. *Microgrids*. Springer International Publishing, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59750-4>
4. Ton D. T., Smith M. A. The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*. 2012. Vol. 25. Iss. 8. P. 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>
5. Денисюк С., Белоха Г. Децентралізовані електроенергетичні системи як складові реалізації концепції «розумні мережі». *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. № 4(80). С. 26–40. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.026>
6. AhmadiAhangar R., Rosin A., Niaki A. N., Palu I., Korötko T. A review on real-time simulation and analysis methods of microgrids. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2019. Vol. 29. Iss. 11. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12106>

7. Wang X., Guerrero J. M., Blaabjerg F., Chen Z. A review of power electronics based microgrids. *Journal of Power Electronics*. 2012. Vol. 12. Iss. 1. P. 181–192. <https://doi.org/10.6113/jpe.2012.12.1.181>
8. Spooner T., Pedrasa M. A survey of techniques used to control microgrid generation and storage during island operation. Proceedings of the AUPEC 2006 Conference (2006, December 10–13, Melbourne, Australia). URL: [https://www.ceem.unsw.edu.au/sites/default/files/migration\\_files/ceem/publication-documents/PedrasaSpoonerAUPEC2006.pdf](https://www.ceem.unsw.edu.au/sites/default/files/migration_files/ceem/publication-documents/PedrasaSpoonerAUPEC2006.pdf) (Last accessed: 05.08.2024).
9. Falahi M., Butler-Purpy K. L., Ehsani M. (2013). Induction motor starting in islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. Vol. 4. Iss. 3. P. 1323–1331. <https://doi.org/10.1109/tsg.2013.2271261>
10. Meegahapola L. G., Robinson D., Agalgaonkar A. P., Perera S., Ciufo P. Microgrids of commercial buildings: Strategies to manage mode transfer from grid connected to islanded mode. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2014. Vol. 5. Iss. 4. P. 1337–1347. <https://doi.org/10.1109/tste.2014.2305657>
11. Shahparasti M., Mohamadian M., Baboli P. T., Yazdianp A. Toward power quality management in hybrid AC-DC microgrid using LTC-L utility interactive inverter: Load voltage-grid current tradeoff. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 8. Iss. 2. P. 857–867. <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2480717>
12. Gelani H. E., Dastgeer F., Nasir M., Khan S., Guerrero J. M. AC vs. DC distribution efficiency: Are we on the right path? *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 13. 4039. <https://doi.org/10.3390/en14134039>
13. Denysov V., Kulyk M., Babak V., Zaporozhets A., Kostenko G. Modeling nuclear-centric scenarios for Ukraine's low-carbon energy transition using diffusion and regression techniques. *Energies*. 2024. Vol. 17. Iss. 20. 5229. <https://doi.org/10.3390/en17205229>
14. Ahmed M., Meegahapola L., Vahidnia A., Datta M. Stability and control aspects of microgrid architectures—a comprehensive review. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 144730–144766. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3014977>
15. Hu J., Shan Y., Guerrero J. M., Ioinovici A., Chan K. W., Rodriguez J. Model predictive control of microgrids – An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 136. 110422. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110422>
16. Justo J. J., Mwasilu F., Lee J., Jung J.-W. AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 24. P. 387–405. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.067>
17. Wong Y. C. C., Lim C. S., Rotaru M. D., Cruden A., Kong X. Erratum to “consensus virtual output impedance control based on the novel droop equivalent impedance concept for a multi-bus radial microgrid” [jun 20 1078-1987]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. Vol. 35. Iss. 3. 1723. <https://doi.org/10.1109/tce.2020.2998887>
18. Kumar D., Zare F., Ghosh A. DC microgrid technology: System architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 12230–12256. <https://doi.org/10.1109/access.2017.2705914>
19. Zou H., Mao S., Wang Y., Zhang F., Chen X., Cheng L. A survey of energy management in interconnected multi-microgrids. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 72158–72169. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2920008>
20. Rahbar K., Chai C. C., Zhang R. Energy cooperation optimization in microgrids with renewable energy integration. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9. Iss. 2. P. 1482–1493. <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2600863>
21. Du Y., Tu H., Lu X., Wang J., Lukic S. Black-start and service restoration in resilient distribution systems with dynamic microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. Vol. 10. Iss. 4. P. 3975–3986. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3071765>
22. Du Y., Lu X., Wang J., Chen B., Tu H., Lukic S. Dynamic microgrids in resilient distribution systems with reconfigurable cyber-physical networks. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2020. Vol. 9. Iss. 5. P. 5192–5205. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2020.2981921>
23. Du Y., Men Y., Ding L., Lu X. Large-Signal stability analysis for inverter-based dynamic microgrids reconfiguration. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2021. Vol. 14. Iss. 2. P. 836–852. <https://doi.org/10.1109/tsg.2021.3123937>
24. Mao M., Wang Y., Chang L., Du Y. Operation optimization for multi-microgrids based on centralized-decentralized hybrid hierarchical energy management. Proceedings of the 2017 IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE). *IEEE*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ecce.2017.8096818>
25. Singh A. R., Koteswara Raju D., Phani Raghav L., Seshu Kumar R. State-of-the-art review on energy management and control of networked microgrids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023. Vol. 57. 103248. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103248>

