

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІБРИДНИХ МЕРЕЖ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ОСНОВІ ВДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

**К.С. Гуртовий**, асп.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002

e-mail: [Klymentii.Hurtovyi@ieee.khpi.edu.ua](mailto:Klymentii.Hurtovyi@ieee.khpi.edu.ua)

У роботі розглянуто проблему підвищення ефективності функціонування гібридних мереж розподіленої генерації шляхом удосконалення інформаційно-вимірювального забезпечення. Показано, що ефективне керування такими мережами потребує достовірних, синхронізованих та достатньо деталізованих даних про режими роботи джерел розподіленої генерації, накопичувачів енергії, локальних навантажень та точки приєднання до зовнішньої електричної мережі. На основі аналізу наукових джерел і вимог профільних стандартів обґрунтовано доцільність побудови інформаційно-вимірювального забезпечення, як багаторівневої системи, що включає до себе вимірювання електричних параметрів, перевірку достовірності даних, оцінювання показників якості електроенергії, виявлення позаштатних режимів та передавання узагальненої інформації до системи керування енергетичними потоками мікромережі (EMS) або мікромережевого контролера. Запропоновано структурну організацію такої системи та визначено набір показників, за якими доцільно оцінювати її вплив на ефективність роботи потенційної гібридної мережі. Бібл. 15, рисунок, таблиця.

**Ключові слова:** гібридна мережа, розподілена генерація, інформаційно-вимірювальне забезпечення, мікромережа, моніторинг, EMS мікромережі, якість електроенергії.

**Вступ.** Інтеграція розподілених енергетичних ресурсів у розподільні електричні мережі змінює характер їх функціонування: мережа перестає бути лише пасивним каналом передавання електроенергії від централізованого джерела до споживача і набуває ознак активної системи з двосторонніми потоками потужності. У науковій літературі мікромережі розглядають як локальні електроенергетичні системи, що об'єднують розподілені джерела, накопичувачі та навантаження і можуть працювати, як у приєднаному до мережі, так і в автономному режимі [1, 4]. Для гібридної мережі розподіленої генерації така властивість є дуже важливою, оскільки в її складі можуть одночасно функціонувати відновлювані джерела енергії, електрохімічні накопичувачі, силові електронні перетворювачі та керовані або некеровані навантаження. Узагальнену структурну модель такого інформаційно-вимірювального забезпечення наведено на рисунку.

|                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Об'єкти контролю: джерела РГ   накопичувач енергії   локальні навантаження   силові перетворювачі   точка приєднання / межа автономної роботи        |
| ↓                                                                                                                                                    |
| Вимірювальний рівень: датчики, лічильники, аналізатори ЯЕЕ, DPMU, U, I, f, P, Q, SOC, THD, події                                                     |
| ↓                                                                                                                                                    |
| Комунікаційний рівень: канали моніторингу, оперативного керування та архівних даних; синхронізація часу                                              |
| ↓                                                                                                                                                    |
| Перевірка й обробка даних: фільтрація, валідація, перевірка повноти, синхронізація часових міток, розрахунок похідних показників                     |
| ↓                                                                                                                                                    |
| Аналітичний рівень та підтримка керування: оцінювання режиму, контроль ЯЕЕ, виявлення подій, оцінювання втрат, передавання даних до EMS / контролера |

Узагальнена структурна схема інформаційно-вимірювального забезпечення  
гібридної мережі розподіленої генерації

З огляду на змінність генерації відновлюваних джерел і змінність споживання, ефективність гібридної мережі не може визначатися лише встановленою потужністю джерел або ємністю накопичувачів. Вона значною мірою залежить від якості інформації про поточний режим, стан обладнання, параметри напруги, струму, частоти, активної та



реактивної потужності, а також показників якості електроенергії. Оглядові роботи з керування мікромережами підкреслюють, що керування, система керування енергетичними потоками та моніторинг є взаємопов'язаними функціями, а реалізація централізованих, децентралізованих або ієрархічних стратегій потребує надійного інформаційного забезпечення [2-6].

Метою роботи є обґрунтування структури інформаційно-вимірювального забезпечення, яка створює передумови для підвищення ефективності функціонування гібридних мереж розподіленої генерації за рахунок підвищення достовірності моніторингу, якості оцінювання режиму та підтримки керувальних рішень.

