

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ФУНКЦІЇ МАЙНІНГОВОГО КЛАСТЕРА БІЛЯ АЕС В ОЕС УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ ДОСВІДУ США

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Виконано системний аналіз функції керованого майнінгового кластера, колокованого з атомною генерацією за схемою *behind-the-meter*, у задачі балансування електроенергетичної системи. Методом структурного зіставлення двох ринкових середовищ — зони оператора PJM (США) та об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України — показано, що за ідентичної інженерної архітектури кластера його системна функція є протилежною: у США кластер виконує функцію споживача надлишкової базової генерації, в Україні — функцію ресурсу первинного регулювання частоти (FCR). Виокремлено структурні чинники середовища, що визначають цю функцію, та обґрунтовано доцільність FCR-функції для ОЕС України.

Ключові слова: системний аналіз, балансування електроенергетичних систем, кероване гнучке навантаження, атомна електростанція, первинне регулювання частоти, майнінг криптовалют.

Abstract

A systems analysis of the function of a managed cryptocurrency-mining cluster co-located with nuclear generation (*behind-the-meter*) within the power-system balancing problem is performed. By structurally comparing two supersystems — the PJM operator zone (USA) and the Integrated Power System (IPS) of Ukraine — it is shown that, under an identical engineering architecture of the subsystem, its system function is opposite: in the USA the cluster acts as a consumer of surplus baseload generation, whereas in Ukraine it serves as a Frequency Containment Reserve (FCR) resource. The structural factors of the environment that determine this function are identified, and the FCR function is justified specifically for the IPS of Ukraine.

Keywords: systems analysis, power system balancing, managed flexible load, nuclear power plant, Frequency Containment Reserve, cryptocurrency mining.

Вступ

Балансування електроенергетичної системи (ЕЕС) з високою часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є системною задачею, у якій кероване гнучке навантаження здатне надавати послуги первинного регулювання частоти (FCR). У наших попередніх роботах таким навантаженням обрано майнінговий кластер: запропоновано модель динамічного розподілу потужностей між продажем енергії, майнінгом та скидом із підтримкою FCR [1] і концепцію розміщення кластера безпосередньо біля атомної електростанції (АЕС) [2]; здатність майнінгового обладнання бути гнучким навантаженням зі швидким відгуком підтверджують і незалежні дослідження [3, 4]. Системний аналіз показує, що функція кластера як підсистеми не задана наперед його інженерною будовою — вона визначається структурою надсистеми, тобто ринкового та режимного середовища, у яке кластер вбудовано (рис. 1). У цій доповіді методом структурного зіставлення двох енергосистем ми з'ясуємо, які саме чинники середовища визначають системну функцію колокованого з АЕС майнінгу.

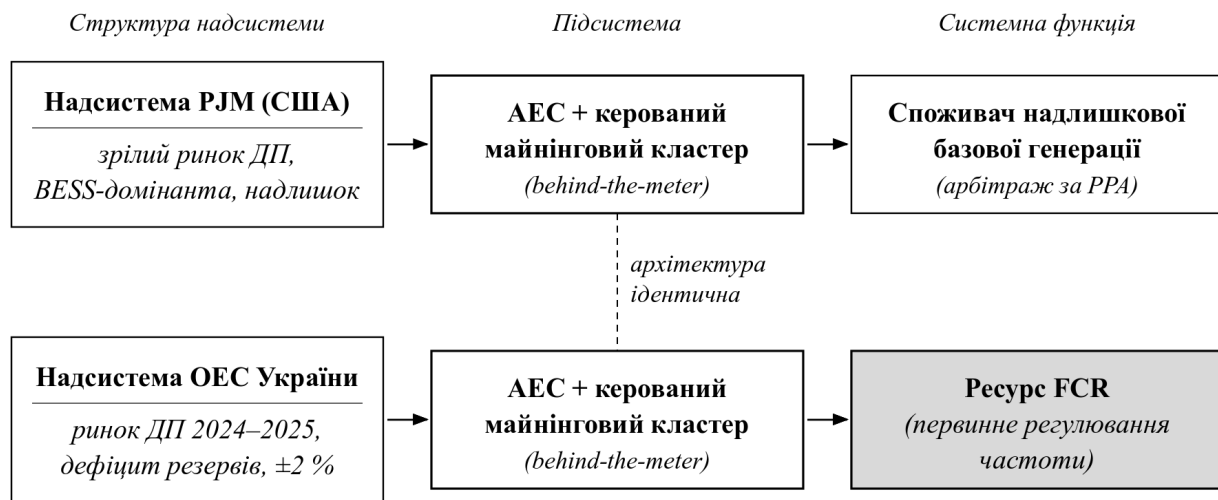


Рис. 1. За ідентичної архітектури (АЕС + керований майнінговий кластер behind-the-meter) контексти PJM та ОЕС України задають протилежні системні функції