26. Li J., Hai Z., Shuai Z., Zhu L., Xu X., Zhang C., Zhao J. Coordinated current and voltage unbalance mitigation in networked microgrids with aggregated PV systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2022. Vol. 38. Iss. 1. P. 968–971. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2022.3210770>
27. Kou P., Liang D., Gao L. Distributed EMPC of multiple microgrids for coordinated stochastic energy management. *Applied Energy*. 2017. Vol. 185. P. 939–952. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.092>
28. Alizadeh A., Kamwa I., Moeini A., Mohseni-Bonab S. M. Energy management in microgrids using transactive energy control concept under high penetration of Renewables; A survey and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 176. 113161. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113161>
29. Zhang W., Xu Y. Distributed optimal control for multiple microgrids in a distribution network. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10. Iss. 4. P. 3765–3779. <https://doi.org/10.1109/tsg.2018.2834921>
30. Gai O., Novoseltsev O., Vorushylo A., Khomyak O., Gai H. Features of multi-agent evaluation of of microgrid systems efficiency in parallel operation with the power system according to the reliability criterion. *Machinery & Energetics*. 2024. Vol. 15. Iss. 3. P. 73–83. <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2024.73>
31. Zheng G., Li N. Multi-Agent based control system for multi-microgrids. Proceedings of the 2010 international conference on computational intelligence and software engineering. *IEEE*. 2010. <https://doi.org/10.1109/cise.2010.5676818>
32. Gil N. J., Lopes J. A. P. Hierarchical frequency control scheme for islanded multi-microgrids operation. Proceedings of the 2007 IEEE lausanne power tech (2007, July 1–5, Lausanne, Switzerland). <https://doi.org/10.1109/pct.2007.4538363>
33. Zamora R., Srivastava A. K. Multi-Layer architecture for voltage and frequency control in networked microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016. Vol. 9. Iss. 3. P. 2076–2085. <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2606460>
34. Hong Y.-Y., Alano F. I. Hierarchical energy management in islanded networked microgrids. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 8121–8132. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3143307>
35. Chakraborty S., Kar S. Hierarchical control of networked microgrid with intelligent management of TCLs: A case study approach. *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 224. 109787. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109787>
36. Montilla-DJesus M., Franco-Mejía É., Trujillo E. R., Rodriguez-Amenedo J. L., Arnaltes S. Coordinated control system between grid-vsc and a DC microgrid with hybrid energy storage system. *Electronics*. 2021. Vol. 10. Iss. 21. 2699. <https://doi.org/10.3390/electronics10212699>
37. Babak V.P., Kulyk M.M. Possibilities and perspectives of the consumers-regulators application in systems of frequency and power automatic regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. Vol. 4. P. 72–80. <https://doi.org/10.15407/technd2023.04.072>
38. Tang Z., Qin Y., Jiang Z., Krawec W., Zhang P. Quantum-Secure microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 36. Iss. 2. P. 1250–1263. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3011071>
39. Mariam L., Basu M., Conlon M. F. Microgrid: Architecture, policy and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 64. P. 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.037>
40. Zhou Q., Shahidehpour M., Paaso A., Bahramirad S., Alabdulwahab A., Abusorrah A. Distributed control and communication strategies in networked microgrids. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22. Iss. 4. P. 2586–2633. <https://doi.org/10.1109/comst.2020.3023963>
41. Han Y., Zhang K., Li H., Coelho E. A. A., Guerrero J. M. MAS-Based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: A comprehensive overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33. Iss. 8. P. 6488–6508. <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2761438>
42. Alam M. N., Chakrabarti S., Ghosh A. Networked microgrids: State-of-the-art and future perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15. Iss. 3. P. 1238–1250. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2881540>
43. Pathaka A. D., Tembhurne J. V. Internet of things: A survey on iot protocols. *SSRN Electronic Journal*. 2018. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3168575>
44. Zhang C., Wu J., Zhou Y., Cheng M., Long C. Peer-to-Peer energy trading in a Microgrid. *Applied Energy*. 2018. Vol. 220. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.010>
45. Werth A., Andre A., Kawamoto D., Morita T., Tajima S., Tokoro M., Yanagidaira D., Tanaka K. Peer-to-Peer control system for DC microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9. Iss. 4. P. 3667–3675. <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2638462>

