

КЕРОВАНІЙ МАЙНІНГОВИЙ КЛАСТЕР БІЛЯ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЯК РЕСУРС ПІДТРИМКИ РЕЗЕРВУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЧАСТОТИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано концепцію розміщення керованого майнінгового кластера біля атомної електростанції (АЕС) як переривного ресурсу підтримки резерву стабілізації частоти (FCR). Обґрунтовано доцільність такого підходу з огляду на обмежену маневровість атомних блоків, зниження мережевих втрат при локальному споживанні та можливість формування додаткового доходу через поєднання майнінгу з наданням допоміжних послуг енергосистемі.

Ключові слова: атомна електростанція, резерв стабілізації частоти, майнінг криптовалют, кероване гнучке навантаження, балансування електроенергетичних систем, двоступенева стохастична оптимізація.

Abstract

A concept of deploying a managed mining cluster near a nuclear power plant (NPP) as an interruptible Frequency Containment Reserve (FCR) resource is proposed. The feasibility of this approach is justified considering the limited maneuverability of nuclear units, reduced network losses due to local consumption, and the opportunity to generate additional revenue by combining mining with ancillary grid services.

Keywords: nuclear power plant, Frequency Containment Reserve, cryptocurrency mining, managed flexible load, power system balancing, two-stage stochastic optimization.

Вступ

Атомні електростанції забезпечують стабільну базову генерацію, проте традиційно працюють у режимі мінімальних відхилень від номінальної потужності — швидкість зміни навантаження блоку обмежена вимогами теплового режиму реактора, що суттєво звужує їх маневровість. Водночас зростаюча частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у сучасних електроенергетичних системах підвищує потребу в механізмах первинного регулювання частоти (FCR), здатних активуватися протягом секунд [1].

У попередніх роботах авторів розроблено LP-модель динамічного розподілу потужностей між продажем енергії, майнінгом та скидом із добовим плануванням (day-ahead) та корекцією в реальному часі [2], а також обґрунтовано концепцію участі майнінгових ферм у балансуванні енергосистем через FCR [3, 4]. Також проведено економічне порівняння, яке підтвердило конкурентоспроможність майнінгу відносно продажу за зеленим тарифом [5].

Метою даної роботи є обґрунтування доцільності розширення цього підходу на випадок атомної генерації — розміщення керованого майнінгового кластера безпосередньо біля АЕС як ресурсу FCR.

Концепція керованого навантаження біля АЕС

Основна ідея полягає у розміщенні ASIC-кластера на майданчику АЕС як керованого споживача із змінною потужністю в діапазоні від нижньої до верхньої межі. У штатному режимі кластер виконує майнінг криптовалют та миттєво відключається при активації FCR (рис. 1).

Нижня межа потужності кластера визначається обертовим резервом блоку — мінімальним відхиленням від номіналу, яке АЕС і так підтримує в режимі FCR. Відповідно до технічної документації та ТРБЕ, для енергоблоків ВВЕР-1000 допустимий діапазон змін потужності реакторної установки становить $\pm 2\% N_{\text{ном}}$, що відповідає $\sim \pm 20$ МВт електричної потужності [6]. Це і визначає мінімальну доцільну потужність кластера — ~ 20 МВт (~ 6000 ASIC-майнерів класу Antminer S19).

Верхня межа є сценарно залежною і визначає три режими роботи кластера:

- FCR (первинне регулювання): кластер $\sim 2\text{--}5\%$ номіналу забезпечує миттєву реакцію на відхи-

- лення частоти з часом відгуку менше 1 секунди [1];
- FRR (вторинне регулювання): кластер $\sim 5\text{--}20\%$ бере участь у балансуванні на хвилинному горизонті;
- Аварійне скидання навантаження: при втраті зв'язку з мережею (руйнування підстанцій або ліній електропередачі) кластер здатен прийняти всю або значну частину потужності блоку, запобігаючи аварійному заглибленню реактора. Такі події фіксувались в ОЕС України взимку 2025–2026 рр., коли блоки АЕС вимушено відключались від мережі або знижували потужність через каскадні аварії [7]; стохастичні сценарії відновлення енергосистеми за таких умов розглянуто в [8, 9].

