

О. В. Бондарчук¹
Б. І. Мокін¹

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА СТОХАСТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ РОЗМІЩЕННЯ МАЙНІНГОВОГО КЛАСТЕРУ БІЛЯ АЕС НА СТАБІЛІЗАЦІЮ ЧАСТОТИ

¹Вінницький національний технічний університет

Виконано системний аналіз та побудовано стохастичну оптимізаційну модель впливу розміщення керованого майнінгового кластера на майданчику атомної електростанції (АЕС) на стабілізацію частоти в об'єднаній енергосистемі. Маневровість атомних блоків обмежена вузьким діапазоном первинного регулювання ($\pm 2\% N_{\text{ном}}$) і унеможливорює участь у вторинному резерві (FRR/aFRR) через ядерно-фізичні обмеження, тоді як дедалі більша частка відновлюваних джерел підвищує потребу в таких ресурсах. Запропонований підхід усуває цю суперечність: ASIC-кластер функціонує як кероване навантаження, що знижує споживання у часі повного розгортання ≤ 30 с відповідно до вимог ENTSO-E до FCR, не змінюючи теплового режиму реактора.

Розроблено двоступеневу стохастичну модель оптимізації, де перший ступінь (day-ahead) формує базовий план завантаження кластера та обсяг зобов'язань FCR, а другий ступінь (real-time) коригує план у разі активацій FCR у різних стохастичних сценаріях. Надійність виконання зобов'язань FCR гарантується шанс-обмеженнями із заданим рівнем довіри. Параметризація невизначеності охоплює прогнозування курсу криптовалют та активацій FCR; стохастичні сценарії стану енергосистеми описуються авторегресійними моделями відновлення ЕЕС та ВДЕ України. Генерація сценаріїв виконується методом Монте-Карло з редукцією до 200 репрезентативних траєкторій.

На числовому прикладі блока ВВЕР-1000 показано, що пропонується стратегія «майнінг + FCR» забезпечує $\approx 23\%$ приросту добового доходу порівняно з чистим майнінгом і майже восьмикратну економічну перевагу над BESS-альтернативою завдяки відсутності CAPEX і монетизації кластера у режимі готовності. Локалізація навантаження дає додатковий ефект близько 284 млн грн/рік через зниження мережевих втрат. Наукова новизна полягає у побудові двоступеневої стохастичної моделі із шанс-обмеженнями та параметризації невизначеності, що інтегрує прогнозування курсу криптовалют, частоту FCR-активацій і авторегресійні сценарії стану ЕЕС та ВДЕ України. Практичним результатом є адаптація реалізованої у США архітектури behind-the-meter проекту Nautilus Cryptotime до умов ОЕС України, де майнінговий кластер біля АЕС використовується як інструмент надання первинного регулювання частоти, що компенсує обмежену маневровість блоків ВВЕР-1000.

Ключові слова: системний аналіз, двоступенева стохастична оптимізація, шанс-обмеження, атомна електростанція, резерв стабілізації частоти, майнінг криптовалют, кероване гнучке навантаження.

Вступ

Атомні електростанції забезпечують стабільну базову генерацію, проте традиційно працюють у режимі мінімальних відхилень від номінальної потужності. Блоки ВВЕР-1000 беруть участь у первинному регулюванні частоти в межах обертового резерву $\pm 2\% N_{\text{ном}}$ ($\approx \pm 20$ МВт) згідно з Кодексом системи передачі [1], але цього обсягу недостатньо для покриття потреб балансування; участь у вторинному резерві (FRR/aFRR) обмежена ядерно-фізичними процесами — ксеноновим отруєнням і допустимими градієнтами оболонки ТВЕЛ [2].

Водночас дедалі більша частка ВДЕ підвищує стохастичність балансу потужності та потребу в механізмах FCR, здатних реагувати протягом секунд [3]. У попередніх роботах авторів розроблено LP-модель динамічного розподілу потужностей між продажем, майнінгом та скидом з добовим плануванням і корекцією в реальному часі [4], обґрунтовано участь майнінгових ферм у балансуванні через FCR [5], [6] та підтверджено конкурентоспроможність майнінгу відносно продажу за зеленим тарифом [7]. В ОЕС України актуальність цих підходів додатково загострюється через

бойові пошкодження інфраструктури 2025–2026 рр. [8].

Метою роботи є розробка та обґрунтування двоступеневої стохастичної моделі оптимізації керованого майнінгового кластера біля АЕС як ресурсу FCR, що поєднує надійне виконання зобов'язань із системою балансування, монетизацію генерації через майнінг та зниження мережевих втрат.

Наукова новизна полягає у формалізації трирежимної концепції (FCR / FRR / аварійне скидання) для майнінгового кластера біля АЕС у вигляді двоступеневої стохастичної задачі з шансовими обмеженнями, у врахуванні авторегресійних сценаріїв відновлення ЕЕС та ВДЕ України як фонового стохастичного процесу, а також у кількісній оцінці ефекту зниження мережевих втрат від локалізації навантаження на майданчику АЕС.

