

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-181-4-85-89>

УДК 621.311.243:004.9:336.74

О. В. Бондарчук¹**Б. І. Мокін¹**

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ МАЙНІНГОМ ЯК ГНУЧКОЮ СИСТЕМОЮ ДЛЯ БАЛАНСУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ НА ОСНОВІ МЕТОДУ FCR

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто концепцію використання майнінгових ферм криптовалют як гнучкого навантаження для балансування сучасних енергосистем за допомогою механізму Frequency Containment Reserve (FCR). Поєднання прогнозування виробітку енергії сонячної генерації та алгоритмів оптимального керування навантаженням дозволяє інтегрувати процес майнінгу у частотне регулювання, зменшуючи ризики від коливань цін на електроенергію та криптовалюту. Запропоновано модель динамічного розподілу потужностей між продажем енергії на ринку, використанням її для майнінгу та можливим скидом залежно від відхилень частоти в мережі, прогнозованого виробітку та ринкових умов.

Обґрунтовано економічну доцільність такого підходу: у години знижених або від'ємних цін на електроенергію продаж за «зеленим тарифом» часто є збитковим, тоді як спрямування надлишків у майнінг забезпечує стабільніший дохід. Водночас рентабельність самого майнінгу залежить від ринкових факторів, через що застосування інтелектуальної системи управління є актуальним. Модель передбачає як добове планування (day-ahead), так і корекцію в реальному часі, що дає змогу мінімізувати скид енергії, стабілізувати грошовий потік і підвищити ефективність використання відновлюваних джерел.

Наукова новизна полягає у поєднанні прогнозування ВДЕ, оптимізації розподілу потужностей і методів підтримки FCR. Такий підхід формує нову бізнес-модель, де майнінгові ферми виступають активними учасниками енергетичних ринків, забезпечуючи економічну віддачу та підвищуючи стійкість енергосистеми. У роботі також підкреслюється значення регуляторних аспектів і необхідність врахування технічних обмежень, що визначає умови практичної реалізації схеми. Подальші дослідження мають зосередитися на апробації моделі з використанням реальних даних, уточненні параметрів керування та можливому поєднанні з системами накопичення енергії.

Ключові слова: майнінг криптовалют, балансування електроенергетичних систем, відновлювальна енергетика, сонячна електростанція, зелений тариф, активний споживач.

Вступ

У сучасних електроенергетичних системах стрімко зростає частка відновлюваних джерел енергії, що підвищує нестабільність виробництва та збільшує потребу в ефективних механізмах балансування, таких як механізми первинного регулювання частоти (Frequency Containment Reserve, FCR), які потребують швидкодіючих, прогнозованих та контрольованих джерел резерву потужності [1], [2].

Криптовалютне майнінг-обладнання характеризується високою гнучкістю навантаження, коротким часом реакції та передбачуванним споживанням, що відкриває можливості для його інтеграції в системи частотного балансування на кшталт FCR [3].

У тезах конференції [4] автори показали перспективність застосування надлишкової сонячної енергії для майнінгу криптовалют як альтернативи традиційним схемам збуту. У наукових працях [5], [6] досліджено застосування авторегресійних моделей для відновлення та розвитку енергетич-

ної інфраструктури та відновлюваних джерел енергії України. У цій статті розширюється предмет дослідження у напрямі інтеграції майнінгових потужностей в механізми FCR.

Метою роботи є дослідження можливості використання майнінгових потужностей як гнучкого навантаження в програмах FCR шляхом створення інтелектуальної системи прогнозування та керування, яка враховує динаміку цін на електроенергію та криптовалюту.

Наукова новизна полягає у поєднанні методів прогнозування виробництва відновлюваної енергетики з алгоритмами оптимального розподілу потужностей між майнінгом та наданням послуг FCR, що дозволяє:

- підвищити ефективність використання електроенергії за рахунок динамічного керування навантаженням;
- забезпечити стабільність частоти в енергосистемі без додаткових витрат на традиційні резерви;
- створити нову модель монетизації надлишків відновлюваної генерації через синергію енергетичного ринку та ринку криптовалют.

Актуальність

Нерентабельність криптомайнінгу

Дослідження [7] показує, що невеликі майнери Bitcoin вперше стали збитковими у періоди падіння цін, коли витрати на електроенергію перевищували доходи. Аналіз доходів на кіловат-годину демонструє, що значну частину часу майнінг залишався економічно нераціональним [8]. Додатково, халвінг винагороди за блок істотно знижував прибутковість навіть для великих операторів. Попри тимчасові зростання ціни Bitcoin, загальна тенденція відображає скорочення маржі рентабельності майнінгу через конкуренцію та енергетичні витрати [9].

