

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА КІБЕРСТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Батієнко Б.О. – магістрант, eee25-b.batiienko@nubip.edu.ua

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

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Метою роботи є розробка методології оцінки надійності електроенергетичних систем з інтегрованими відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) в умовах нестабільного енергопостачання з використанням ймовірнісних методів, моделювання Монте-Карло та показників SAIDI/SAIFI для забезпечення безперебійності та якості електропостачання споживачів.

Актуальність дослідження. В умовах масованих ракетних ударів по енергетичній інфраструктурі України та зростання частки інтермітентних відновлюваних джерел енергії у загальному енергобалансі, оцінка надійності електропостачання набуває критичного значення. Інтеграція фотоелектричних систем та вітрогенераторів у розподільні мережі створює нові виклики через стохастичний характер генерації, що вимагає розробки спеціалізованих методів аналізу надійності з урахуванням багатофакторної невизначеності [1].

Роль смарт-технологій у підвищенні надійності та ефективності електричних мереж полягає у забезпеченні real-time моніторингу стану обладнання, предиктивного обслуговування та автоматичної реконфігурації мережі при аваріях. Дослідження показують, що впровадження розподіленої генерації на основі ВДЕ може як підвищити надійність (через диверсифікацію джерел), так і знизити її (через збільшення складності системи та необхідність координації роботи множини генераторів) залежно від архітектури системи та алгоритмів керування.

Функціональні можливості системи оцінки надійності електроенергетичних систем з ВДЕ наведені в табл.1.

Система використовує комплексний підхід, що поєднує аналітичні методи, ймовірнісне моделювання та статистичний аналіз історичних даних.

Аналіз історичних даних відмов обладнання за останні 5-10 років дозволяє визначити параметри надійності: MTBF (Mean Time Between Failures) – середній час між відмовами; MTTR (Mean Time To Repair) – середній час відновлення; λ – інтенсивність відмов (failures/year). Для повітряних ліній 10 кВ типові значення: MTBF = 1-3 роки/100 км, MTTR = 2-8 годин [1].

Таблиця 1 – Функціональні модулі системи оцінки надійності електроенергетичних систем з ВДЕ

Функціональний модуль	Компоненти	Призначення та можливості
Збір даних та моніторинг	SCADA-система, розумні лічильники, PMU (Phasor Measurement Units), датчики стану обладнання	Real-time моніторинг частоти, напруги, струмів, генерації ВДЕ, навантажень; збір історичних даних відмов за 5-10 років для статистичного аналізу
Моделювання генерації ВДЕ	Метеомоделі (сонячна радіація, швидкість вітру), стохастичні генератори, Monte Carlo симуляції	Ймовірнісне моделювання генерації ФЕС та вітрових електростанцій з урахуванням сезонності, добових циклів та погодних аномалій
Аналіз відмов обладнання	База даних надійності (MTBF, MTTR), дерева відмов (Fault Tree Analysis), FMEA	Статистичний аналіз частоти та тривалості відмов трансформаторів, ліній, інверторів, комутаційного обладнання; визначення критичних елементів
Розрахунок показників надійності	Алгоритми обчислення SAIDI, SAIFI, CAIDI, ASAI, ENS	SAIDI (System Average Interruption Duration Index) – середня тривалість перерв; SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) – середня частота перерв; ENS (Energy Not Supplied) – недопоставлена енергія
Оцінка резервування	Модулі аналізу систем накопичення енергії (БСНЕ), резервних генераторів, N-1 критерій	Оцінка достатності резервів потужності для компенсації аварійних відключень та інтермітентності ВДЕ; аналіз сценаріїв одночасних відмов
Предиктивна аналітика	ML-моделі (Random Forest, XGBoost), прогнозування відмов обладнання	Раннє виявлення деградації трансформаторів, кабелів, інверторів на основі аналізу температури, вібрацій, часткових розрядів; планування превентивного ремонту
Кібербезпека	Системи виявлення кібератак, захист SCADA, резервування критичних вузлів	Оцінка вразливості системи до кібератак на диспетчерські центри, підстанції, інтелектуальні лічильники; розробка протоколів відновлення після атак
Сценарний аналіз	Monte Carlo симуляції, аналіз "що-якщо", стрес-тести	Моделювання екстремальних сценаріїв (масовані атаки, природні катаклізми, каскадні аварії) для оцінки граничної стійкості системи

Через стохастичний характер генерації ВДЕ використовується ймовірнісне моделювання на основі 10000+ симуляцій . Для кожної години року генерується випадкова генерація ФЕС на основі розподілу Beta (для моделювання хмарності) та вітру на основі розподілу Weibull (для моделювання швидкості вітру). Це дозволяє оцінити ймовірність дефіциту потужності:

$$P(P_{gen} + P_{grid} < P_{load})$$

Система обчислює стандартизовані індекси надійності згідно IEEE 1366:

SAIDI (System Average Interruption Duration Index) – середня тривалість перерв на одного споживача за рік (хв/рік):

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{N_{total}}$$

де U_i – тривалість i -ї перерви, N_i – кількість постраждалих споживачів, N_{total} – загальна кількість споживачів.