Концепція керованого майнінгового кластера біля АЕС

Архітектура системи

ASIC-кластер розміщується на майданчику АЕС за схемою behind-the-meter (залічильникове підключення) — з прямим живленням від блока без транзиту через магістральні мережі. Такий спосіб підключення вже реалізовано у США: проєкт Nautilus Cryptomine на майданчику АЕС Susquehanna (два блоки $\approx 2,5$ ГВт сумарно, штат Пенсильванія) з квітня 2023 р. забезпечує ≈ 48 МВт операційної потужності майнінгу безпосередньо від блоку з проєктним розширенням до 200 МВт [9]. Економічна оцінка подібної архітектури як елемента «гнучкої ядерної енергосистеми» із криптоактивами як гнучким споживачем подана у [10].

Функціональне призначення кластера у пропонуваній українській архітектурі принципово відрізняється від реалізації на АЕС Susquehanna: у ринку PJM (США) кластер — споживач надлишкового baseload-виробництва з фіксованим PPA-тарифом (ринок первинного регулювання частоти там домінують BESS), натомість в ОЕС України, де ринок допоміжних послуг запущено у 2024–2025 рр. [11] і ресурси балансування після бойових пошкоджень залишаються в дефіциті, майнінговий кластер компенсує обмежену маневровість блоку ВВЕР-1000 [2]. Архітектура запозичена у Nautilus, але функція кластера — протилежна.

У штатному режимі кластер виконує майнінг криптовалюти зі змінною потужністю $P \in [P_{\min}, P_{\max}]$, регульованою локальним контролером ASIC-секцій. З отриманням сигналу FCR/FRR від НЕК «Укренерго» кластер знижує або обнуляє споживання у часі повного розгортання ≤ 30 с (50 % за ≤ 15 с) відповідно до вимог ENTSO-E до первинного регулювання [3]. Конкретна схема підключення, вузол обліку та налаштування релейного захисту на майданчику українських АЕС потребують окремої інженерної розробки з узгодженням параметрів підключення згідно з Кодексом системи передачі НЕК «Укренерго» [1].

Межі потужності кластера

Нижня межа (P_{\min}) вибирається для симетрії з діапазоном первинного регулювання ВВЕР-1000 $\pm 2\% N_{\text{nom}} \approx \pm 20$ МВт [2]: у разі меншого P_{\min} кластер не покриває повний симетричний хід FCR без ASIC cold-start. $P_{\min} = 20$ МВт ≈ 6000 ASIC S19 (3,25 кВт кожен).

Верхня межа (P_{\max}) є сценарно залежною (табл. 1).

Таблиця 1

Верхня межа потужності кластера в різних режимах роботи

Режим	P_{\max}	Час реакції	Горизонт
FCR (первинне регулювання)	$\approx 2...5\% N_{\text{nom}}$	< 30 с	хвилини
FRR (вторинне регулювання)	$\approx 5...20\% N_{\text{nom}}$	< 5 хв	15...60 хв
Аварійне скидання	до 100 % P_{cl}	< 1 с	разова подія

Класифікація режимів узгоджена з вимогами ENTSO-E до первинного та вторинного регулювання частоти [3] й Кодексом системи передачі НЕК «Укренерго» [1]. У розрахунковому прикладі P_{\max} кластера вибрано на рівні 50 МВт (верхня межа FCR-діапазону для $N_{\text{nom}} = 1000$ МВт).

Зниження мережевих втрат

Локалізація навантаження на майданчику АЕС усуває необхідність транзиту потужності через

магістральні (220/330/400 кВ) та розподільні (6...110 кВ) мережі. За тарифною структурою передачі НЕК «Укренерго» на 2024 р. [12] норматив технологічних витрат електричної енергії на рівні передачі становить $\approx 2,5\%$; типові втрати у розподільчих мережах обленерго — $\approx 10\%$; сумарні втрати $\approx 12,5\%$ помітно перевищують середньоєвропейський рівень ENTSO-E ($\approx 7\%$) через зношеність мережі та наслідки бойових пошкоджень інфраструктури, які зафіксовані у сценаріях відновлення ЕЕС [13]. Оцінка $12,5\%$ відповідає контр-факту підключення кластера у розподільну мережу 6–35 кВ; для 50-мегаватного споживача ймовірно пряме підключення 110 кВ, що усуває лише $\eta_{\text{transm}} \approx 2,5\%$. Далі для аналізу чутливості зберігаємо верхню оцінку.