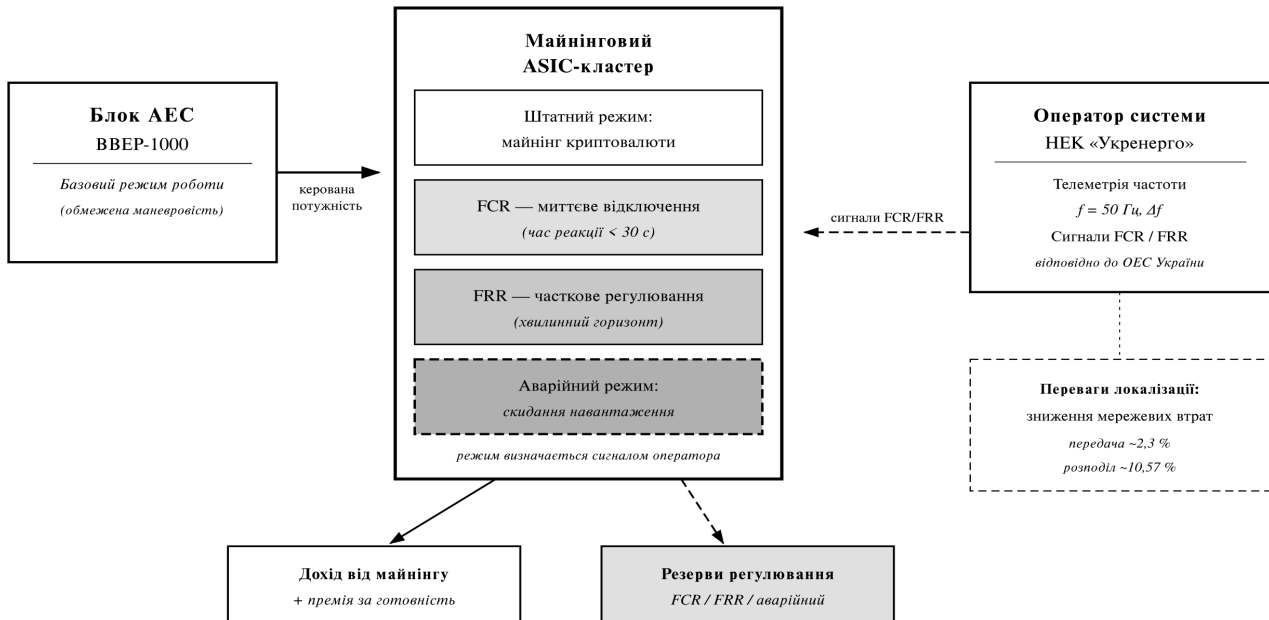


Рис. 1. Концептуальна схема взаємодії АЕС, керованого майнінгового кластера та системи FCR

Розміщення кластера на стороні генерації має додаткову перевагу — зниження мережевих втрат. За даними НКРЕКП [10], орієнтовні технологічні втрати в Україні складають $\sim 2,3\%$ при передачі та $\sim 10,57\%$ при розподілі, значної частини яких можна уникнути при локальному споживанні на майданчику АЕС.

Математичний апарат

Для формалізації запропонованої концепції LP-модель динамічного розподілу потужностей [2] розширюється до двоступеневої стохастичної оптимізації:

- перший ступінь (day-ahead) — формування базового графіка навантаження кластера та обсягу зобов'язань з FCR;
- другий ступінь (real-time) — рекурсне коригування: відключення або обмеження майнінгу при активаціях FCR у різних сценаріях.

Надійність виконання зобов'язань FCR забезпечується шанс-обмеженнями із заданим рівнем довіри. Параметризація невизначеності охоплює прогнозування курсу криптовалют [11] та активацій FCR. Стохастичні сценарії стану енергосистеми як фоновий процес описуються авторегресійними моделями відновлення ЕЕС та ВДЕ України [8, 9].

