

Н. П. Савченко<sup>1</sup>, А. В. Трет'як<sup>2</sup>, О. М. Довгалюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

<sup>2</sup>Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

<sup>3</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МОБІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЯК ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ У ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

**Анотація.** Розглянуті особливості побудови локальних електричних мереж з джерелами розосередженої генерації. Проведено аналіз існуючих мобільних електростанцій. Обґрунтовано застосування мобільних електростанцій у якості джерел розосередженої генерації. Проаналізовані перспективи формування локальної електричної мережі microgrid з обраними типами мобільних електростанцій. Сформовано структуру microgrid мережі з мобільними електростанціями. Визначено умови оптимального керування потоками потужності у локальній електричній мережі.

**Ключові слова:** локальна електрична мережа, мобільна електростанція, джерело розосередженої генерації, споживач, система накопичення енергії, електропостачання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасна енергетика потребує нових підходів до побудови енергетичних систем. Якщо раніше основним принципом побудови була глобалізація процесів керування генерацією та розподіленням електричної енергії, то на сьогодні більш перспективною є локалізація цих процесів. Такий підхід повністю змінює структуру енергетичної системи, бо її основними елементами стають джерела розосередженої генерації та накопичувачі електричної енергії, які об'єднуються в інтелектуальній Smart Grid системі або у microgrid системі. Така інтелектуалізація локальної електричної мережі дозволяє інтегрувати роботу всіх її елементів задля забезпечення сталого та надійного електропостачання споживачів. Однією з найбільш вагомих проблем запровадження інтелектуальних електричних мереж є визначення оптимального місця підключення розосереджених джерел генерації та аналіз їх впливу на загальну енергосистему. Джерела розосередженого генерування мають низку переваг, тому перспективи їх активного запровадження в енергетичних системах є лише питанням часу. Проте слід зазначити, що не завжди таке впровадження має позитивний ефект при гібридизації із загальною технічно застарілою енергосистемою, саме при нехтуванні принципами оптимальності може бути отриманий значний негативний вплив на параметри усталеного режиму електричних мереж та їх економічні показники [1-3]. Другою не менш важливою проблемою є обґрунтування впровадження, яке базується на визначенні ефективності та надійності роботи таких систем [4-8]. У кожному конкретному випадку має бути проведений аналіз доцільності запровадження, як з технічної точки зору, так і з економічної.

Відповідно задля рішення поставлених вище проблем науковцями здійснюється пошук методів оптимізації режимів електричних мереж з джерелами розосередженої генерації [9-11]. Запропоновані методи надають можливість математично описати та змоделювати роботу електричних мереж з неоднорі-

дною розосередженою генерацією безпосередньо до їх впровадження, а також забезпечують доволі адекватну оцінку їх доцільності у визначеному для підключення місці. Слід зазначити, що усі розглянуті методики застосовуються при стаціонарному тобто постійному розташуванні джерел альтернативної енергетики. Проте на сьогодні виникла ситуація, яка потребує негайного вирішення новітніми методами питань, обумовлених постійною небезпекою руйнування енергетичних об'єктів та відповідно пов'язаних з нестабільністю роботи енергосистеми і фактично непередбачуваних об'ємів споживання електричної енергії.

Існуючі дослідження не мають однозначного підходу до оцінки ефективності роботи таких локальних електричних мереж з постійно змінюваними потоками потужності у часі та за величиною.

Рішенням може стати застосування швидкодіючих мобільних електростанцій як джерел розосередженої генерації.

Таким чином, актуальним в умовах бойових дій є питання швидкого поновлення електропостачання інфраструктурних об'єктів на час до повного налагодження централізованого електропостачання.

**Мета дослідження.** Теоретичне дослідження перспектив застосування мобільних електростанцій альтернативної енергетики у якості джерел розосередженої генерації.

### Особливості побудови локальних електричних мереж з джерелами розосередженої генерації

Тенденція розповсюдження альтернативної енергетики призвела до зовсім нових принципів побудови енергосистем. Розвиток напряму розосередженої генерації та локалізації керування режимами електричних мереж останнім часом знаходиться на новому витку технічного прогресу в енергетичній галузі. Перебудова енергосистем веде до повної децентралізації електропостачання споживачів. Загальна структура новітніх енергосистем на сьогодні має вигляд, наведений на рис. 1 [12].