Для кластера потужністю P_{cl} питома добова економія — це втрати, які виникли б у контр-фактичному сценарії підключення кластера як звичайного споживача у розподільну мережу 6–110 кВ замість behind-the-meter-прив'язки до блока АЕС:

$$\Delta W = P_{\text{cl}} \cdot (\eta_{\text{transm}} + \eta_{\text{distr}}) \cdot T_{\text{work}}, \quad (1)$$

де ΔW — уникнута добова енергія втрат, МВт·год; $\eta_{\text{transm}} = 2,5\%$ і $\eta_{\text{distr}} = 10\%$ — частки втрат під час передачі та розподілу відповідно [12]; $T_{\text{work}} = 24$ год — добова тривалість роботи кластера у режимі споживання. За базового сценарію $P_{\text{cl}} = 50$ МВт добова економія складає $\Delta W = 50 \times 0,125 \times 24 \approx 150$ МВт·год, що еквівалентно близько $12,5\%$ спожитої кластером енергії.

У грошовій формі ефект монетизується за ціною електроенергії на ринку на добу наперед:

$$\Delta C = \Delta W \cdot \pi^{\text{elec}}. \quad (2)$$

У разі $\pi^{\text{elec}} \approx 5188$ грн/(МВт·год) (РДН ОЕС України, середнє за перші 18 днів квітня 2026 р. за даними OREE [14]); діапазон добових середньозважених цін 2610...7167 грн/МВт·год це дає $\Delta C \approx 778$ тис. грн/добу, або близько 284 млн грн/рік за безперервної роботи кластера 50 МВт. Ця величина лінійно входить у третій доданок цільової функції стохастичної моделі через множник $\pi^{\text{elec}} \cdot (\eta_{\text{transm}} + \eta_{\text{distr}}) \cdot P_t^{\text{DA}} \cdot \Delta t$, що узгоджує оцінку уникнутих втрат з оптимізаційною задачею.

Математична модель

Постановка задачі

Формулюється двоступенева стохастична програма з дискретним часом ($\Delta t = 15$ хв, $T = 96$), що відповідає 15-хвилинному торговому інтервалу РДН і регламенту активації FCR ENTSO-E [3]. Перший ступінь (day-ahead) фіксує рішення за добу до реалізації сценарію, другий (real-time) — коригувальну (recourse) реакцію після розкриття стохастичних параметрів; при фіксованих рішеннях першого ступеня задача другого структурно лінійна, що дозволяє застосовувати декомпозиційні методи. Задача узагальнює детерміновану LP-модель статті [4]: у разі виродження Ω в одну траєкторію, зняття шанс-обмеження (6) та $c_{\text{pen}} \rightarrow 0$ вона зводиться до моделі [4].

Змінні 1-го ступеня: P_t^{DA} (базовий план кластера, МВт) і R^{FCR} (обсяг зобов'язань FCR, МВт). Змінні 2-го ступеня (сценарій $\omega \in \Omega$): $P_t^{\text{RT}}(\omega)$ — фактична потужність у реальному часі, $\delta_t^+(\omega)$ — скидання при активації FCR, $\delta_t^-(\omega)$ — повернення (усі МВт), $s_t(\omega) \geq 0$ — допоміжна змінна недовиконання FCR-зобов'язання (slack). Стохастичні параметри (екзогенні сценарні реалізації): $I_t^{\text{FCR}}(\omega) \in \{0, 1\}$ — індикатор активації FCR у момент t для сценарію ω ; $\pi_t^{\text{mine}}(\omega)$ — прибутковість майнінгу, грн/(МВт·год). Детерміновані параметри: π^{FCR} — тариф готовності FCR, π^{elec} — ціна РДН (усі грн/(МВт·год)); $P_{\text{min}}, P_{\text{max}}$ — межі кластера (МВт); α — рівень довіри шанс-обмеження; c_{pen} — штраф за невиконання FCR (грн/(МВт·год)); Δ_{ramp} — обмеження ramp-rate (МВт/с; у (7) помножується на Δt у секундах); $\eta_{\text{transm}}, \eta_{\text{distr}}$ — частки втрат під час передачі/розподілу. Часова сітка: $t \in \{1, \dots, T = 96\}$ за $\Delta t = 15$ хв.

Цільова функція

Максимізується сподіваний добовий прибуток кластера:

$$\max E_{\omega} \left\{ \sum_t \left[\pi_t^{\text{mine}}(\omega) P_t^{\text{DA}} + \pi^{\text{FCR}} R^{\text{FCR}} + \pi^{\text{elec}} (\eta_{\text{transm}} + \eta_{\text{distr}}) P_t^{\text{DA}} - c_{\text{pen}} s_t(\omega) \right] \Delta t \right\}, \quad (3)$$

де \sum_t позначає підсумовування по всіх $t = 1, \dots, T$; $s_t(\omega) \geq 0$ — допоміжна змінна недовиконання,

яка вимірює розмір порушення FCR-зобов'язання у сценарії ω . Замість нелінійної додатної частини виразу $R^{\text{FCR}} \cdot I_t^{\text{FCR}} - \delta_t^+(\omega)$ — застосовано стандартну LP-лінеаризацію через дві нерівності (12), (13) у блоці Real-time. Мінімізація штрафу в цільовій функції гарантує, що $s_t(\omega)$ набуває саме значення додатної частини недовиконання, зберігаючи лінійність задачі.

