

ГЕНЕРАТИВНИЙ ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМ БАЛАНСОМ ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ВИСОКОЮ ЧАСТКОЮ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

GENERATIVE DIGITAL TWIN FOR ENERGY BALANCE MANAGEMENT IN RENEWABLE-RICH LOCAL ENERGY SYSTEMS

Анотація. У роботі розглядається задача короткострокового балансування локальної енергосистеми з фотоелектричною генерацією в умовах невизначеності. Запропоновано архітектуру генеративного цифрового двійника, який формує набір сценаріїв генерації та навантаження на горизонті до 24 годин і на їх основі обирає керуючу дію щодо акумулятора, гнучкого навантаження та обміну з мережею. Сформульовано оптимізаційну задачу мінімізації очікуваного дисбалансу за множиною сценаріїв. Наведено порівняння з детермінованим підходом. Бібл. 8, рис. 1, табл. 1.

Ключові слова: генеративний цифровий двійник, локальна енергосистема, відновлювані джерела енергії, енергетичний баланс, генерація сценаріїв, підтримка рішень.

Abstract. The paper addresses short-term balancing of a local energy system with photovoltaic generation under uncertainty. An architecture of a generative digital twin is proposed that forms a set of generation and load scenarios over a horizon of up to 24 hours and selects a control action for the battery, flexible load, and grid exchange based on these scenarios. An optimization problem of minimizing the expected imbalance across the scenario set is formulated. A comparison with the deterministic approach is provided. Ref. 8, Fig. 1, Tabl. 1.

Keywords: generative digital twin, local energy system, renewable energy sources, energy balance, scenario generation, decision support.

Вступ. Локальні енергосистеми з фотоелектричними станціями, акумуляторами та гнучким навантаженням поступово стають звичним елементом розподільних мереж [1]. Основна складність їх експлуатації – змінність сонячної генерації: хмарність, добовий цикл та сезонні коливання роблять PV-вихід погано передбачуваним на горизонті кількох годин [2]. Для підтримки балансу оператор мусить узгоджувати заряд/розряд акумуляторної батареї (АКБ), зсув навантаження та обмін із зовнішньою мережею, маючи при цьому неточну інформацію про найближче майбутнє [3].

Цифрові двійники як інструмент моніторингу енергетичних об'єктів досліджуються вже кілька років [4, 5, 6]. Але більшість відомих реалізацій зводиться до відображення поточного стану – по суті, це просунутий dashboard. Для задачі оперативного балансування цього недостатньо: потрібно не лише бачити, що відбувається зараз, а й мати уявлення про те, що може статися

протягом наступних годин. Один детермінований прогноз дає одну траєкторію, і якщо вона виявиться помилковою – рішення буде неоптимальним.

Ідея даної роботи полягає в тому, щоб замість одного прогнозу генерувати набір правдоподібних сценаріїв і приймати рішення, яке буде прийнятним для більшості з них. Подібний підхід використовується в стохастичному програмуванні [7], але його поєднання з архітектурою цифрового двійника для задачі балансування мікромережі, наскільки нам відомо, систематично не розглядалося.

Метою роботи є розробка концептуальної архітектури генеративного цифрового двійника для внутрішньодобового балансування локальної енергосистеми на основі ВДЕ та формулювання відповідної оптимізаційної задачі.

Матеріал і результати досліджень. Розглядається локальна система, що складається з PV-установки, літій-іонної АКБ, набору споживачів (частина з яких гнучкі) та точки приєднання до зовнішньої мережі. Оператор кожні 15 хвилин або щогодини має обрати: скільки заряджати/розряджати АКБ, яку частину гнучкого навантаження зсунути, і скільки імпортувати або експортувати з мережі.

