

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ МУЛЬТИСЕНСОРНОГО ЗЛИТТЯ ДАНИХ У SMART GRID

Лось І.В. – магістрант, loslos492@gmail.com

Павленко В.М. – к.т.н., доцент, v.pavlenko@nubip.edu.ua

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Метою роботи є підвищення надійності та ефективності керування розподільчими електричними мережами шляхом розроблення та впровадження системи мультисенсорного злиття даних у середовищі Smart Grid.

Актуальність дослідження. Децентралізація енергосистем та інтеграція розподіленої генерації створюють нові виклики для управління розподільчими мережами. Традиційні системи моніторингу не забезпечують достатньої точності та оперативності для прийняття управлінських рішень. Технології мультисенсорного злиття (sensor fusion) дозволяють об'єднувати дані з різних типів датчиків – фазорних вимірювальних пристроїв (PMU), систем SCADA, інтелектуальних лічильників та IoT-сенсорів – для отримання більш повної та достовірної інформації про стан мережі [2, 3].

Теоретичні основи. Smart Grid представляє собою інтелектуальну енергосистему з двостороннім потоком енергії та інформації, яка забезпечує ефективну інтеграцію відновлювальних джерел енергії та активних споживачів [1, 4]. Застосування розподілених баз даних та технологій блокчейн у поєднанні зі штучним інтелектом відкриває нові можливості для децентралізованого керування енергосистемами, забезпечуючи прозорість, безпеку та ефективність транзакцій енергії [4, 5].

Мультисенсорне злиття – це процес інтеграції даних з множини сенсорів для отримання більш точної, надійної та повної інформації, ніж може забезпечити будь-який окремий сенсор. Основні методи злиття включають фільтр Калмана та його модифікації (EKF, UKF), байєсівські мережі, нечітку логіку, методи машинного навчання (CNN, LSTM, GAN) [2, 3].

Архітектура системи мультисенсорного злиття реалізована у вигляді багаторівневої структури, яка забезпечує системну інтеграцію та обробку різнорідних потоків даних (рис. 1). На першому рівні здійснюється надходження інформації від різних типів сенсорів, включаючи PMU, SCADA, smart meters і IoT-пристрої, що дозволяє формувати цілісне уявлення про поточний стан мережі. Другий рівень передбачає попередню обробку отриманих даних шляхом їх синхронізації, фільтрації та стиснення, що оптимізує подальшу аналітику та знижує інформаційне навантаження. Третій

рівень забезпечує формування єдиного ознакового простору на основі алгоритмів глибокого навчання, серед яких особливу роль відіграють згорткові нейронні мережі. На четвертому рівні здійснюється прийняття рішень щодо діагностики стану, прогнозування навантаження та оптимізації режимів роботи мережі із застосуванням інтелектуальних алгоритмів.

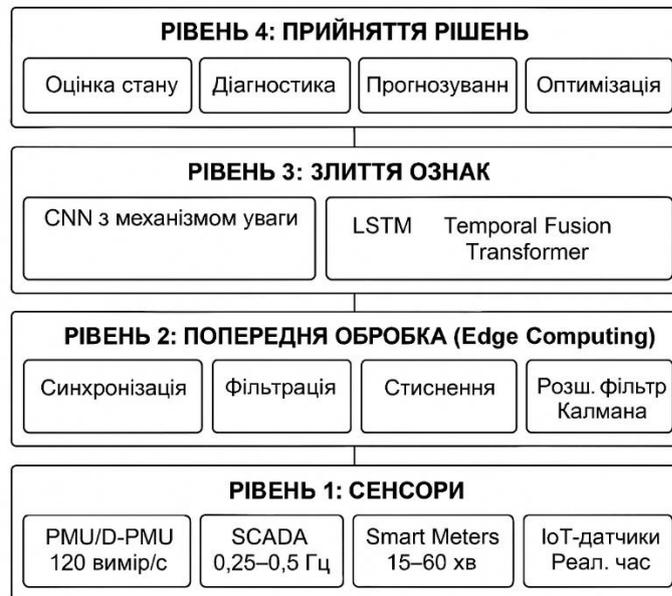


Рисунок 1 – Архітектура системи мультисенсорного злиття даних

Розроблені алгоритми злиття даних. Для об'єднання вимірювань PMU та SCADA запропоновано гібридний оцінювач стану на основі розширеного фільтра Калмана з адаптивною синхронізацією різних частот дискретизації. Для виявлення несправностей розроблено метод на основі згорткових нейронних мереж з механізмом уваги, що досягає точності виявлення дефектів 90,1% при швидкості обробки в реальному часі. Для прогнозування навантаження застосовано архітектуру Temporal Fusion Transformer, що ефективно інтегрує часові ряди з різних джерел даних.

Практична реалізація системи виконана з використанням відкритих протоколів комунікації (OPC-UA, MQTT) для забезпечення інтероперабельності різних типів обладнання. Програмне забезпечення розроблено на мові Python з використанням бібліотек TensorFlow, PyTorch для алгоритмів машинного навчання та NumPy, SciPy для числових обчислень. Інтеграція з існуючими SCADA-системами виконана через стандартні інтерфейси.