Рис. 1. Електричні мережі децентралізованої енергосистеми [12]

Оптимізація і відповідно підвищення ефективності роботи електричних мереж децентралізованої енергетичної системи повністю залежить від методів розподілення навантаження між генеруючими об'єктами та зниження втрат потужності при передачі від них до споживача. При цьому слід враховувати необхідність керування потоками енергії у системі.

Таким чином, можна констатувати, що інтелектуалізація локальних мереж і принцип керування «з нижніх рівнів системи електропостачання до вищих» – це майбутнє енергетичних систем.

Принципи реалізації інтелектуальних електричних мереж вимагають впровадження вдосконалених автоматизованих систем моніторингу, керування та захисту, що виключають вплив людського фактору на їх роботу. Така оптимізація керування енергосистемою знижує ймовірність виникнення аварійних режимів роботи та підвищує її надійність.

Перехід на технології Smart Grid в енергетиці потребує постійного розвитку та впровадження сучасних засобів підтримки балансу між генерацією і споживанням електроенергії на базі сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологій, а також впровадження засобів контрольованого перетворення електроенергії [13].

Цікавим, з практичної точки зору, є прояв Smart Grid у вигляді так званих мікромереж (microgrid). Фактично microgrid представляє собою групу джерел і споживачів електроенергії, яка підключена до традиційної електромережі, але може за потреби функціонувати автономно [13]. Особливим і дуже важливим напрямом розвитку локальних електричних мереж Smart Grid є впровадження систем накопичення енергії. Вони можуть бути побудовані за різними технологіями та виступати як додаткові джерела генерації в час пікового споживання електроенергії, що дозволить дотримуватися економічних режимів роботи усіх видів електростанцій наявних в енергосистемі. Таким чином, побудова енергетичних систем, що базуються на принципах інтелектуалізації мереж, повинні мати у своєму складі наступні компоненти:

- 1) джерела традиційної та альтернативної розосередженої генерації;
- 2) системи накопичення електроенергії;
- 3) автоматизовану систему керування, моніторингу та захисту, побудовану на базі сучасних мікропроцесорних технологій.

### Принципи формування локальної електричної мережі microgrid з мобільними електростанціями

Мобільні електростанції мають досить широкий діапазон потужностей і фактично основним їх призначенням є забезпечення електропостачання у кризових ситуаціях, коли не має можливості підключення до загальної електромережі. Втім таке обмеження є недоцільним, бо можливості мобільних електростанцій значно ширші і повинні бути використані повною мірою.

Повна класифікація мобільних електростанцій, наведена на рис. 2, дає уявлення щодо визначення повного спектру можливостей їх застосування.

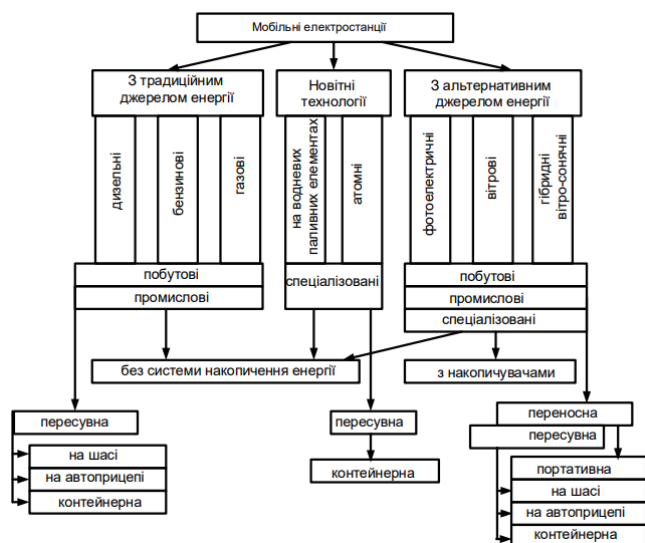
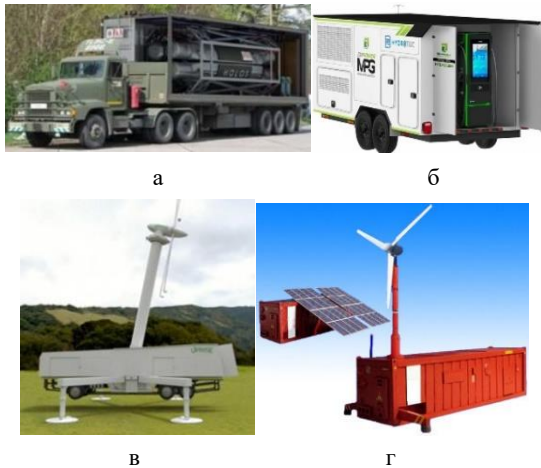