Чотири доданки мають такий зміст:

1. *Дохід майнінгу* — $\pi_t^{\text{mine}}(\omega) \cdot P_t^{\text{DA}}$; стохастичний через залежність прибутковості від курсу BTC та хешрейту мережі [15].

2. *Плата за готовність FCR* — $\pi^{\text{FCR}} \cdot R^{\text{FCR}}$; нараховується за кожен час-крок незалежно від фактичної активації [11].

3. *Уникнуті мережеві втрати* — $\pi^{\text{elec}} \cdot (\eta_{\text{transm}} + \eta_{\text{distr}}) \cdot P_t^{\text{DA}}$; монетизація економії завдяки локалізації навантаження на майданчику АЕС замість транзиту через мережі [12].

4. *Штраф за невиконання FCR-активації* — $c_{\text{pen}} \cdot s_t(\omega)$; нараховується, коли фактичне скидання $\delta_t^+(\omega)$ менше за потрібне $R^{\text{FCR}} \cdot I_t^{\text{FCR}}(\omega)$; включається у сподіване значення через усереднення по сценаріях.

Цільова функція формалізує компроміс «монетизація — надійність»: збільшення R^{FCR} нарощує другий доданок (гарантована плата за готовність), але водночас скорочує свободу першого (частина потужності зобов'язана бути готовою до скидання і не завжди дає поточний дохід від майнінгу) та збільшує ризик четвертого (штраф у сценаріях, де активація виявилась більшою за план). Штраф c_{pen} введений як «м'який» доданок усередині сподіваного значення, а не як жорстке обмеження у кожному сценарії: це зберігає розв'язність у найгірших реалізаціях і дає гладкий градієнт для декомпозиційних алгоритмів, тоді як надійність виконання гарантується окремо шансо-обмеженням (6). Постійні витрати ASIC-кластера (CAPEX, OPEX, охолодження) у добовий горизонт планування не входять, оскільки на короткострокові рішення про розподіл потужності вони не впливають; повна економічна оцінка з урахуванням цих складових подається у розділі «Розрахунковий приклад».

Обмеження

Day-ahead:

$$P_{\min} \leq P_t^{\text{DA}} \leq P_{\max}, \forall t; \quad (4)$$

$$P_t^{\text{DA}} \geq R^{\text{FCR}}, \forall t; \quad (5)$$

$$\mathbb{P}_{\omega} \left\{ \delta_t^+(\omega) \geq R^{\text{FCR}} I_t^{\text{FCR}}(\omega) \right\} \geq \alpha, \forall t; \quad (6)$$

$$\left| P_{t+1}^{\text{DA}} - P_t^{\text{DA}} \right| \leq \Delta_{\text{ramp}} \Delta t, \forall t. \quad (7)$$

Real-time (для кожного сценарію $\omega \in \Omega$):

$$P_t^{\text{RT}}(\omega) = P_t^{\text{DA}} - \delta_t^+(\omega) + \delta_t^-(\omega), \forall t, \omega; \quad (8)$$

$$0 \leq P_t^{\text{RT}}(\omega) \leq P_{\max}, \forall t, \omega; \quad (9)$$

$$0 \leq \delta_t^+(\omega) \leq R^{\text{FCR}} I_t^{\text{FCR}}(\omega), \forall t, \omega; \quad (10)$$

$$0 \leq \delta_t^-(\omega) \leq P_{\max} - P_t^{\text{DA}}, \forall t, \omega; \quad (11)$$

$$s_t(\omega) \geq R^{\text{FCR}} I_t^{\text{FCR}}(\omega) - \delta_t^+(\omega), \forall t, \omega; \quad (12)$$

$$s_t(\omega) \geq 0, \forall t, \omega. \quad (13)$$

Обмеження (4) задає фізичні межі ASIC-кластера: нижня межа P_{\min} відповідає обортовому резерву блоку ВВЕР-1000 (≈ 20 МВт, якщо $\pm 2\% N_{\text{nom}}$ [2]). Обмеження (5) гарантує «резерв скидання» — кластер завжди споживає не менше за взяті зобов'язання FCR. Шансо-обмеження (6) з рівнем довіри $\alpha = 0,95$ формалізує надійність виконання FCR: імовірність фактичного скидання, що покриває вимогу, має бути не меншою за α ; апроксимується через CVaR-реформацію або консервативну лінеаризацію, що зводить задачу до лінійної змішано-цілочислової (MILP). Обмеження (7) на швидкість зміни плану з $\Delta_{\text{ramp}} = 2$ МВт/с на горизонті $\Delta t = 15$ хв зберігається для цілісності формалізму і не є активним для кластера 20...100 МВт — параметр фіксує лише 15-хвилинне плануваль-

не обмеження day-ahead і не описує власне FCR-активацію. Вимога ENTSO-E до розгортання (≤ 30 с повністю, ≤ 15 с на 50 % [3]) стосується секундної шкали: ASIC-секції декомутуються за ≈ 100 мс, що забезпечує значно вищу ефективну швидкість у межах самої активації. Балансування потужності у вузлі підключення кластера з блоком АЕС виконується тривіально: за номінальної потужності блока $N_{\text{nom}} = 1000$ МВт і межі споживання кластера $P_t^{\text{DA}} \leq 100$ МВт вузол не лімітує експорт у мережу, тому додаткове рівняння балансу у моделі явно не випливає.