**Постановка проблеми.** Гібридна мережа розподіленої генерації є технічно складною системою, у якій джерела енергії, накопичувачі та навантаження взаємодіють через електричні та інформаційні канали. У такій системі недостатньо вимірювати лише сумарне споживання або потужність у точці приєднання. Для оцінювання поточного стану мережі необхідні дані про режими окремих джерел, стан накопичувача, профіль навантаження, параметри якості електроенергії та режим взаємодії із зовнішньою мережею.

Проблема полягає в тому, що неповна, несинхронізована або недостатньо достовірна вимірювальна інформація знижує якість оцінювання режиму і обмежує можливості системи керування енергетичними потоками мікромережі (Energy Management System, EMS). У роботах, присвячених ієрархічному керуванню мікромережами, виділяють первинні, вторинні і третинні рівні керування, кожен з яких потребує відповідних даних про локальні параметри, відхилення напруги та частоти, а також режими обміну потужністю із зовнішньою мережею [2, 3]. Саме тому інформаційно-вимірювальне забезпечення має розглядатися не як допоміжна частина, а як базова умова реалізації ефективного керування.

У межах цієї роботи під удосконаленням інформаційно-вимірювального забезпечення розуміється не довільне збільшення кількості вимірювальних пристроїв, а раціональне формування набору вимірюваних параметрів, точок контролю, процедур перевірки достовірності даних і способів використання цих даних у системі керування. Такий підхід узгоджується з вимогами IEEE 1547-2018 щодо інтеоперабельності, інформаційного обміну та взаємодії розподілених енергетичних ресурсів з електроенергетичною системою [8], а також з IEEE 2030.7-2017, де мікромережевий контролер визначається через функції керування режимами та переходами між ними [9]. Додатково для формування вимог до якості напруги та методів її вимірювання доцільно враховувати EN 50160 і IEC/EN 61000-4-30 [11, 12], а для опису інформаційного обміну та часової синхронізації IEC 61850-7-420 і IEC/IEEE 61850-9-3 [13, 14].

**Структура інформаційно-вимірювального забезпечення.** Запропонована структура інформаційно-вимірювального забезпечення гібридної мережі розподіленої генерації може бути подана як сукупність п'яти взаємопов'язаних рівнів: вимірювального, комунікаційного, перевірки й обробки даних, аналітичного та рівня підтримки керування. На вимірювальному рівні доцільно контролювати напругу, струм, частоту, активну та реактивну потужність, коефіцієнт потужності, показники гармонічного спотворення, стан заряду накопичувача, потужність заряджання або розрядження, а також параметри генерації та навантаження.

Критичними точками вимірювання є: точка приєднання до зовнішньої мережі, вузли підключення джерел розподіленої генерації, вузол накопичувача енергії, вузли основних груп навантажень і місця встановлення силових електронних перетворювачів. У точці приєднання доцільно контролювати не тільки активну та реактивну потужність, а й показники якості електроенергії. Стандарт IEEE 519-2022 встановлює цілі щодо контролю гармонічних спотворень в електричних системах і пов'язує оцінювання напруги та струму з точкою спільного приєднання [10].

Комунікаційний рівень забезпечує передавання вимірювальної інформації від локальних пристроїв до системи моніторингу або мікромережевого контролера. Для гібридної мережі важливо, щоб вимірювання різних параметрів були узгоджені в часі настільки, наскільки це потрібно для конкретної задачі: оперативного моніторингу, виявлення подій, оцінювання якості електроенергії або формування керувальних дій. У роботах щодо

використання розподільчих синхрофазорних вимірювань показано, що фазорні дані можуть застосовуватися для виявлення подій у мікромережах та відокремлення реальних подій від аномалій вимірювання [7].

Рівень перевірки й обробки даних повинен виконувати фільтрацію некоректних значень, перевірку повноти набору даних, синхронізацію часових міток, розрахунок похідних параметрів і формування узагальнених показників для аналітичного рівня. Саме на цьому етапі доцільно відокремлювати технічні порушення режиму від збоїв вимірювальної системи, оскільки помилкова інтерпретація вимірювань може призвести до неефективних або небажаних керувальних дій.