Рис. 2. Класифікація мобільних електростанцій [14]

Широка номенклатура мобільних електричних станцій, що наведена на рис. 2, дає можливість задовільнити вимоги як побутових, так і промислових споживачів. Особливої уваги заслуговують потужні електростанції, побудовані за новітніми технологіями та з альтернативними джерелами енергії, бо вони можуть бути використані як джерела розосередженої генерації, а їх мобільність дозволить швидко вирішувати усі питання з електропостачанням у будь-якій точці локальної електричної мережі, а також підвищить надійність та ефективність роботи такої

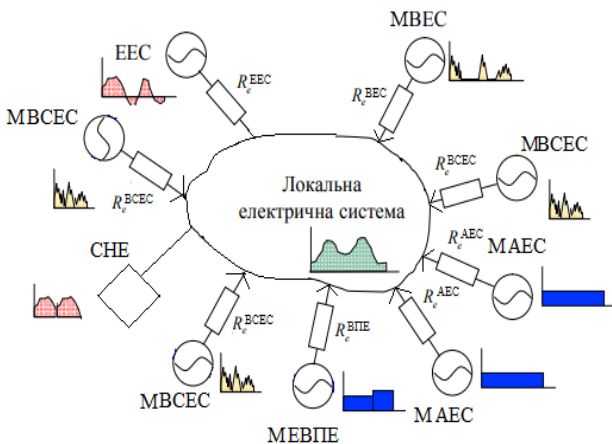
мережі за рахунок її розвантаження та керування потоками електричної енергії. Також слід зазначити, що ці види електростанцій не впливають на навколишнє середовище. Більш доцільним буде застосування таких електростанцій у розподільчих мережах низької напруги до 1000 В. Безпосереднє встановлення мобільних електростанцій поблизу споживачів сприятиме зниженню рівня втрат електроенергії, що виникають при її передачі.

Найкращі рішення мобільних електростанцій, що можуть бути застосовані у якості джерел розосередженої генерації, наведені на рис. 3.



**Рис. 3.** Мобільні електростанції: а – атомна; б – на водневих паливних елементах; в – вітрова; г – гібридна вітро-сонячна

Наведені на рис. 3 конструкції мобільних електростанцій можуть бути оснащені системами зберігання енергії, що підвищують їх надійність та енергоефективність. Загальна структура локальної електричної мережі microgrid з мобільними електростанціями наведена на рис.4.



**Рис. 4.** Структура microgrid з мобільними електростанціями

Структура такої електричної мережі microgrid може мати різні конфігурації і підключення мобільних електростанцій може здійснюватися або безпосередньо до окремого споживача, або на шини низької напруги трансформаторної підстанції. Представлена на рис. 4 локальна електрична мережа microgrid є особливо ефективною в умовах забезпечення на-

дійного електропостачання об'єктів критичної інфраструктури.

Рівномірний графік генерації забезпечують мобільні атомні електростанції (МАЕС), але вартість таких електростанцій та небезпечність ускладнюють їх запровадження [15].

Мобільні електростанції на водневих паливних елементах (МВВПЕ) мають можливість швидко розвивати саме ту потужність, яка потрібна споживачу в той чи інший момент часу, і вони безпечні для навколишнього середовища, але їх виробництво ще не набуло масовості [16].