46. Gao J., Asamoah K. O., Xia Q., Sifah E. B., Amankona O. I., Xia H. A blockchain peer-to-peer energy trading system for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2023. Vol. 14. Iss. 5. P. 3944–3960. <https://doi.org/10.1109/tsg.2023.3237624>

## References

1. Kaplun, V., Zablodskyi, M., Trokhanyak, V., Shvorov, S., Radko, I., Stanytsina, V., Nechaeva, T., Teslenko, O., Makarevych, S., Sorokin, D., Kovalchuk, S., Horskyi, V., & Yakymenko, I. (2024). Formation of Technological Structures of Energy-Independent Communities [Monograph]. In V.V. Kaplun (Ed.). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, General Energy Institute of NAS of Ukraine. Odesa: Publishing House "Helvetica" (312 p.) [in Ukrainian].
2. Kozachuk, O., & Lezhniuk, P. (2024). Formation of local electric power systems as part of the unified electric power system. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337, 3(2), 352–356 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-53>
3. Anvari-Moghaddam, A., Abdi, H., Mohammadi-Ivatloo, B., & Hatziargyriou, N. (2021). Advances in Operation, Control, and Protection. *Microgrids*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59750-4>
4. Ton, D. T., & Smith, M. A. (2012). The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*, 25(8), 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>
5. Denysiuk, S., & Bielokha, H. (2024). Decentralized electricity systems as component implementations of the "smart grids" concept. *System Research in Energy*, 4(80), 26–40 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.026>
6. AhmadiAhangar, R., Rosin, A., Niaki, A. N., Palu, I., & Korötko, T. (2019). A review on real-time simulation and analysis methods of microgrids. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(11). <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12106>
7. Wang, X., Guerrero, J. M., Blaabjerg, F., & Chen, Z. (2012). A review of power electronics based microgrids. *Journal of Power Electronics*, 12(1), 181–192. <https://doi.org/10.6113/jpe.2012.12.1.181>
8. Spooner, T., & Pedrasa, M. (2006, December 10–13). A survey of techniques used to control microgrid generation and storage during island operation. Proceedings of the AUPEC 2006 Conference, Melbourne, Australia. Retrieved August 5, 2024, from [https://www.ceem.unsw.edu.au/sites/default/files/migration\\_files/ceem/publication-documents/PedrasaSpoonerAUPEC2006.pdf](https://www.ceem.unsw.edu.au/sites/default/files/migration_files/ceem/publication-documents/PedrasaSpoonerAUPEC2006.pdf)
9. Falahi, M., Butler-Purry, K. L., & Ehsani, M. (2013). Induction motor starting in islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3), 1323–1331. <https://doi.org/10.1109/tsg.2013.2271261>
10. Meegahapola, L. G., Robinson, D., Agalgaonkar, A. P., Perera, S., & Ciufo, P. (2014). Microgrids of commercial buildings: Strategies to manage mode transfer from grid connected to islanded mode. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1337–1347. <https://doi.org/10.1109/tste.2014.2305657>
11. Shahparasti, M., Mohamadian, M., Baboli, P. T., & Yazdianp, A. (2015). Toward power quality management in hybrid AC-DC microgrid using LTC-L utility interactive inverter: Load voltage-grid current tradeoff. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(2), 857–867. <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2480717>
12. Gelani, H. E., Dastgeer, F., Nasir, M., Khan, S., & Guerrero, J. M. (2021). AC vs. DC distribution efficiency: Are we on the right path? *Energies*, 14(13), 4039. <https://doi.org/10.3390/en14134039>
13. Denysov, V., Kulyk, M., Babak, V., Zaporozhets, A., & Kostenko, G. (2024). Modeling nuclear-centric scenarios for Ukraine's low-carbon energy transition using diffusion and regression techniques. *Energies*, 17(20), 5229. <https://doi.org/10.3390/en17205229>
14. Ahmed, M., Meegahapola, L., Vahidnia, A., & Datta, M. (2020). Stability and control aspects of microgrid architectures—a comprehensive review. *IEEE Access*, 8, 144730–144766. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3014977>
15. Hu, J., Shan, Y., Guerrero, J. M., Ioinovici, A., Chan, K. W., & Rodriguez, J. (2021). Model predictive control of microgrids – An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110422. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110422>
16. Justo, J. J., Mwasilu, F., Lee, J., & Jung, J.-W. (2013). AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 387–405. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.067>
17. Wong, Y. C. C., Lim, C. S., Rotaru, M. D., Cruden, A., & Kong, X. (2020). Erratum to “consensus virtual output impedance control based on the novel droop equivalent impedance concept for a multi-bus radial microgrid” [jun 20 1078-1987]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(3), 1723. <https://doi.org/10.1109/tec.2020.2998887>