Параметризація невизначеності

Стохастичні параметри моделі та вибрані для них моделі подані у табл. 2 (тут і далі АРПКС — авторегресійна проінтегрована ковзна середня, ARIMA в англійській літературі).

Таблиця 2

Параметризація невизначеності

Параметр	Модель	Джерело
$\pi_t^{\text{mine}}(\omega)$ — прибутковість майнінгу	Геометричний броунівський рух (GBM) з дрейфом μ і волатильністю σ , каліброваними за річною історією курсу BTC та хешрейту	[15]
$I_t^{\text{FCR}}(\omega)$ — активації FCR	Двостанний марковський процес (стані: активний/спокій) з інтенсивностями $\lambda_{01}, \lambda_{10}$, каліброваними за статистикою ENTSO-E Transparency Platform	[3]
Стан ЕЕС (аварії, відключення)	АРПКС(2, 0, 1)	[13]
Виробіток ВДЕ	АРПКС(2, 0, 1)	[16]

Генерація сценаріїв — метод Монте-Карло з попередньою вибіркою Latin Hypercube Sampling і fast-forward редуцією до $N = 200$ траєкторій (компроміс між обчислювальною складністю MILP та стабільністю оцінки математичного сподівання). Вибір моделей. Для $\pi_t^{\text{mine}}(\omega)$ прийнято GBM — через лог-нормальний розподіл логарифмічних приростів ціни BTC [15] і замкнену форму калібрування. GBM прийнятне на добовому горизонті планування (≈ 96 кроків по 15 хв), але поза ним — зокрема у періоди халвінгу (дискретні стрибки block reward) — модель потребує розширення Ornstein-Uhlenbeck або jump-diffusion. Для $I_t^{\text{FCR}}(\omega)$ вибрано двостанний марковський процес замість Hawkes, оскільки самозбудження FCR-активацій значиме на секундному, а не добовому масштабі [3]; системні стохастичні підходи до моделювання FCR на рівні частоти синхронної зони розглянуто у [17]. АРПКС(2, 0, 1) для ЕЕС і ВДЕ перенесені з [13], [16] без перекалібрування для узгодженості зі стохастичним шаром відновлення — AR-шар діє як фоновий сценарний модулятор середньомісячного стану ЕЕС/ВДЕ, а не внутрішньодобовий. Конкретно, одна AR-реалізація $x(\omega)$ визначає середні параметри сценарію (середню прибутковість $\mu_x(\omega)$ для GBM та інтенсивність активацій $\lambda_{01}(\omega)$ для марковського процесу), під які калібруються внутрішньодобові GBM- і марковські траєкторії на 96-крок. сітці.

Розрахунковий приклад

Параметри кейсу

Розглядається майданчик АЕС із блоком ВВЕР-1000 (орієнтовно Хмельницька або Рівненська АЕС), $N_{\text{nom}} = 1000$ МВт. Кластер розміщується за схемою behind-the-meter з базовою потужністю $P_{\text{cl}} = 50$ МВт ($\approx 5\% N_{\text{nom}}$); чутливість оцінюється також для 20 і 100 МВт.

Ціна РДН $\pi^{\text{elec}} = 5\,188$ грн/(МВт·год) — середньодобове за перші 18 днів квітня 2026 р. [14] у діапазоні 2610...7167 грн/(МВт·год). Тариф $\pi^{\text{FCR}} = 762,80$ грн/(МВт·год) — офіційна середньозважена клірингова ціна акцептованих пропозицій симетричного резерву за результатами 4-го спецаукціону НЕК «Укренерго» (травень 2025 р., загалом акцептовано 249 МВт швидких резервів) [11]. Вибрано саме середньозважену, а не граничну ціну на 2026—2030 рр. (1339,82 грн/(МВт·год)) — остання є регуляторною верхньою межею контрактних цін, а не очікуваним ринковим кліринговим рівнем. Поріг прибутковості майнінгу $\pi^{\text{mine}} \approx 2250$ грн/(МВт·год) ($\approx 0,05$ USD/кВт·год за курсом 45 UAH/USD) — оцінка для сучасного ASIC-обладнання I кв. 2026 р. у рамках аналізу чутливості.