Мобільні вітрові (МВЕС) і вітро-сонячні (МВЕСЕС) електростанції мають найбільше розповсюдження та мають перевірнену технологію реалізації, тому саме вони можуть зайняти перше місце у запровадженні в локальній електричній мережі microgrid.

Система накопичення електричної енергії (СНЕ) може бути вбудованою безпосередньо у складі мобільної електростанції або окремим блоком під'єднана до локальної електричної мережі. У разі якщо система накопичення має стаціонарне підключення, то у цьому випадку її розташування буде доцільним якнайближче до підстанції енергосистеми задля зменшення втрат електричної енергії.

Баланс між генерацією і споживанням електроенергії у наведеній на рис.4 системі можна представити виразом:

$$P_{СПОЖ} = P_{ЕЕС} + \sum P_{МЕС} \pm P_{СНЕ}, \quad (1)$$

де  $P_{СПОЖ}$  - потужність споживачів;  $P_{ЕЕС}$  - потужність, отримана з енергосистеми;  $\sum P_{МЕС}$  - потужність підключених мобільних електростанцій, значення якої визначається наступним чином:

$$\sum P_{МЕС} = n_1 P_{МВЕС} + n_2 P_{МАЕС} + n_3 P_{МВЕСЕС} + n_4 P_{МВВПЕ}, \quad (2)$$

де  $P_{СНЕ}$  - потужність систем накопичення енергії;  $n_1, n_2, n_3, n_4$  - кількість підключених мобільних електростанцій відповідно за видами;  $P_{МВЕС}$  - потужність МВЕС;  $P_{МАЕС}$  - потужність МАЕС;  $P_{МВЕСЕС}$  - потужність МВЕСЕС;  $P_{МВВПЕ}$  - потужність МВВПЕ.

У години мінімального споживання баланс системи має вигляд:

$$\begin{cases} P_{СПОЖ} = P_{ЕЕС} - P_{СНЕ}, & \text{при } P_{СНЕ} \leq 0,3P_{НЕ} \\ P_{СПОЖ} = P_{ЕЕС} + P_{СНЕ}, & \text{при } P_{СНЕ} \geq 0,95P_{НЕ} \end{cases}, \quad (3)$$

де  $P_{НЕ}$  - повна потужність накопичувачів електричної енергії; при автономному режимі роботи локальної мережі:

$$P_{СПОЖ} = \sum P_{МЕС} \pm P_{СНЕ}. \quad (4)$$

Таким чином, інтелектуальне керування потоками потужності у локальній електричній мережі microgrid з мобільними електростанціями відбувається фактично за умовами виконання рівнянь (1) - (4).

Критерієм оптимальності роботи мобільних електростанцій в локальній енергосистемі може бути мінімум електроенергії, яка споживається з енергосистеми.

### Висновки

Проведено аналіз принципів побудови локальних електричних мереж з джерелами розосередженої генерації. Проаналізовані типи існуючих мобіль-