18. Kumar, D., Zare, F., & Ghosh, A. (2017). DC microgrid technology: System architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects. *IEEE Access*, 5, 12230–12256. <https://doi.org/10.1109/access.2017.2705914>
19. Zou, H., Mao, S., Wang, Y., Zhang, F., Chen, X., & Cheng, L. (2019). A survey of energy management in interconnected multi-microgrids. *IEEE Access*, 7, 72158–72169. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2920008>
20. Rahbar, K., Chai, C. C., & Zhang, R. (2018). Energy cooperation optimization in microgrids with renewable energy integration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 1482–1493. <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2600863>
21. Du, Y., Tu, H., Lu, X., Wang, J., & Lukic, S. (2021). Black-start and service restoration in resilient distribution systems with dynamic microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(4), 3975–3986. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3071765>
22. Du, Y., Lu, X., Wang, J., Chen, B., Tu, H., & Lukic, S. (2020). Dynamic microgrids in resilient distribution systems with reconfigurable cyber-physical networks. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(5), 5192–5205. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2020.2981921>
23. Du, Y., Men, Y., Ding, L., & Lu, X. (2021). Large-Signal stability analysis for inverter-based dynamic microgrids reconfiguration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 14(2), 836–852. <https://doi.org/10.1109/tsg.2021.3123937>
24. Mao, M., Wang, Y., Chang, L., & Du, Y. (2017). Operation optimization for multi-microgrids based on centralized-decentralized hybrid hierarchical energy management. Proceedings of the 2017 IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE). *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ecce.2017.8096818>
25. Singh, A. R., Koteswara Raju, D., Phani Raghav, L., & Seshu Kumar, R. (2023). State-of-the-art review on energy management and control of networked microgrids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103248. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103248>
26. Li, J., Hai, Z., Shuai, Z., Zhu, L., Xu, X., Zhang, C., & Zhao, J. (2022). Coordinated current and voltage unbalance mitigation in networked microgrids with aggregated PV systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(1), 968–971. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2022.3210770>
27. Kou, P., Liang, D., & Gao, L. (2017). Distributed EMPC of multiple microgrids for coordinated stochastic energy management. *Applied Energy*, 185, 939–952. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.092>
28. Alizadeh, A., Kamwa, I., Moeini, A., & Mohseni-Bonab, S. M. (2023). Energy management in microgrids using transactive energy control concept under high penetration of Renewables; A survey and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176, 113161. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113161>
29. Zhang, W., & Xu, Y. (2019). Distributed optimal control for multiple microgrids in a distribution network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4), 3765–3779. <https://doi.org/10.1109/tsg.2018.2834921>
30. Gai, O., Novoseltsev, O., Vorushylo, A., Khomyak, O., & Gai, H. (2024). Features of multi-agent evaluation of microgrid systems efficiency in parallel operation with the power system according to the reliability criterion. *Machinery & Energetics*, 15(3), 73–83. <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2024.73>
31. Zheng, G., & Li, N. (2010). Multi-Agent based control system for multi-microgrids. Proceedings of the 2010 international conference on computational intelligence and software engineering. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/cise.2010.5676818>
32. Gil, N. J., & Lopes, J. A. P. (2007, July 1–5). Hierarchical frequency control scheme for islanded multi-microgrids operation. Proceedings of the 2007 IEEE lausanne power tech. Lausanne, Switzerland. <https://doi.org/10.1109/pct.2007.4538363>
33. Zamora, R., & Srivastava, A. K. (2016). Multi-Layer architecture for voltage and frequency control in networked microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(3), 2076–2085. <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2606460>
34. Hong, Y.-Y., & Alano, F. I. (2022). Hierarchical energy management in islanded networked microgrids. *IEEE Access*, 10, 8121–8132. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3143307>
35. Chakraborty, S., & Kar, S. (2023). Hierarchical control of networked microgrid with intelligent management of TCLs: A case study approach. *Electric Power Systems Research*, 224, 109787. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109787>
36. Montilla-DJesus, M., Franco-Mejía, É., Trujillo, E. R., Rodriguez-Amenedo, J. L., & Arnaltes, S. (2021). Coordinated control system between grid-vsc and a DC microgrid with hybrid energy storage system. *Electronics*, 10(21), 2699. <https://doi.org/10.3390/electronics10212699>
37. Babak, V.P., & Kulyk, M.M. (2023). Possibilities and perspectives of the consumers-regulators application in systems of frequency and power automatic regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 4, 72–80. <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.072>