Графік на рис. 1 [10] показує, як невеликі майнери BTC вперше стали нерентабельними, згідно з даними Diar, коли витрати на електроенергію перевищують доходи.

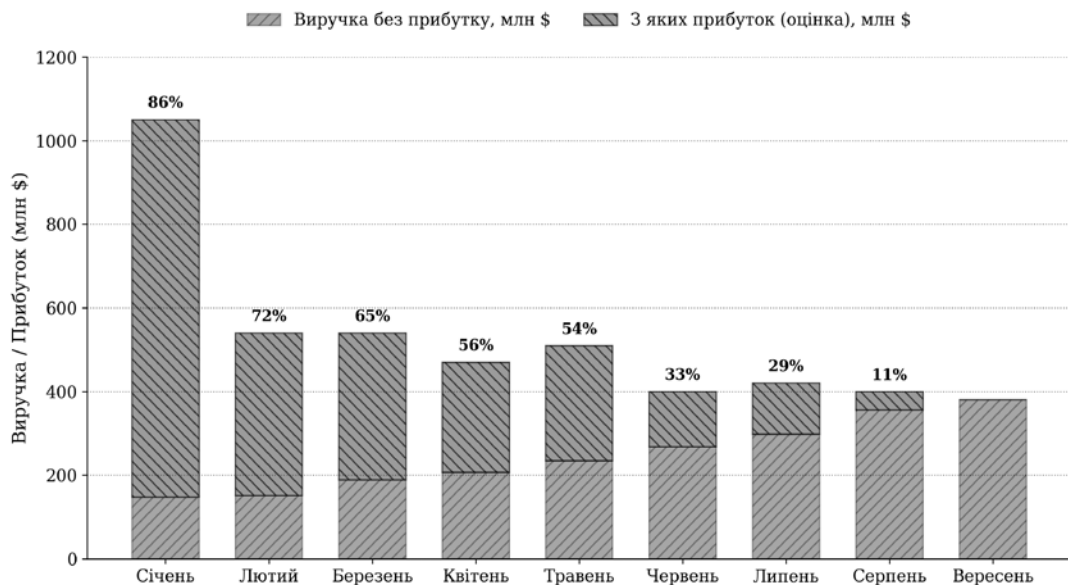


Рис. 1. Перший випадок коли майнінг не приносить прибутку

На рис. 2 показано діаграму [7] від Hashrate Index, що відображає доходи від майнінгу Bitcoin на кіловат-годину в історичній перспективі, й демонструє, що рівень доходу залишався надзвичайно низьким (між ~\$0,08...0,59), через що майнінг нерентабельний за умов звичайних тарифів на електроенергію.

Нерентабельність продажу зеленої енергії

На європейських ринках дедалі частіше фіксуються періоди негативних цін на електроенергію, викликані перевиробництвом сонячної та вітрової генерації [11]. У такі години генератори зазнають збитків, оскільки продаж енергії за «зеленим тарифом» або ринковою ціною стає економічно нераціональним. Це явище проілюстровано на графіках (рис. 3, 4) [12], [13].

Bitcoin Mining: Historical Revenue per kWh During the Industrial Era (2015 - 2023)