них електростанцій та перспектив їх застосування у якості джерел розосередженої генерації, а також наведено структуру microgrid з мобільними електростанціями. Визначено умови оптимального керування локальною електричною мережею microgrid. Отримані результати теоретичного дослідження є основою для подальшого проведення моделювання процесів у наведеній структурі microgrid.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гончаренко І. С. Окремі питання підвищення ефективності методу розв'язання задачі визначення оптимальних місць встановлення та потужності розосередженої генерації / І. С. Гончаренко // Праці Інституту електродинаміки Національної академії Наук України. – 2015. – № 42. – С. 47-51.
2. Савватєєв А. Методика прийняття рішень на основі нечіткої логіки для визначення оптимального місця підключення розосереджених джерел генерації. *Актуальні наукові дослідження в сучасному світі*. 2018. № 1 (7(39)). С.122-129.
3. Кузьмич О. В. Аналіз впливу розосередженого генерування на режим роботи розподільних електричних мереж / О. В. Кузьмич, В. О. Комар // Вісник НТУУ «КПІ». – 2014. – № 25. – С.108-113.
4. Лежнюк П. Д. Вплив розосередженого генерування на надійність роботи електричних мереж / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, І. В. Котилко // Вісник НТУ «ХП»: "Нові рішення в сучасних технологіях". – 2018. – № 45(1321). – С.25-31.
5. Зайцев Є. О. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустаткування / Є. О. Зайцев, В. В. Кучанський, І. О. Гунько // GrailofScience. – 2021. – №5. – С.144-152.
6. Shevchenko S. Comparative Analysis of Energy Efficiency of Geometric Constructions Solar Low-Power Plants / S. Shevchenko, N. Savchenko and others // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology, Kharkiv, 2023, pp. 1-6.
7. Savchenko N. Improving the Energy Efficiency of Small Hydropower Plants by Connecting an Energy Saving System with Kinetic Energy Storage / N. Savchenko, O. Dovgalyuk, A. Tretiak, T. Syromyatnikova // 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-6.
8. Abdeerahim F. A. Analysis of electricity network modes with renewable energy sources / F. A. Abdeerahim, O. M. Dovgalyuk, M. M. Samy / Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2021)». - Харків : «Друкарня Мадрид». - 2021. – С. 10-11.
9. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 174 с.
10. Журахівський А. В. Оптимізація режимів електроенергетичних систем : навч. посіб. / А. В. Журахівський, А. Я. Яцейко. – 2-ге вид., випр. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 140 с.
11. Dovgalyuk O. Optimisation of Operating Modes of Distribution Electric Networks in Ukraine / O. Dovgalyuk, N. Savchenko and others // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-6.
12. Nadeem T. B. Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies / T. B. Nadeem, M. Siddiqui, M. Khalid, M. Asif // Energy Strategy Reviews. – 2023. – No. 48. – P. 1–23.
13. Power grids will become “smart” home page [Electronic resource] // Power grids will become “smart” home page. – Mode of access: <https://ua-energy.org/en/posts/13-01-2021-64d17276-10c7-4863-89d0-ca2367ad58ce>
14. Савченко Н. П. Аналіз ефективності застосування мобільних автономних електростанцій в умовах критичного стану енергетичної інфраструктури. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. 2022. №2(27). С.15-19.
15. Saukh S. Mathematical Model of a Local Grid with Small Modular Reactor NPPs / S. Saukh, A. Borysenko // Ядерна та радіаційна безпека. – 2022. – №2(94). – P.44-52.
16. Михайлів М. І. Створення локальних джерел електроенергії на базі паливних комірок / М. І. Михайлів, П. В. Савуляк // Нафтогазова енергетика. – 2012. – №1(17). – С.101-112.

Received (Надійшла) 19.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

### Perspectives of application of mobile power plants as sources of distributed generation in local electrical networks

Natalia Savchenko, Andrii Tretiak, Oksana Dovgalyuk

**Abstract.** The article considers the peculiarities of building local electric networks with sources of distributed generation, which are one of the most priority links for the development of modern energy systems. In such systems, sources of distributed generation and electric energy storage are combined in an intelligent Smart Grid system or microgrid system. The intellectualisation of the local electric network allows to integrate the work of all its elements to ensure sustainable and reliable power supply to consumers. An analysis of existing mobile power plants was carried out to identify the possibilities of their use as sources of distributed generation. Based on the analysis, it is found that mobile power plants built on the basis of the latest technologies or renewable energy technologies have the best prospects for implementation as such sources. A general structure for the formation of a local microgrid with selected types of mobile power plants is proposed, which can have different configurations, with mobile power plants being connected either directly to an individual consumer or to the low voltage buses of a transformer substation. The presented microgrid is particularly effective in ensuring reliable power supply to critical infrastructure facilities. The conditions for optimal control of power flows in a local electric network are determined. The transition to Smart Grid and microgrid technologies in the energy sector requires continuous development and implementation of modern means of maintaining the balance between electricity generation and consumption based on modern information and telecommunication technologies, as well as the introduction of controlled power conversion. The peculiarity of the microgrid system is that it can function autonomously if necessary. The obtained results of the theoretical study are the basis for further modelling of processes in the given microgrid structure.

**Keywords:** local electric network, mobile power station, source of distributed generation, consumer, energy storage system, power supply.