Мережеві втрати: $\eta_{\text{transm}} = 2,5\%$, $\eta_{\text{distr}} = 10\%$ [12]. Рівень довіри шанс-обмежень $\alpha = 0,95$. Серед-

на частка часу FCR-активації — 3 % (оцінка за стандартами ENTSO-E [3]).

Сценарії та результати

– **S1.** Чистий майнінг. Кластер працює 24/7 з $P_t^{DA} = P_{\max}$ без участі у FCR — аналог архітектури Nautilus [9].

– **S2.** Майнінг + FCR (пропонована стратегія). Оптимальне рішення задачі за вибраних параметрів: $P_t^{DA} = P_{\max}$ і $R^{FCR} = P_{\max}$ постійно протягом доби; при активаціях FCR виконується $\delta_t^+(\omega) = R^{FCR}$ зі зміною споживання на $\approx 3\%$ часу.

– **S3.** BESS-альтернатива. Замість майнінгового кластера встановлено BESS 50 МВт / 100 МВт·год (2-годинне сховище) виключно для FCR; CAPEX амортизується на 10 років за питомою вартістю ≈ 300 USD/кВт·год (оцінка для grid-scale Li-іонних систем 2026 р. за даними [18], [19]).

Таблиця 3

Добовий грошовий потік трьох сценаріїв для $P_{cl} = 50$ МВт, тис. грн/добу (ex-post реалізація з урахуванням 3 % часу FCR-активації)

Потік	S1	S2	S3
Дохід майнінгу	2700	2619	—
Плата за готовність FCR	—	915	915
Уникнуті мережеві втрати	778	755	—
Амортизація CAPEX BESS	—	—	-370
Чистий дохід	3 478	4 289	545
Приріст над S1	—	+23,3 %	-84 %

Відсотковий приріст S2 над S1 не залежить від масштабу: для $P_{cl} \in \{20, 50, 100\}$ МВт чистий дохід S1 становить $\{1\ 391; 3\ 478; 6\ 956\}$, S2 — $\{1\ 716; 4\ 289; 8\ 579\}$ тис. грн/добу; приріст стабільно +23,3 %. Це прямий наслідок лінійності перших трьох доданків цільової функції відносно P_{cl} .

Інтерпретація результатів і ризики моделі

За вибраних параметрів оптимум задачі структурно простий: $P_t^{DA} = P_{\max}$ протягом 96 кроків доби, $R^{FCR} = P_{\max}$, $\delta_t^-(\omega) = 0$; у сценаріях з активацією FCR виконується $\delta_t^+(\omega) = R^{FCR}$. Стратегія «постійно на максимумі» виникає тому, що π^{FCR} за вибраних тарифів додає позитивний доданок до цільової функції без просідання майнінг-доходу в межах математичного сподівання, обмеження (4), (5), (10) виконуються як рівності, а шанс-обмеження (6) — зі значним запасом, коли $R^{FCR} = P_{\max}$. Внутрішньодобова варіативність закладена у стохастичних параметрах π^{mine} (GBM) і π^{elec} (нічний провал 2...3 тис., вечірній пік 7...8 тис. грн/МВт·год) і не впливає на форму рішення.

Перевага S2 над S1 на $\approx 23\%$ формується платою за готовність FCR (≈ 915 тис. грн/добу) та ефектом зниження мережевих втрат (≈ 755 тис. грн/добу), що разом перевищують $\approx 3\%$ втрату майнінг-доходу на активаціях. BESS-альтернатива (S3) поступається приблизно у 8 разів через значний CAPEX (≈ 30 млн USD для 50 МВт / 100 МВт·год за [18], [19]) без доходу у режимі очікування. Ключовий ризик моделі — чутливість до π^{mine} : у разі подальшого падіння прибутковості майнінгу (халвінг 2028 р.) S1 стане збитковим, тоді як S2 збереже позитивний грошовий потік завдяки $\pi^{FCR} \cdot R^{FCR}$ та уникнутим мережевим втратам; саме стохастична параметризація π^{mine} як GBM забезпечує цю стійкість.

Висновки

Наведені результати отримано на основі системного аналізу взаємодії між атомною електростанцією, ринком балансування та керованим ІТ-навантаженням. Декомпозиція об'єкта за ступенями рішення (day-ahead / real-time), рівнями невизначеності (ринкова, технічна, системна) та часовими масштабами (секунди — доба — місяці) дала змогу сформулювати задачу як двоступеневу стохастичну програму з шанс-обмеженнями.

Розміщення керованого ASIC-кластера на майданчику АЕС за схемою behind-the-meter дозво-

ляє сформувати ресурс FCR без зміни теплового режиму реактора, долаючи обмеження маневровості атомних блоків. Інженерна здійсненність архітектури підтверджена чинним з 2023 р. проектом Nautilus Cryptomine на АЕС Susquehanna (США, ≈ 48 МВт) [9].