Запропонована архітектура складається із шести блоків (рис. 1). Перший блок збирає телеметрію: виміри PV-потужності, загального навантаження, стану заряду (SoC) АКБ і потоку на точці приєднання. Другий блок – власне цифровий двійник – зберігає модель системи: номінальну потужність PV, ємність АКБ, обмеження на швидкість заряду/розряду, максимально допустимий обмін із мережею тощо. Третій блок – генеративний модуль – отримує поточний стан і створює N сценаріїв розвитку ситуації на горизонті T кроків. На етапі реалізації це може бути варіаційний автоенкодер (VAE) або умовна дифузійна модель, навчена на історичних даних PV-генерації та навантаження [8].

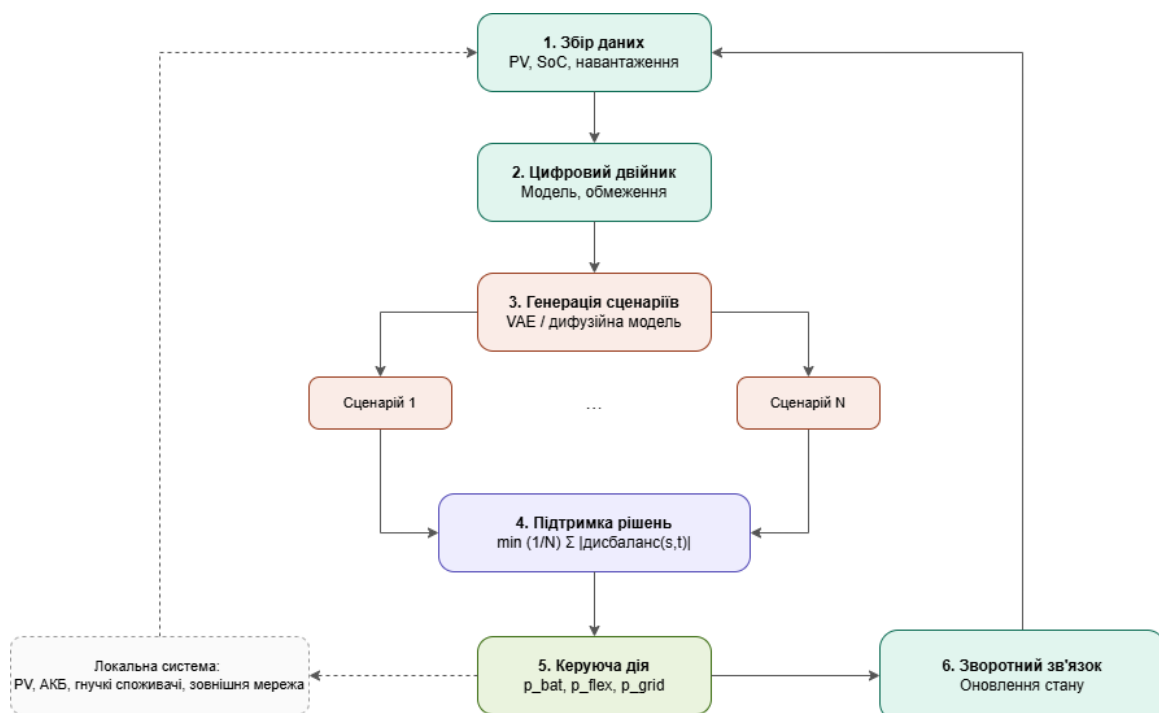


Рисунок 1. Архітектура генеративного цифрового двійника

Четвертий блок – підтримка рішень – розв’язує оптимізаційну задачу. Нехай на кожному кроці t керуючою змінною є вектор

$$u(t) = [p_{bat}(t), p_{flex}(t), p_{grid}(t)],$$

де p_{bat} – потужність заряду/розряду АКБ, p_{flex} – корекція гнучкого навантаження, p_{grid} – обмін з мережею. Для кожного сценарію $s \in \{1, \dots, N\}$ відомий прогнозований PV-вихід та навантаження. Задача формулюється так:

$$\min \left(\frac{1}{N} \right) \sum_s \sum_t |P_{gen}(s, t) + p_{bat}(t) + p_{grid}(t) - P_{load}(s, t) - p_{flex}(t)| \quad (1)$$