HASHRATE
INDEX

Luxor



Рис. 2: Ціновий графік видобутку BITCOIN

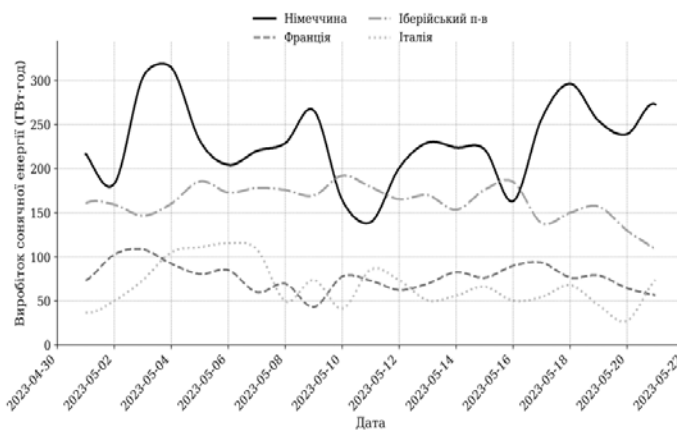


Рис. 3

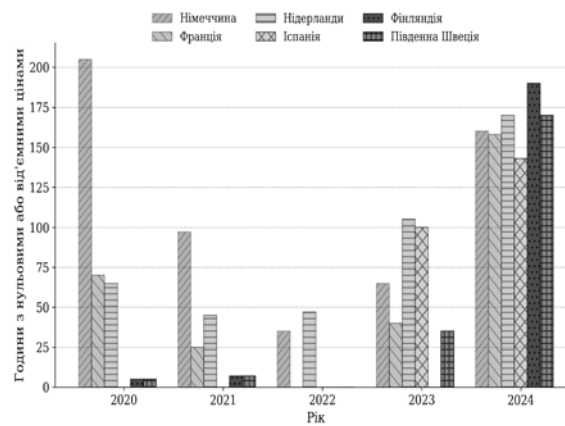


Рис. 4. Вплив зростання сонячної генерації на зменшення ціни електроенергії в Європі

На графіку (рис. 3) видно різкі падіння цін у години пікової генерації сонячної енергії. Це підтверджує наявність проблеми надлишку виробництва, коли продавати енергію стає збитковим.

Графік від Reuters показує, як швидке зростання виробництва сонячної енергії в Європі призводить до різкого падіння оптових цін на електроенергію, зокрема у денні години. В окремих випадках ціни опускаються до нульових або від'ємних значень. Це підкреслює потребу у масштабному впровадженні систем накопичення енергії, здатних згладжувати добові коливання генерації [12].

Також на рис. 5 показано графік встановлення сонячних панелей в Європі [12].

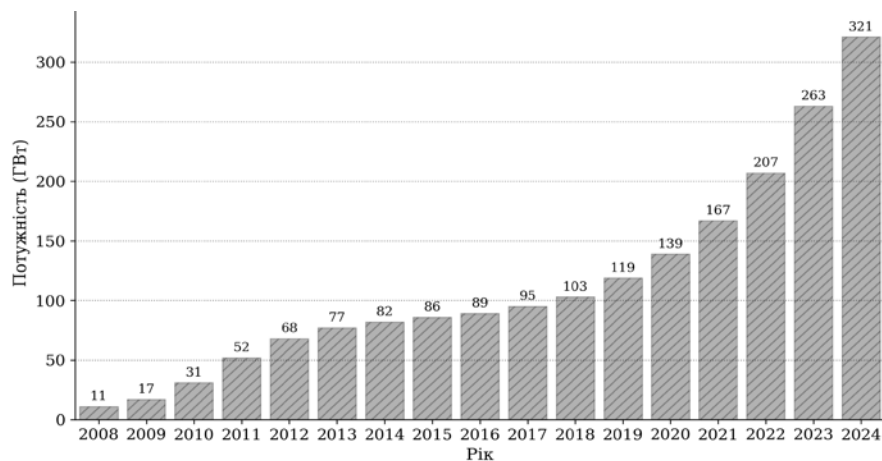


Рис. 5. Графік встановлення сонячних панелей

Запропоноване рішення

Запропоновано інтелектуальне рішення, що автоматично вирішує «майнити чи продавати в мережу за зеленим/ринковим тарифом» у кожний момент часу, а також здійснює добовий (day-ahead) прогноз і план.

Вхідні дані (на крок t)

- G_t — доступна потужність ВДЕ, кВт;
- P_t^{sell} — ціна/тариф продажу, \$/кВт·год;
- R_t^{mine} — дохідність майнінгу в \$/кВт·год;
- C^{grid} — ліміт відпуску в мережу, кВт;
- C^{mine} — ліміт потужності майнінгу, кВт;
- Δt — тривалість кроку, год (напр., 0,25).

Змінні (на крок t)

- $p_t^{sell} \geq 0$ — потужність, продана в мережу, кВт
- $r_t^{mine} \geq 0$ — потужність, спрямована на майнінг, кВт
- $s_t \geq 0$ — скид (невикористана енергія), кВт

Спрощена LP-модель (добовий горизонт)

Ціль (максимізація прибутку)

$$\max \sum_t \Delta t (P_t^{sell} \times p_t^{sell} + R_t^{mine} \times r_t^{mine}). \quad (1)$$

Обмеження

$$p_t^{sell} + r_t^{mine} + s_t = G_t; \quad 0 \leq p_t^{sell} \leq C^{grid}; \quad 0 \leq r_t^{mine} \leq C^{mine}; \quad s_t \geq 0. \quad (2)$$

Інтерпретація: модель на кожному кроці розподіляє G_t між продажем, майнінгом та (за потреби) скидом, вибираючи комбінацію з максимальною економічною віддачею.