Висновки

Запропонована концепція керованого майнінгового кластера біля АЕС із змінною потужністю охоплює три режими роботи — від первинного частотного регулювання (FCR) до аварійного скидання навантаження при ізоляції блоку від мережі — та поєднує: (1) підтримку FCR без зміни теплового режиму реактора; (2) монетизацію генерації через майнінг у штатному режимі; (3) зниження мережевих втрат за рахунок локального споживання. Визначення оптимальних меж потужності кластера для кожного режиму, деталізований математичний апарат та оцінка ефективності запропонованої системи є

предметом подальшого дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Frequency Containment Reserves (FCR) [Електронний ресурс] // ENTSO-E. — Режим доступу: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/fcr/. — Назва з екрана.
2. 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.
3. Бондарчук О. В. Огляд підходів до використання електричних потужностей криптомайнінгових компаній в балансуванні електроенергетичних систем / О. В. Бондарчук, Б. І. Мокін // Матеріали ЛІП Наук.-техн. конф. ф-ту інтелект. інформ. технологій та автоматизації (Вінниця, 20–22 берез. 2024 р.) [Електронний ресурс]. — Вінниця : ВНТУ, 2024. — Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2024/paper/view/20068/16617>. — Назва з екрана.
4. Бондарчук О. В. Майнінг криптовалют як одна із інтелектуальних технологій сталого розвитку / О. В. Бондарчук, Б. І. Мокін // Інформаційно-комунікаційні технології для стійкості та відновлення : кол. моногр. за матеріалами XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» (Київ, 11–12 листоп. 2025 р.) [Електронний ресурс]. — Київ : Юстон, 2025. — Режим доступу: https://itgip.org/wp-content/uploads/2025/11/1_zbirka_2025_dlja-sajtu.pdf. — Назва з екрана.
5. Бондарчук О. В. Використання надлишків згенерованої сонячної енергії для майнінгу криптовалют / О. В. Бондарчук // Матеріали LIV Наук.-техн. конф. ф-ту інтелект. інформ. технологій та автоматизації (Вінниця, 24–27 берез. 2025 р.) [Електронний ресурс]. — Вінниця : ВНТУ, 2025. — Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/23217/19212>. — Назва з екрана.
6. Участь АЕС України в регулюванні частоти та потужності в об'єднаній енергосистемі: аналіз проблеми та шляхи вирішення / В. М. Гольдрін, І. І. Червоненко, В. С. Збинський [та ін.] // Ядерна та радіаційна безпека. — 2020. — № 1(85). — С. 49–55. — DOI: 10.32918/nrs.2020.1(85).05.
7. Update 339 – IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine [Електронний ресурс] // IAEA. — 2026. — 6 лют. — Режим доступу: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-339-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine>. — Назва з екрана.
8. Авторегресійні моделі відновлення та розвитку зруйнованої війною електроенергетики України / Б. І. Мокін, О. В. Мазурук, Н. В. Собчук, Д. О. Шалагай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2024. — № 5. — С. 6–15. — DOI: 10.31649/1997-9266-2024-176-5-6-15.
9. Мокін Б. І. Авторегресійні моделі процесу повоєнного відновлення та післявоєнного розвитку ВДЕ України / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, Д. О. Шалагай, О. В. Мазурук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2025. — № 1. — С. 58–65. — DOI: 10.31649/1997-9266-2025-178-1-58-65.
10. Річний звіт Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, за 2024 рік [Електронний ресурс] // НКРЕКП. — Київ, 2025. — Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/zvity-ta-rishennya/richni-zvity>. — Назва з екрана.
11. Мокін В. Б. Інформаційна технологія прогнозування курсу криптовалют на основі комплексної інженерії ознак / В. Б. Мокін, С. О. Жуков, Л. М. Куперштейн, О. В. Слободянюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2022. — № 2. — С. 81–93. — DOI: 10.31649/1997-9266-2022-161-2-81-93.

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;

Мокін Борис Іванович — академік НАПН України, д-р техн. наук, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: borys.mokin@gmail.com.

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;

Mokin Borys I. — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: borys.mokin@gmail.com.