Розроблена двоступенева стохастична модель з шанс-обмеженнями забезпечує надійне планування зобов'язань FCR (рівень довіри $\alpha = 0,95$) у разі невизначеності курсу криптовалют, частоти FCR-активацій та стану ЕЕС. Параметризація невизначеності інтегрує авторегресійні моделі відновлення ЕЕС та ВДЕ України [13], [16], завдяки чому модель є придатною до воєнного й повоєнного сценаріїв.

Локалізація навантаження на майданчику АЕС дає додатковий економічний ефект за рахунок зниження мережових втрат: сумарно 12,5 % в ОЕС України [12] проти ≈ 7 % середньоєвропейського рівня ENTSO-E. Для базового кластера 50 МВт це становить ≈ 150 МВт·год/добу уникнутої енергії, або близько 284 млн грн/рік у грошовому еквіваленті за цінами РДН квітня 2026 р. [14].

Розрахунковий приклад для блоку ВВЕР-1000 показує, що запропонована стратегія «майнінг + FCR» забезпечує ≈ 23 % приросту добового доходу порівняно з чистим майнінгом і близько восьмикратну економічну перевагу над BESS-альтернативою завдяки відсутності CAPEX і монетизації кластера у режимі готовності. Принциповою відмінністю запропонованої архітектури від реалізованого у США прецеденту [9] є адаптація функції кластера до умов ОЕС України: у ринку PJM США він виступає споживачем надлишкового baseload-виробництва, тоді як в ОЕС України — інструментом надання первинного регулювання частоти, що компенсує обмежену маневровість блоків ВВЕР-1000.

Подальші дослідження спрямовано на емпіричне калібрування авторегресійних моделей за відкритими даними ринку балансування України та ENTSO-E Transparency Platform, передпроектне опрацювання концепції на конкретному майданчику ВВЕР, а також регуляторний аналіз умов участі IT-навантаження у ринку допоміжних послуг згідно з Кодексом системи передачі НЕК «Укренерго» [1].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] «Про затвердження Кодексу системи передачі», Постанова НКРЕКП № 309 від 14.03.2018, зі змінами, внесеними Постановою № 1036 від 28.05.2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18>.
- [2] В. М. Гольдрін, та ін., «Участь АЕС України в регулюванні частоти та потужності в об'єднаній енергосистемі: аналіз проблеми та шляхи вирішення.» *Ядерна та радіаційна безпека*, № 1(85), с. 49-55, 2020. [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.1\(85\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.1(85).05)
- [3] «Frequency Containment Reserves (FCR)», ENTSO-E. [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/fcr/.
- [4] О. В. Бондарчук, і Б. І. Мокін, «Оптимальне прогнозування та керування майнінгом як гнучкою системою для балансування енергосистеми на основі методу FCR,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 85-89, 2025. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-181-4-85-89>.
- [5] О. В. Бондарчук, і Б. І. Мокін, «Огляд підходів до використання електричних потужностей криптомайнінгових компаній в балансуванні електроенергетичних систем,» у *Матеріали ЛІІІ Наук.-техн. конф. ФІТА*, Вінниця, Україна, 20–22 берез. 2024 р. Вінниця: ВНТУ, 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2024/paper/view/20068/16617>.
- [6] О. В. Бондарчук, і Б. І. Мокін, «Майнінг криптовалют як одна із інтелектуальних технологій сталого розвитку», у *Інформаційно-комунікаційні технології для стійкості та відновлення*, кол. моногр., Київ, 11–12 листоп. 2025 р. Київ: Юстон, 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://itgip.org/wp-content/uploads/2025/11/1_zbirka_2025_dlja-sajtu.pdf.
- [7] О. В. Бондарчук, «Використання надлишків згенерованої сонячної енергії для майнінгу криптовалют,» у *Матеріали ЛІІІ Наук.-техн. конф. ФІТА*, Вінниця, Україна, 24–27 берез. 2025 р. Вінниця: ВНТУ, 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/23217/19212>.
- [8] «Update 339 – IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine», IAEA, 6 Feb. 2026. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-339-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine>.
- [9] “Talen Energy Purchases TeraWulf’s Minority Share in Nautilus Cryptomine,” Talen Energy Corp., 3.10. 2024. [Online]. Available: <https://ir.talenergy.com/news-releases/news-release-details/talen-energy-purchases-terawulfs-minority-share-nautilus>.
- [10] K. Fernández Cosials, R. Vecino, and C. Vázquez Rodríguez, “A flexible nuclear energy system using cryptoassets as enablers: Economic assessment,” *Progress in Nuclear Energy*, vol. 161, p. 104735, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104735>.
- [11] «Спеціальні аукціони на купівлю резервів для ринку допоміжних послуг: результати 1–4 спецаукціонів 2024–2025 рр.», НЕК «Укренерго». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.energy/ancillary-services-market/>.
- [12] «Про встановлення тарифу на послуги з передачі електричної енергії НЕК «УКРЕНЕРГО» на 2024 рік», *Постанова НКРЕКП № 2322* від 09.12.2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v2322874-23>.
- [13] Б. І. Мокін, О. В. Мазурук, Н. В. Собчук, і Д. О. Шалагай, «Авторегресійні моделі відновлення та розвитку зруйнованої війною електроенергетики України», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 6-15, 2024. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-176-5-6-15>.
- [14] «OREE — Оператор ринку електроенергії України: результати торгів на ринку на добу наперед (РДН)». [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.oree.com.ua/index.php/control/results_mo/DAM.
- [15] В. Б. Мокін, С. О. Жуков, Л. М. Куперштейн, і О. В. Слободянюк, «Інформаційна технологія прогнозування курсу криптовалют на основі комплексної інженерії ознак», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 81-93, 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-161-2-81-93>.