38. Tang, Z., Qin, Y., Jiang, Z., Krawec, W., & Zhang, P. (2020). Quantum-Secure microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(2), 1250–1263. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3011071>
39. Mariam, L., Basu, M., & Conlon, M. F. (2016). Microgrid: Architecture, policy and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.037>
40. Zhou, Q., Shahidehpour, M., Paaso, A., Bahramirad, S., Alabdulwahab, A., & Abusorrah, A. (2020). Distributed control and communication strategies in networked microgrids. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2586–2633. <https://doi.org/10.1109/comst.2020.3023963>
41. Han, Y., Zhang, K., Li, H., Coelho, E. A. A., & Guerrero, J. M. (2018). MAS-Based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: A comprehensive overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(8), 6488–6508. <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2761438>
42. Alam, M. N., Chakrabarti, S., & Ghosh, A. (2019). Networked microgrids: State-of-the-art and future perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3), 1238–1250. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2881540>
43. Pathaka, A. D., & Tembhurne, J. V. (2018). Internet of things: A survey on iot protocols. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3168575>
44. Zhang, C., Wu, J., Zhou, Y., Cheng, M., & Long, C. (2018). Peer-to-Peer energy trading in a Microgrid. *Applied Energy*, 220, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.010>
45. Werth, A., Andre, A., Kawamoto, D., Morita, T., Tajima, S., Tokoro, M., Yanagidaira, D., & Tanaka, K. (2018). Peer-to-Peer control system for DC microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(4), 3667–3675. <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2638462>
46. Gao, J., Asamoah, K. O., Xia, Q., Sifah, E. B., Amankona, O. I., & Xia, H. (2023). A blockchain peer-to-peer energy trading system for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 14(5), 3944–3960. <https://doi.org/10.1109/tsg.2023.3237624>

## REVIEW OF MICROGRID CLUSTER ARCHITECTURES BASED ON DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES

**Pavlo Leshchenko\***, <https://orcid.org/0009-0008-8109-5991>

**Artur Zaporozhets**, Dr.Sc. (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0704-4116>  
General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine

\*Corresponding author: [pavlo@pauliceman.com](mailto:pavlo@pauliceman.com)

**Abstract.** *The integration of distributed energy resources (DERs)—such as wind and solar power plants, cogeneration units, and energy-storage systems, can potentially reduce carbon emissions, improve power quality, and enhance both reliability and energy efficiency. While DER deployment may lessen the need for conventional grid expansion, managing a potentially large number of generation sources poses complex challenges for network operation and secure, efficient control. These challenges can be effectively addressed by microgrids. Microgrids are regarded as one of the most promising solutions for incorporating renewable-based distributed generation into the power system. They strengthen network reliability and resilience by ensuring uninterrupted electricity supply to consumers. The traditional model of energy production and use has evolved toward energy sharing, driven by the growing penetration of DERs. These changes transform passive consumers into active prosumers who not only consume but also exchange surplus electricity generated from DERs with the grid or with other consumers. Over the past decade the microgrid concept has been vigorously explored and developed, and it is now a practical reality. Several microgrids can operate in an interconnected mode, forming a microgrid cluster in which each individual microgrid (or the cluster as a whole) benefits from cooperation. In the coming years the existing power system is expected to transform into one comprising many microgrids. This study analyses scientific publications on microgrid clusters based on DERs, presents results of an assessment of possible cluster architectures, and focuses on control and communication structures and strategies, highlighting their advantages and drawbacks.*

**Keywords:** distributed energy resources, microgrid cluster, microgrid, control, monitoring, architecture, protocol, communication, network.

*Надійшла до редколегії:* 17.03.2025