Аналітичний рівень використовує підготовлені вимірювальні дані для оцінювання режиму мережі, виявлення відхилень, аналізу втрат, контролю якості електроенергії, оцінювання стану накопичувача та підготовки інформації для EMS мікромережі. Енергоменеджмент гібридних відновлюваних систем у літературі пов'язують з координацією потоків енергії, підтриманням живлення навантажень та оптимізацією використання енергоресурсів [5]. Для мікромереж системи енергоменеджменту розглядають як засіб оптимального використання розподілених ресурсів у координований спосіб [6].

Рівень підтримки керування повинен передавати до мікромережевого контролера узагальнену інформацію про поточний стан мережі та допустимі режими роботи. Відповідно до IEEE 2030.7-2017, контролер мікромережі має забезпечувати керування системою, здатною працювати автономно або в приєднаному до мережі режимі, а також виконувати переходи між цими режимами [9]. Отже, інформаційно-вимірювальне забезпечення має бути інтегроване з функціями диспетчеризації джерел, керування накопичувачем, контролю навантаження та взаємодії з точкою приєднання. Система моніторингу повинна розрізняти принаймні два стани: паралельну роботу із зовнішньою електроенергетичною системою та автономний режим. У першому випадку точка приєднання є місцем контролю обміну потужністю та якості електроенергії, у другому – межею електричного відокремлення мікромережі, для якої ключовими стають частота, напруга, баланс потужності та стан комутаційного обладнання.

**Показники оцінювання ефективності.** Підвищення ефективності функціонування гібридної мережі не слід ототожнювати лише зі зменшенням споживання енергії. Для таких систем доцільно оцінювати комплекс показників, які відображають технічний стан мережі, якість електропостачання та можливість коректного керування. До таких показників належать: технічні втрати електричної енергії у внутрішній мережі, зумовлені передаванням активної потужності, або інтегральна оцінка втрат активної потужності за заданий інтервал часу, відхилення напруги у контрольних вузлах, відхилення частоти в автономному режимі, рівень гармонічних спотворень у точці спільного приєднання, швидкість виявлення нештатних режимів, достовірність вимірювальних даних, а також ефективність використання накопичувача енергії.

У таблиці наведено зв'язок між функціональними блоками інформаційно-вимірювального забезпечення та очікуваним впливом на функціонування гібридної мережі. Очікуваний ефект сформульовано якісно, без наведення непідтверджених числових значень, оскільки кількісна оцінка потребує моделювання або експериментальної перевірки для конкретної конфігурації мережі.

**Обговорення результатів.** Запропонований підхід не передбачає твердження, що саме встановлення додаткових вимірювальних засобів автоматично забезпечує підвищення ефективності. Вимірювальна інформація впливає на ефективність лише тоді, коли вона є достатньо повною, достовірною, придатною для обробки та інтегрованою з функціями EMS мікромережі та керування. Тому головним результатом удосконалення є створення інформаційної основи для прийняття обґрунтованих керувальних рішень.

Практична цінність запропонованої структури полягає в тому, що вона дозволяє узгодити вимірювання електричних параметрів з функціями керування гібридною мережею. На відміну від підходу, за якого вимірювання виконуються лише для комерційного обліку або загального спостереження, запропонована структура орієнтована на використання даних у

задачах оцінювання режиму, виявлення подій, контролю якості електроенергії та підтримки диспетчеризації розподілених ресурсів. Водночас ефективність такого підходу залежить не тільки від складу вимірювальних пристроїв, а й від параметрів інформаційних каналів: затримки, втрат пакетів, доступності каналу зв'язку, точності часової синхронізації та сумісності форматів даних між локальними контролерами, засобами моніторингу та EMS.