[16] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, Д. О. Шалагай, і О. В. Мазурук, «Авторегресійні моделі процесу повосного відновлення та післявоєнного розвитку ВДЕ України», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 58-65, 2025. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-58-65>.

[17] J. Janssen, A. Zocca, B. Zwart, and J. Kazempour, "Dynamic Dimensioning of Frequency Containment Reserves: The Case of the Nordic Grid," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2026. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2025.3637187>.

[18] BloombergNEF, "Lithium-Ion Battery Price Survey 2024," Dec. 2024. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilowatt-hour-bloombergnef/>.

[19] IEA, "Batteries and Secure Energy Transitions," Paris, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>.

Рекомендована кафедрою системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ

Дата надходження 24.04.2026

Дата прийняття до друку після рецензування 25.04.2026

Дата публікації 7.07.2026

Ця робота ліцензується відповідно до

[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Бондарчук Олексій Валерійович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: alexey.bondarchuk@aleax.me . <https://orcid.org/0009-0003-3327-1042> ;

Мокін Борис Іванович — академік НАПН України, д-р техн. наук, професор, професор кафедри системно-го аналізу та інформаційних технологій, e-mail: borys.mokin@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0002-5906-6122>.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Bondarchuk¹

B. I. Mokin¹

Systems Analysis and Stochastic Optimization of the Impact of a Mining Cluster Located near a Nuclear Power Plant on Frequency Stabilization

¹Vinnitsia National Technical University

Systems-analysis study and a stochastic optimization model of the impact of deploying a managed cryptocurrency mining cluster at a nuclear power plant (NPP) site on frequency stabilization in the unified power system are developed. The maneuverability of nuclear units is confined to a narrow primary-control band (± 2 % of nominal power) and does not allow participation in secondary reserves (FRR/aFRR) due to nuclear-physical constraints, while the growing share of renewable sources increases the demand for such resources. The proposed approach resolves this contradiction: an ASIC cluster operates as a controllable consumer that reduces the consumption within the ENTSO-E FCR deployment time (full activation ≤ 30 s) without affecting the thermal regime of the reactor.

A two-stage stochastic optimization model is developed: the first stage (day-ahead) determines the baseline cluster loading and the volume of FCR commitments, while the second stage (real-time) adjusts the plan under FCR activations across stochastic scenarios. Reliability of FCR obligations is guaranteed by chance constraints at a specified confidence level ($\alpha = 0.95$). Uncertainty parameterization covers cryptocurrency price forecasting and FCR activation frequency, while stochastic scenarios of the power system state are described by autoregressive models of post-war recovery of Ukraine's energy system and renewable generation. Scenario generation uses Monte Carlo sampling with reduction to 200 representative trajectories.

A numerical example for a VVER-1000 unit demonstrates that the proposed "mining + FCR" strategy provides approximately 23 % higher daily revenue than pure mining and approximately eightfold economic advantage over a battery energy storage (BESS) alternative through the absence of CAPEX and cluster monetization in standby mode. Load localization yields an additional effect of approximately 284 million UAH annually through network loss reduction. The scientific novelty lies in formulating a two-stage stochastic model with chance constraints together with an uncertainty parameterization that integrates cryptocurrency price forecasting, FCR activation frequency, and autoregressive scenarios of the state of Ukraine's power system and renewable generation. The practical contribution is an adaptation of the U.S.-implemented behind-the-meter architecture of the Nautilus Cryptomine project to the conditions of Ukraine's power system, where a mining cluster colocated with an NPP serves as an instrument for primary frequency regulation that compensates for the limited maneuverability of VVER-1000 units.

Keywords: systems analysis, two-stage stochastic optimization, chance constraints, nuclear power plant, Frequency Containment Reserve, cryptocurrency mining, managed flexible load.

Bondarchuk Oleksii V. — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: alexey.bondarchuk@aleax.me . <https://orcid.org/0009-0003-3327-1042>;

Mokin Borys I. — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: borys.mokin@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0002-5906-6122>