за обмежень:

$$\begin{aligned} SoC_{min} \leq SoC(t) \leq SoC_{max}; |p_{bat}(t)| \leq P_{bat_{max}}; |p_{grid}(t)| \leq P_{grid_{max}}; \\ 0 \leq p_{flex}(t) \leq P_{flex_{max}}. \end{aligned}$$

Тут $P_{gen}(s, t)$ та $P_{load}(s, t)$ – згенеровані сценарні значення PV-виходу та навантаження для сценарію s на кроці t . Ключова відмінність від детермінованого підходу: рішення $u(t)$ єдине для всіх сценаріїв, а усереднення по s штрафує ті дії, які добрі лише при одному розвитку подій.

П’ятий блок виконує обрану дію, а шостий – оновлює стан двійника за фактичними вимірами і цикл повторюється. Таким чином, кожні 15 хвилин двійник перераховує оптимальну дію з урахуванням свіжих даних – це стандартна логіка ковзного горизонту, тільки замість одного прогнозу використовується вибірка сценаріїв.

У табл. 1 зведено основні відмінності між класичним і запропонованим підходами.

Таблиця 1. Порівняння детермінованого та сценарного підходів

Характеристика	Детермінований підхід	Сценарний підхід (формула 1)
Вхід для оптимізації	Одна прогнозна траєкторія $P_{gen}(t)$, $P_{load}(t)$	N траєкторій $P_{gen}(s, t)$, $P_{load}(s, t)$
Врахування невизначеності	Ні – помилка прогнозу ігнорується	Так – через усереднення по сценаріях
Поведінка при різкій зміні погоди	Рішення може бути неадекватним	Рішення враховує песимістичні сценарії
Обчислювальна складність	Нижча (одна задача LP/QP)	Вища у N разів, але паралелізується

Варто зазначити обмеження роботи. Генеративна модель потребує достатнього обсягу історичних даних для навчання – для нової PV-установки їх може не вистачати. Обчислювальні витрати зростають із кількістю сценаріїв N , хоча для типових значень $N = 50\text{--}200$ і горизонту $T = 24\text{--}96$ кроків задача (1) залишається лінійною програмою і розв’язується за частки секунди на звичайному комп’ютері. Валідація підходу на реальних або синтетичних даних є предметом подальшої роботи.

Наукова новизна. Запропоновано поєднання генеративного моделювання часових рядів з архітектурою цифрового двійника для задачі оперативного балансування мікромережі. Сформульовано оптимізаційну задачу (1), в якій керуюча дія обирається з урахуванням набору згенерованих сценаріїв, а не одного детермінованого прогнозу.

Висновки. У роботі запропоновано архітектуру генеративного цифрового двійника для балансування локальної енергосистеми з PV-генерацією. Основна ідея – замінити один прогноз набором сценаріїв і шукати рішення, прийнятне для більшості з них. Сформульовано задачу мінімізації очікуваного дисбалансу (1) та описано шість функціональних блоків архітектури.

Подальша робота передбачає: реалізацію генеративного блоку на основі VAE або умовної дифузійної моделі; тестування на відкритих даних PV-генерації (наприклад, датасет NREL Solar Power Data); порівняння з детермінованим MPC-контролером за метриками частоти та величини дисбалансу.