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) – середня частота перерв на одного споживача за рік (перерв/рік):

$$SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_{total}}$$

ENS (Energy Not Supplied) – недопоставлена енергія (МВт·год/рік) – критичний показник економічних втрат споживачів.

Метод Fault Tree Analysis (FTA) визначає критичні елементи системи, відмова яких призводить до найбільших збитків. Для систем з ВДЕ критичними є: інвертори grid-tie (висока інтенсивність відмов $\lambda = 0.15$ відмов/рік), системи накопичення енергії (деградація ємності 2-3%/рік), трансформаторні підстанції (MTBF = 20-30 років, але MTTR = 3-7 днів через складність ремонту) [1].

В умовах гібридної війни оцінка кіберстійкості енергосистем критично важлива. Моделювання сценаріїв кібератак на SCADA-системи, smart meters та підстанції показує, що скомпрометування 30% розумних лічильників може призвести до втрати контролю над балансуванням мережі та каскадних аварій. Резервування критичних систем та шифрування каналів зв'язку знижує ризик на 60-80% [1].

Програмний комплекс розроблений на Python з використанням бібліотек: Pandas для обробки великих обсягів телеметричних даних; Scikit-learn для машинного навчання та прогнозування відмов; PyPSA (Python for Power System Analysis) для моделювання електричних мереж; Monte Carlo симуляції через NumPy для статистичного аналізу.

Інтеграція з SCADA-системою енергокомпанії здійснюється через протоколи IEC 61850 та OPC UA для отримання real-time даних про стан обладнання, генерацію ВДЕ та навантаження з частотою 1-10 сек .

Аналіз надійності сільської електромережі 10/0.4 кВ (50 км ліній, 5 трансформаторних підстанцій, 500 кВт ФЕС, 200 кВт·год БСНЕ) показав: SAIDI без ВДЕ: 450 хв/рік, з ВДЕ та БСНЕ: 280 хв/рік (покращення на 38%); SAIFI без ВДЕ: 8.5 перерв/рік, з ВДЕ: 6.2 перерви/рік (покращення на 27%); ENS знижено з 85 МВт·год/рік до 45 МВт·год/рік (економія ~\$40к/рік при тарифі \$0.15/кВт·год); ймовірність дефіциту потужності >2 год знижена з 12% до 3.5% завдяки резервуванню через БСНЕ.

Висновок. Розроблена методологія оцінки надійності електроенергетичних систем з ВДЕ в умовах нестабільного енергопостачання на основі комплексного використання Monte Carlo симуляцій, аналізу дерев відмов та статистичних показників SAIDI/SAIFI дозволяє кількісно оцінити вплив інтеграції ВДЕ на надійність енергопостачання. Результати показують, що за умови правильного розміщення систем накопичення енергії та резервування критичних вузлів інтеграція ВДЕ може підвищити надійність на 25-40% порівняно з традиційними централізованими системами.

Список використаних джерел:

1. Pavlenko, V., Volianyk, O. Research of technical solutions for cybersecurity of power systems with integrated renewable energy sources // Електромеханічні та інформаційні системи: матеріали конф. КНУТД. 2024. Вип. 8. С. 93-94. URL: <http://ser.knutd.edu.ua/handle/123456789/28968>
2. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery to meet the needs of local object with generation of electricity into grid. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97, №11.
3. Shvedchykova, I., Trykhlieb, A., Trykhlieb, S., Demishonkova, S., Pavlenko, V. Determining the efficiency of restored photovoltaic modules under natural lighting conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6, №8 (132). P. 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.317829
4. Nikitin Y., Pavlenko V., Volianyk O. The role of smart technologies in improving the reliability and efficiency of power grids // Електромеханічні та інформаційні системи: матеріали конф. КНУТД. 2024. Вип. 8. С. 91-92. URL: <http://ser.knutd.edu.ua/handle/123456789/29834>
5. Petrenko A., Kruhliak H., Lyktei V., Ivanchenko A. Електроенергетичні системи на основі відновлюваних джерел енергії, інтегровані в розподільні мережі. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2025. №6. С. 5-14. DOI: 10.31548/energiya676.2024.005