Реалізований прецедент колокації: PJM (США)

Колокація майнінгу з атомною генерацією перестала бути гіпотезою: на майданчику АЕС Susquehanna валовою потужністю ~2,5 ГВт (два блоки BWR) у штаті Пенсильванія (США) з квітня 2023 р. працює проєкт Nautilus Cryptomine, у якому майнінгове навантаження за схемою behind-the-meter (за лічильником, на стороні генерації) поетапно нарощено з 50 до 200 МВт [5, 6]. Економічну доцільність такої «гнучкої ядерної енергосистеми» з криптоактивами як інструментом монетизації підтверджено в дослідженні [7]. Це доводить інженерну здійсненність архітектури, проте лишає відкритим питання про її системну функцію.

У PJM структура середовища така: ринок допоміжних послуг зрілий, послуги швидкого регулювання захоплені батарейними накопичувачами (BESS) з мілісекундним відгуком, а ціни на них для великого атомного блоку невисокі. За таких структурних умов кластер на Susquehanna виконує функцію не ресурсу FCR, а споживача надлишкової базової генерації, що монетизує цінові провали через фіксований контракт на закупівлю електроенергії (power purchase agreement, PPA) близько 20 USD/МВт·год. Тобто тут кластер працює «вниз» — на поглинання надлишку.

Системні чинники ОЕС України та зміна функції кластера

В об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України структура середовища протилежна. Ринок допоміжних послуг запущено лише у 2024–2025 рр.: за результатами спеціальних аукціонів НЕК «Укренерго» в енергосистемі з'явилося 423 МВт нових балансувальних потужностей, з яких близько 94 % — батарейні системи накопичення (BESS), а основним законтракованим продуктом став автоматичний резерв відновлення частоти (aPВЧ/aFRR) [8]; ціни ринку «на добу наперед» лишаються високими й волатильними (у середньому понад 5000 грн/МВт·год навесні 2026 р. за даними оператора ринку [9]). Маневровість вітчизняних блоків ВВЕР-1000 жорстко обмежена діапазоном ±2 % номінальної потужності, а дефіцит резервів загострений руйнуванням мережевої інфраструктури. За цих структурних умов той самий кластер набуває протилежної функції — стає ресурсом надання FCR, перетворюючи пасивну базову генерацію на активного учасника ринку допоміжних послуг.

Системний аналіз дозволяє виокремити чотири структурні чинники середовища, що визначають функцію кластера: маневровість атомних блоків, рівень і структуру цін на допоміжні послуги, роль BESS та режимний стан системи (надлишок проти дефіциту резервів) — їх зіставлення наведено в табл. 1. Наведена там ціна aPВЧ слугує орієнтиром рівня цін на швидкі резерви: цільовий для кластера продукт первинного регулювання (FCR/ППЧ) закуповується окремим аукціоном, проте зіставний за порядком величини. Прибутковість самого майнінгу при цьому нестабільна: нижня межа рентабельності промислових ASIC-майнерів станом на початок 2026 р. близька до 0,05 USD/кВт·год, а халвінг (halving) винагороди за блок додатково тисне на маржу. Тому в українському контексті цінність

кластера визначається не доходом від майнінгу як таким, а поєднанням премії за готовність до FCR із доходом від майнінгу в режимі очікування активації.

Саме в ніші FCR кероване майнінгове навантаження має прямого конкурента — згадані батареїні системи накопичення (BESS), що домінують серед нових потужностей українського ринку (табл. 1). З позиції системного аналізу це два альтернативні ресурси однієї системної функції (FCR), проте їх співвідношення не зводиться до конкуренції: BESS обмежені станом заряду й діють на горизонті секунд–годин, тоді як майнінгове навантаження такого обмеження не має і приносить дохід у режимі очікування активації, що відкриває простір для взаємодоповнення за різними часовими масштабами.

Таблиця 1. Структурне зіставлення ринкових середовищ PJM та ОЕС України

Структурний чинник	PJM (США)	ОЕС України
Зрілість ринку допоміжних послуг	зрілий (з 1990-х рр.)	запущено у 2024–2025 рр.
Ціна швидкого резерву (aPВЧ/aFRR), плата за готовність	низька (тиск BESS)	762,80 грн/МВт (сер.-зваж., 4-й спецаукціон), сар 1339,82 грн/МВт
Домінанта нових потужностей	BESS	BESS (~94 % уведених у 2025 р.), ринок у дефіциті
Маневровість блоку	ширша (BWR з правом маневру)	ВВЕР-1000: ±2 % Nном
Режимний стан системи	стабільний, надлишок	дефіцит резервів, руйнування мережі
Системна функція кластера	споживач базової генерації (арбітраж за РРА)	ресурс FCR