Результати дослідження. Порівняльний аналіз роботи розподільчої мережі з системою мультисенсорного злиття та без неї (табл. 1) показав значне покращення всіх ключових показників надійності та ефективності.

Таблиця 1 – Порівняльні показники ефективності

Показник	Традиційна система	Система з мультисенсорним злиттям	Покращення
Точність оцінки стану мережі, %	70-75	95-100	+25-30%
Час виявлення несправностей, хв	15-20	2-3	-85%
Кількість помилкових спрацювань, %	100 (базова)	65	-35%
Тривалість провалів напруги, %	100 (базова)	60	-40%
Технічні втрати електроенергії, %	100 (базова)	88-92	-8-12%

Найбільш значущі результати досягнуто у швидкості виявлення несправностей (скорочення з 15-20 хвилин до 2-3 хвилин, тобто на 85%), що критично важливо для підвищення надійності електропостачання. Підвищення точності оцінки стану мережі на 25-30% дозволяє приймати більш обґрунтовані управлінські рішення. Зменшення кількості помилкових спрацювань на 35% знижує навантаження на оперативний персонал та зменшує непродуктивні відключення споживачів.

Впровадження системи мультисенсорного злиття для типової розподільчої мережі 10-35 кВ з підключеним навантаженням 50 МВт вимагає інвестицій близько 2,5-3,0 млн грн (додаткові PMU/D-PMU, комунікаційне обладнання, програмне забезпечення). Економічний ефект від зниження втрат електроенергії становить близько 500-600 тис. грн/рік, від скорочення часу перерв електропостачання – 150-200 тис. грн/рік. Загальний термін окупності проекту – 4-5 років.

Враховуючи збільшення кількості підключених IoT-пристроїв, розроблено комплекс заходів захисту: шифрування даних (TLS 1.3), аутентифікація пристроїв за допомогою цифрових сертифікатів, виявлення аномалій на основі машинного навчання. Застосування технології blockchain для забезпечення цілісності даних агрегації створює децентралізовану, прозору та захищену інфраструктуру для управління енергетичними ресурсами [4, 5]. Синергія блокчейну та штучного інтелекту забезпечує автоматизовану координацію розподілених енергетичних ресурсів, оптимізацію потоків енергії та підвищення загальної ефективності системи.

Подальше вдосконалення системи передбачає інтеграцію з технологіями цифрових двійників (Digital Twin) для створення віртуальної моделі розподільчої мережі, що автоматично оновлюється даними в реальному часі. Розглядається застосування федеративного навчання для забезпечення конфіденційності даних при навчанні розподілених моделей машинного

навчання на різних ділянках мережі без централізованого збору чутливої інформації. Перспективним напрямком є розвиток технології розумних енергосистем із застосуванням розподілених баз даних, що забезпечують масштабованість, відмовостійкість та децентралізоване прийняття рішень .

Висновок. Розроблена система мультисенсорного злиття даних для Smart Grid забезпечує значне підвищення надійності (скорочення часу виявлення несправностей на 85%), ефективності (зниження втрат на 8-12%) та якості електропостачання (зменшення тривалості провалів напруги на 40%) в розподільчих мережах. Застосування сучасних алгоритмів обробки даних, включаючи методи глибокого навчання та технології розподілених баз даних, дозволяє ефективно інтегрувати гетерогенну інформацію з різних джерел для прийняття оптимальних управлінських рішень в реальному часі. Інтеграція блокчейну та штучного інтелекту забезпечує додаткові переваги у сфері кібербезпеки, децентралізованого керування та прозорості енергетичних транзакцій. Техніко-економічний аналіз підтверджує доцільність впровадження розробленої системи в сучасних електричних мережах з терміном окупності 4-5 років.

Список використаних джерел:

1. Digitalization Processes in Distribution Grids: A Comprehensive Review of Strategies and Challenges / A. Kumar et al. // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 11. – P. 4528. DOI: 10.3390/app14114528
2. Power System State Estimation Based on Fusion of PMU and SCADA Data / Y. Zhang et al. // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 11. – P. 2609. DOI: 10.3390/en17112609
3. Research on State Estimation of Distribution Networks Based on Multi-source Data Fusion Technology with PMU Measurement / L. Wang et al. // *IEEE Access*. – 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3254321
4. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Ponomarenko D., Danylchenko D. Synergy of Blockchain and Artificial Intelligence for Decentralized Smart Energy Management // *Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*. – Vol. 1480. – Springer, Cham, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-95191-6_18
5. Павленко В. М., Воляник О. Ю., Пономаренко І. В., Данильченко Д. О. Дослідження перспектив розвитку технології «розумних енергосистем» із застосуванням розподілених баз даних // *Енергетика і автоматика*. – 2024. – № 5. – С. 66–76. DOI: 10.31548/energiya5(75).2024.066
6. Fault Detection in Power Distribution Networks Based on Comprehensive-YOLOv5 / X. Chen et al. // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 14. – P. 6410. DOI: 10.3390/s23146410