| Функціональний блок                             | Основні дані                                                                          | Використання в системі                                                                              | Очікуваний ефект                                                         |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Контроль джерел розподіленої генерації          | P, Q, U, I, f, стан перетворювача                                                     | Оцінювання доступної потужності та режиму джерела                                                   | Координація генерації та зменшення невизначеності режиму                 |
| Контроль накопичувача енергії                   | SOC, Pзар/Проз, напруга, струм, стан обмежень                                         | Вибір режиму заряджання або розряджання                                                             | Рациональніше використання накопичувача                                  |
| Моніторинг навантаження                         | Профіль споживання, критичні та некритичні групи                                      | Прогнозування та керування навантаженням                                                            | Покращення балансу потужності                                            |
| Контроль точки приєднання у паралельному режимі | P, Q, U, I, f, напрямок потоків потужності, показники якості електроенергії           | Оцінювання взаємодії із зовнішньою мережею, контроль обміну потужністю та виконання умов приєднання | Підтримка вимог інтероперабельності та якості електроенергії             |
| Контроль межі мікромережі в автономному режимі  | U, f, баланс генерації та навантаження, стан комутаційного апарата, резерв потужності | Підтримання автономного балансу, контроль переходу між режимами та виявлення відхилень              | Підвищення стійкості автономної роботи та коректності керувальних рішень |
| Виявлення подій та аномалій                     | Синхронізовані вимірювання, часові мітки                                              | Розрізнення режимних подій і помилок вимірювання                                                    | Підвищення достовірності керувальних рішень                              |

Обмеженням роботи є те, що кількісні показники підвищення ефективності не можуть бути універсальними для всіх гібридних мереж. Вони залежать від складу джерел, схеми мережі, характеристик накопичувача, структури навантаження, алгоритмів керування та якості каналів зв'язку. Тому подальший розвиток дослідження доцільно спрямувати на побудову імітаційної або експериментальної моделі конкретної гібридної мережі, в якій можна порівняти режими роботи з базовим і вдосконаленим інформаційно-вимірювальним забезпеченням. Для етапу експериментальної перевірки доцільно передбачити тестування функцій мікромережевого контролера з урахуванням підходів IEEE 2030.8-2018 [15].

**Висновки.** Гібридні мережі розподіленої генерації потребують інформаційно-вимірювального забезпечення, яке охоплює не лише точку приєднання до зовнішньої мережі, а й вузли джерел генерації, накопичувачів енергії, силових перетворювачів і основних груп навантажень.

Ефективність функціонування таких мереж залежить від здатності системи отримувати достовірні та узгоджені в часі дані про електричні параметри, якість електроенергії, стан обладнання та режим обміну потужністю із зовнішньою мережею.

Запропонована структура інформаційно-вимірювального забезпечення включає вимірювальний, комунікаційний, обробний, аналітичний і керувальний рівні, що дозволяє використовувати вимірювальні дані як основу для EMS мікромережі та мікромережевого керування.

Кількісне підтвердження підвищення ефективності повинно виконуватися для конкретної схеми гібридної мережі за показниками технічних втрат електричної енергії або інтегральних втрат активної потужності, відхилень напруги та частоти, якості електроенергії, швидкості виявлення нештатних режимів і ефективності використання накопичувача енергії.

1. Ahmed I., Rehan M., Basit A., Ahmad H., Ahmed W., Ullah N., Piecha M., Blazek V., Prokop L. Review on microgrids design and monitoring approaches for sustainable green energy networks. Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Article 21663. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48985-7>
2. Guerrero J.M., Vasquez J.C., Matas J., de Vicuña L.G., Castilla M. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids – A general approach toward standardization. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58. No 1. Pp. 158–172. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
3. Bidram A., Davoudi A. Hierarchical structure of microgrids control system. IEEE Transactions on Smart Grid. 2012. Vol. 3. No 4. Pp. 1963–1976. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2197425>
4. Olivares D.E., Mehriizi-Sani A., Etemadi A.H., Cañizares C.A., Iravani R., Kazerani M., Hajimiragha A.H., Gomis-Bellmunt O., Saeedifard M., Palma-Behnke R., Jiménez-Estévez G.A., Hatziargyriou N.D. Trends in microgrid control. IEEE Transactions on Smart Grid. 2014. Vol. 5. No 4. Pp. 1905–1919. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
5. Olatomiwa L., Mekhilef S., Ismail M.S., Moghavvemi M. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 62. Pp. 821–835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.040>
6. Zia M.F., Elbouchikhi E., Benbouzid M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. Applied Energy. 2018. Vol. 222. Pp. 1033–1055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>
7. Som S., Dutta R., Gholami A., Srivastava A.K., Chakrabarti S., Sahoo S.R. DPMU-based multiple event detection in a microgrid considering measurement anomalies. Applied Energy. 2022. Vol. 308. Article 118269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118269>
8. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. IEEE, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112>
9. IEEE Std 2030.7-2017. IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. IEEE, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8340204>
10. IEEE Std 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9848440>
11. EN 50160:2022. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
12. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. IEC, 2015.
13. IEC 61850-7-420:2021. Communication networks and systems for power utility automation. Part 7-420: Basic communication structure – Distributed energy resources logical nodes. IEC, 2021.
14. IEC/IEEE 61850-9-3:2016. Communication networks and systems for power utility automation. Part 9-3: Precision time protocol profile for power utility automation. IEC/IEEE, 2016.
15. IEEE Std 2030.8-2018. IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers. IEEE, 2018.