Висновки

Системний аналіз показав, що ідентична інженерна архітектура колокації майнінгу з атомною генерацією набуває протилежної системної функції залежно від структури надсистеми — ринку допоміжних послуг та режимного стану ЕЕС: у зрілому середовищі PJM кластер є споживачем надлишкової генерації, в ОЕС України — ресурсом FCR. Наукова новизна полягає у застосуванні системного підходу, який визначає функцію керованого навантаження через структурне зіставлення середовищ та виокремлення чинників, що цю функцію зумовлюють. Отриманий результат дає методичну основу для подальшої кількісної оцінки ефективності кластера як ресурсу первинного регулювання частоти в умовах ОЕС України. Окремим напрямом подальшого дослідження є порівняльний системний аналіз керованого майнінгу та BESS як альтернативних ресурсів надання FCR в ОЕС України — визначення меж їх конкуренції та взаємодоповнення за вартісними й часовими характеристиками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондарчук О. В. Оптимізація прогнозування та керування майнінгом як гнучкою системою для балансування енергосистеми на основі методу FCR / О. В. Бондарчук, Б. І. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2025. — № 4. — С. 85–89. — DOI: 10.31649/1997-9266-2025-181-4-85-89.
2. Бондарчук О. В. Керований майнінговий кластер біля атомної електростанції як ресурс підтримки резерву стабілізації частоти / О. В. Бондарчук, Б. І. Мокін // Матеріали LV Наук.-техн. конф. ф-ту інтелект. інформ. технологій та автоматизації (Вінниця, 24–27 берез. 2026 р.) [Електронний ресурс]. — Вінниця : ВНТУ, 2026. — Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2026/paper/view/28278/23197>. — Назва з екрана.
3. Menati A. Modeling and Analysis of Utilizing Cryptocurrency Mining for Demand Flexibility in Electric Energy Systems / A. Menati, K. Lee, L. Xie. — 2022. — arXiv:2207.02428.
4. Carter N. Leveraging Bitcoin Miners as Flexible Load Resources for Power System Stability and Efficiency / N. Carter, S. Connell, B. Jones [et al.]. — 2023. — SSRN: 4634256. — DOI: 10.2139/ssrn.4634256.
5. TeraWulf Announces Full Deployment of 50 MW at the Nautilus Cryptomine Facility Ahead of Schedule [Електронний ресурс] // TeraWulf Inc. — 2023. — 20 квіт. — Режим доступу: <https://investors.terawulf.com/news-events/press-releases/detail/6/>. — Назва з екрана.
6. Talen Energy Purchases TeraWulf's Minority Share in Nautilus [Електронний ресурс] // Talen Energy. — 2024. — 3 жовт. — Режим доступу: <https://ir.talenenergy.com/news-releases/news-release-details/talen-energy-purchases-terawulfs-minority-share-nautilus>. — Назва з екрана.
7. Fernández Cosials K. A flexible nuclear energy system using cryptoassets as enablers: Economic assessment / K. Fernández Cosials, R. Vecino, C. Vázquez Rodríguez // Progress in Nuclear Energy. — 2023. — Vol. 161. — Art. 104735. — DOI: 10.1016/j.pnucene.2023.104735.

8. Завдяки проведеним НЕК «Укренерго» першим двом спецаукціонам з довгострокового придбання допоміжних послуг цього року в енергосистемі України з'явилися 423 МВт нових балансувальних потужностей [Електронний ресурс] // НЕК «Укренерго». — Режим доступу: <https://ua.energy/zagalni-novyny/zavdyaky-provedenym-nek-ukrenergo-pershym-dvom-spetsauksionam-z-dovgostrokovogo-prydbannya-dopomizhnyh-poslug-tsogorich-v-energosystemi-ukrayiny-z-yavylys-423-mvt-novyh-balansuyuchykh-potuzhnostej/>. — Назва з екрана.

9. Ринок «на добу наперед» [Електронний ресурс] // ДП «Оператор ринку» (OREE). — Режим доступу: <https://www.oree.com.ua/>. — Назва з екрана.

10. Укренерго провело четвертий спецаукціон з довгострокового придбання швидких резервів [Електронний ресурс] // НЕК «Укренерго». — 2025. — Режим доступу: <https://ua.energy/zagalni-novyny/ukrenergo-provelo-chetvertyj-spetsauksion-z-dovgostrokovogo-prydbannya-shvydkyh-rezerviv/>. — Назва з екрана.

Бондарчук Олексій Валерійович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації Вінницького національного технічного університету, e-mail: alexey.bondarchuk@aleax.me.

Науковий керівник: **Мокін Борис Іванович** — академік НАПН України, д-р техн. наук, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій.

Bondarchuk Oleksii V. — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation of Vinnytsia National Technical University, e-mail: alexey.bondarchuk@aleax.me.

Supervisor: **Mokin Borys I.** — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of System Analysis and Information Technologies.