Список використаних джерел

1. Lund H. Відроджені енергетичні системи: підхід інтелектуальних енергосистем до вибору та моделювання 100 % відроджених рішень / H. Lund // *Oxford: Academic Press*, 2014. – 320 с.
2. Antonanzas J., Osorio N., Escobar R., Urraca R., Martinez-de-Pison F. J., Antonanzas-Torres F. Огляд методів прогнозування фотоелектричної потужності / J. Antonanzas et al. // *Solar Energy*, 2016. – Vol. 136 – P. 78–111.
3. Бориченко О. В., Калінчик В. П., Побігало В. А., Філянін Д. В., Яценко Д. В. Інтервальне прогнозування процесу електроспоживання // *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2025. – № 4. DOI: 10.20535/1813-5420.4.2025.343899.
4. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Цифровий двійник у промисловості: сучасний стан / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019. – Vol. 15 – No. 4 – P. 2405–2415.
5. Grieves M., Vickers J. Цифровий двійник: зменшення непередбачуваної небажаної емерджентної поведінки складних систем / M. Grieves, J. Vickers. Cham: Springer, 2017. – P. 85–113.
6. Judge M. A. et al. Комплексний огляд підходів штучного інтелекту для інтеграції та оптимізації інтелектуальних мереж // *Energy Conversion and Management: X*, 2024. – Vol. 24 – Art. 100724.
7. Birge J. R., Louveaux F. Вступ до стохастичного програмування / J. R. Birge, F. Louveaux. New York: Springer, 2011. – 485 с.
8. Kingma D. P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes. arXiv preprint arXiv:1312.6114. 2013.

References

1. Lund H. (2014) Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100 % Renewable Solutions / H. Lund // *Oxford: Academic Press*, 320 p.
2. Antonanzas J., Osorio N., Escobar R., Urraca R., Martinez-de-Pison F. J., Antonanzas-Torres F. (2016) Review of photovoltaic power forecasting / J. Antonanzas et al. // *Solar Energy*. – Vol. 136 –P. 78–111.
3. Borychenko O. V., Kalinchyk V. P., Pobihaylo V. A., Filyanin D. V., Yatsenko D. V. (2025) Interval forecasting of electricity consumption // *Energy: economics, technologies, ecology*. – No. 4. DOI: 10.20535/1813-5420.4.2025.343899. (Ukr)

4. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. (2019) Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415.
5. Grieves M., Vickers J. (2017) Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Cham: *Springer* – P. 85–113.
6. Judge M. A. et al. (2024) A comprehensive review of artificial intelligence approaches for smart grid integration and optimization // *Energy Conversion and Management*: X. – Vol. 24 – Art. 100724.
7. Birge J. R., Louveaux F. (2011) Introduction to Stochastic Programming / J. R. Birge, F. Louveaux // New York: *Springer*. – 485 p.
8. Kingma D. P., Welling M. (2013) Auto-Encoding Variational Bayes. arXiv preprint arXiv:1312.6114.

УДК 624.131.5

Панарін В. І., аспірант, ORCID 0009-0003-8871-9131,
наук. керівниця: канд. техн. наук, доцентка **Л. В. Шайдецька**,
ORCID 0000-0002-6593-0255,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ҐРУНТОВИХ МАСИВІВ: СУЧАСНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ДЕФОРМАЦІЙ

STRESS-STRAIN STATE OF SOIL MASSES: MODERN FORECASTING MODELS AND CLASSIFICATION OF DEFORMATIONS

Анотація. Проведено аналіз сучасних підходів до оцінки напружено-деформованого стану (НДС) ґрунтових масивів. Розглянуто класифікацію деформацій ґрунтів залежно від їхньої фізичної природи та часового фактору. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу математичних моделей: від класичної лінійної пружності до сучасних нелінійних та реологічних моделей. Визначено роль методу скінченних елементів у прогнозуванні поведінки ґрунтів під навантаженням. Бібл. 4.

Ключові слова: напружено-деформований стан, ґрунтовий масив, деформації, математичне моделювання, метод скінченних елементів, реологія.

Abstract. The analyzes modern approaches to the assessment of the stress-strain state (NDS) of soil masses. The classification of soil deformations depending on their physical nature and time factor is considered. Particular attention is paid to the comparative analysis of mathematical models: from classical linear elasticity to modern nonlinear and rheological models. The role of the finite element method in predicting the behavior of soils under load is determined. Ref. 4.

Keywords: stress-strain state, soil massif, deformations, mathematical modeling, finite element method, rheology

Вступ. Сучасне будівництво характеризується дефіцитом вільних територій з ідеальними інженерно-геологічними умовами. Освоєння підземного простору мегаполісів, зведення хмарочосів та будівництво в зонах залягання