## IMPROVING THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF HYBRID DISTRIBUTED GENERATION NETWORKS BASED ON ENHANCED INFORMATION AND MEASUREMENT SUPPORT

**K. Hurtovyi**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,

2, Kirpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine

e-mail: [Klymentii.Hurtovyi@ieee.khpi.edu.ua](mailto:Klymentii.Hurtovyi@ieee.khpi.edu.ua).

*The paper considers the problem of improving the operational efficiency of hybrid distributed generation networks by enhancing their information and measurement support. It is shown that effective operation of such networks requires reliable, time-coordinated and sufficiently detailed data on distributed generation units, energy storage systems, local loads and the point of common coupling with the external power grid. Based on peer-reviewed scientific literature and relevant IEEE standards, the paper substantiates the feasibility of representing information and measurement support as a multi-level system that includes electrical parameter measurement, data validation, power quality assessment, abnormal event detection and the transfer of aggregated information to a microgrid energy management system (EMS) or a microgrid controller. A structural organization of such a system is proposed, and a set of indicators is defined for assessing its influence on the efficiency of hybrid network operation. Ref. 15, figure, table.*

**Keywords:** hybrid network, distributed generation, information and measurement support, microgrid, monitoring, microgrid EMS, power quality.

1. Ahmed I., Rehan M., Basit A., Ahmad H., Ahmed W., Ullah N., Piecha M., Blazek V., Prokop L. Review on microgrids design and monitoring approaches for sustainable green energy networks. Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Article 21663. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48985-7>

2. Guerrero J.M., Vasquez J.C., Matas J., de Vicuña L.G., Castilla M. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids – A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58. No 1. Pp. 158–172. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
3. Bidram A., Davoudi A. Hierarchical structure of microgrids control system. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. No 4. Pp. 1963–1976. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2197425>
4. Olivares D.E., Mehrizi-Sani A., Etemadi A.H., Cañizares C.A., Iravani R., Kazerani M., Hajimiragha A.H., Gomis-Bellmunt O., Saeedifard M., Palma-Behnke R., Jiménez-Estévez G.A., Hatziargyriou N.D. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2014. Vol. 5. No 4. Pp. 1905–1919. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
5. Olatomiwa L., Mekhilef S., Ismail M.S., Moghavvemi M. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 62. Pp. 821–835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.040>
6. Zia M.F., Elbouchikhi E., Benbouzid M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy*. 2018. Vol. 222. Pp. 1033–1055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>
7. Som S., Dutta R., Gholami A., Srivastava A.K., Chakrabarti S., Sahoo S.R. DPMU-based multiple event detection in a microgrid considering measurement anomalies. *Applied Energy*. 2022. Vol. 308. Article 118269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118269>
8. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. IEEE, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112>
9. IEEE Std 2030.7-2017. IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. IEEE, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8340204>
10. IEEE Std 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9848440>
11. EN 50160:2022. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
12. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. IEC, 2015.
13. IEC 61850-7-420:2021. Communication networks and systems for power utility automation. Part 7-420: Basic communication structure – Distributed energy resources logical nodes. IEC, 2021.
14. IEC/IEEE 61850-9-3:2016. Communication networks and systems for power utility automation. Part 9-3: Precision time protocol profile for power utility automation. IEC/IEEE, 2016.
15. IEEE Std 2030.8-2018. IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers. IEEE, 2018.

Надійшла: 13.07.2026

Прийнята: 23.07.2026

Submitted: 13.07.2026

Accepted: 23.07.2026