

4. Ali Naci Celik, Nasır Acikgoz. (2007). Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. Applied Energy, Volume 84, Issue 1, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.04.007>.
5. Фотоенергетика. Частина I. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі [Електронний ресурс]: підручник / О. Ю. Гаєвський. – Електрон. текстові дані (1 файл: 5,57 Мб). – Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. – 150 с. – Назва з екрана. URL: <https://ela.kpi.ua/items/59eff7d9-0384-4526-b36a-fb3ee6e3b239> (дата звернення: 10.11.2025)
6. W. De Soto et al. (2006) Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, Solar Energy, vol 80, pp. 78-88.
7. Faiman, D. (2008). Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. Progress in Photovoltaics 16(4): 307-315.

УДК 621.311.24

Ю.А. Папаїка<sup>1</sup>, В.С. Пушков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ МІКРОМЕРЕЖАМИ З ВДЕ

**Анотація.** Робота присвячена підходам до створення інтелектуальних мікромереж з ВДЕ для підвищення автономності та надійності критичної інфраструктури шляхом застосування прогнозних моделей та цифрових технологій.

**Ключові слова:** інтелектуальні мікромережі, критична інфраструктура, відновлювальні джерела енергії, енергетичні накопичувачі, прогнозування навантаження, енергетична безпека, автономна робота.

Стрімкий розвиток відновлювальних джерел енергії та необхідність забезпечення високого рівня надійності критично важливих об'єктів формують підґрунтя для створення інтелектуальних електричних мікромереж нового покоління. Сучасні вимоги до енергетичної незалежності, гнучкості та стійкості інфраструктури зумовлюють потребу у впровадженні автономних енергетичних систем, здатних ефективно функціонувати в умовах нестабільності централізованих мереж. Особливої **актуальності** ця проблематика набуває у зв'язку зі зростанням частки ВДЕ, які, попри екологічні та економічні переваги, характеризуються стохастичною природою та потребують застосування методів прогнозування, оптимізації й автоматизованого керування [1].

**Метою** даної роботи є дослідження концепцій побудови інтелектуальних мікромереж з використанням ВДЕ, оцінка їх ефективності в умовах автономної роботи та обґрунтування переваг застосування цифрових і прогнозних технологій для забезпечення стійкості критичної інфраструктури. **Об'єктом дослідження** виступає інтелектуальна електрична мікромережа як система, що поєднує генерацію, накопичення, розподіл енергії та інтелектуальні моделі

керування. Предметом дослідження є процеси прогнозування, оптимізації та автономного функціонування мікромережі при високій частці ВДЕ та нерівномірних режимах навантаження.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі **задачі**:

- аналіз сучасного стану та перспектив розвитку інтелектуальних мікромереж для об'єктів критичної інфраструктури;
- дослідження методів прогнозування генерації та споживання електроенергії на основі машинного та глибинного навчання;
- оцінка ефективності технологій оптимального керування накопичувачами енергії;
- вивчення потенціалу мультиагентних систем для підвищення автономності й живучості мікромережі;
- аналіз відмовостійкості в умовах ізоляції від централізованої мережі [1-2].

Інтелектуальні мікромережі дають можливість інтегрувати ВДЕ з накопичувачами та адаптивними системами споживання в єдиний цифровий енергетичний контур. Одним із ключових напрямів розвитку таких систем є поєднання генерації з передовими технологіями акумулювання, які забезпечують можливість балансування енергопотоків і підтримання стабільної роботи у випадку обмеження або повної втрати зовнішнього електроживлення. Ефективна експлуатація цих накопичувачів потребує застосування алгоритмів оптимального керування, що враховують режими заряджання й розряджання, деградаційні процеси та пріоритетність живлення критичних споживачів [1].



LSTM/LSTM-CNN/Random Forest

Рис. 1. Обрана концепція керування даними у системі ВДЕ-інтелектуальні мережі

Цифрова інфраструктура інтелектуальних мікромереж базується на використанні численних IoT-сенсорів, що фіксують параметри роботи системи в реальному часі, такі як: рівень генерації, споживання, погодні умови, температуру обладнання та можливі відхилення у його роботі. На основі цих даних застосовуються сучасні алгоритми штучного інтелекту, які дають змогу прогнозувати генерацію енергії та навантаження з високою точністю. До таких алгоритмів належать моделі, орієнтовані на роботу з часовими рядами (наприклад, LSTM), комбіновані моделі глибинного навчання (етап обробки зображень або сигналів може виконуватися за допомогою CNN), а також підходи, що об'єднують багато простіших моделей у одну узгоджену систему для покращення точності прогнозу. Особливо важливим напрямом стає застосування методів підкріплювального навчання, які дозволяють мікромережі самостійно підбирати оптимальні алгоритми керування енергетичними потоками й адаптуватися до змін у зовнішніх умовах без ручного втручання.

Мультиагентні системи відіграють ключову роль в інтелектуальних мікромережах, оскільки дозволяють кожному елементу – генератору, накопичувачу, споживачу чи сенсору – працювати як автономному агенту з власною логікою дій. Такий підхід підвищує стійкість мікромережі, зменшує залежність від центрального контролера та забезпечує швидку реакцію на аварійні ситуації, що особливо важливо для критичної інфраструктури.

Забезпечення кібербезпеки є одним із найскладніших завдань інтелектуальних мікромереж, оскільки цифровізація відкриває нові вектори атак. Для стабільної роботи потрібні системи виявлення аномалій, захист комунікацій та сегментація мережі для локалізації загроз. Особливо важливим є режим ізольованої роботи, коли мікромережа повинна самостійно підтримувати частоту, напругу та баланс генерації й споживання за обмежених ресурсів.

**Висновки.** Інтелектуальні мікромережі з ВДЕ є ключовим напрямом розвитку енергетики, забезпечуючи автономність, стійкість і гнучке енергопостачання для об'єктів критичної інфраструктури. Їхнє впровадження підвищує енергетичну безпеку та зменшує залежність від централізованих мереж, що особливо важливо в умовах нестабільності. Подальші дослідження мають зосереджуватися на покращенні прогнозних алгоритмів, підвищенні відмовостійкості й створенні універсальних платформ мультиагентного керування для інтеграції різнорідних компонентів у єдиний інтелектуальний енергетичний комплекс.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Інноваційні джерела енергії: навч. посіб. / О.О. Азюковський, Д.В. Циценков, О.В. Бобров, Н.С. Дрешпак, С.І. Федоров; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ "ДП", 2024. – 336 с.
2. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання: підруч. / Клименко В. В., Солдатенко В. П., Плешков С. П., Скрипник О. В., Саченко А.І.; – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький :, 2023. – 268с.