Проста однокрокова евристична стратегія

Якщо $P_t^{sell} > R_t^{mine} \rightarrow$ продавати; інакше $\rightarrow$ майнити (з урахуванням лімітів C^{grid} , C^{mine}).

LP-модель вище виконує аналогічну логіку, але забезпечує оптимальність рішень у межах усього горизонту.

Кроки використання (day-ahead + реальний час)

1. Зібрати добові прогнози G_t , P_t^{sell} , $R_t^{mine} \rightarrow$ розв'язати LP $\rightarrow$ отримати план p_t^{sell} , p_t^{mine} .
2. У реальному часі (кожні 5–15 хв) оновлювати дані і за потреби перевизначати план.

Висновки

Узагальнюючи, зростання частки ВДЕ установлює ціни на електроенергію доступнішими та частіше спричиняє нульові або негативні їх значення, що знижує дохідність продажу виробленої енергії та підсилює ефект «канібалізації» доходів. Водночас рентабельність майнінгу так само нестійка й залежить від ринкової ціни криптовалют, складності мережі та вартості електроенергії. Поєднання цих двох потоків у єдиній керованій системі з короткостроковими прогнозами та простою оптимізацією розподілу потужності дає змогу в кожний момент вибирати вигіднішу опцію, зменшувати скид енергії та стабілізувати грошовий потік без додаткових інвестицій у традиційні резерви.

Запропонована схема з добовим плануванням і корекцією в реальному часі показує практичну доцільність інтеграції майнінгу як гнучкого навантаження для підвищення економічної віддачі «зеленої» генерації та потенційної підтримки частотного балансування. Її результативність визначається якістю прогнозів і дотриманням технічних та регуляторних обмежень; подальша експериментальна перевірка на реальних даних дозволить уточнити параметри керування, оцінити ризики та за потреби доповнити модель накопичувачем енергії чи участю в ринках допоміжних послуг.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] L. Kozlovska, and B. Jarmelie, "Bitcoin Mining for EU Electricity Grids: An Energy Supply Management Tool," *Open Dialogue Foundation*, Brussels, Belgium, May 2024. [Online]. Available: https://en.odfoundation.eu/content/uploads/2024/05/20.05.2024_odf_bitcoin_mining_eu_elect_grids_eng-1.pdf. Accessed: Jul. 01, 2025.
- [2] *Frequency Containment Reserve: Key to Grid Stability*. [Electronic resource]. Available: <https://www.gridx.ai/knowledge/frequency-containment-reserve>. Accessed: Jul. 01, 2025.
- [3] N. Carter, S. Connell, B. Jones, D. Porter, and M. Rudd, *Leveraging Bitcoin Miners as Flexible Load Resources for Power System Stability and Efficiency*. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4634256>. Accessed: Jul. 01, 2025.

- [4] О. В. Бондарчук, «Використання надлишків згенерованої сонячної енергії для майнінгу криптовалют», у *Матеріали LIV Науково-технічної конференції факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації* 2025. Вінниця, Україна: ВНТУ, Бер. 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/23217/19212>. Дата звернення: 01.07.2025.
- [5] 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, Жовт. 2024. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-176-5-6-15>.
- [6] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, Д. О. Шалагай, і О. В. Мазурук, «Авторегресійні моделі процесу повоєнного відновлення та післявоєнного розвитку ВДЕ України», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 58-65, Лют. 2025. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-178-1-58-65>.
- [7] J. Mellerud, *Energy arbitrage: analyzing bitcoin mining's historical revenue per kWh*. [Online]. Available: <https://hashrateindex.com/blog/energy-arbitrage-analyzing-bitcoin-minings-historical-revenue-per-kwh>. Accessed: Jul. 01, 2025.
- [8] D. Gray, "The Economics of Bitcoin Halving: A Miners' Perspective," *Fidelity Digital Assets*, Boston, USA, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://www.fidelitydigitalassets.com/research-and-insights/economics-bitcoin-halving-a-miners-perspective>. Accessed: Jul. 01, 2025.
- [9] K. Zucchi, *Is Bitcoin Mining Still Profitable?* [Online]. Available: <https://www.investopedia.com/articles/forex/051115/bitcoin-mining-still-profitable.asp>. Accessed: Jul. 01, 2025.
- [10] N. Astam, "Chart of the day: Small bitcoin miners went negative for the first time." [Online]. Available: <https://ihodl.com/infographics/2018-10-10/chart-day-small-bitcoin-miners-went-negative-first-time>. Accessed: Jul. 01, 2025.
- [11] S. Mundy, *The lessons of Europe's upside-down power market: Negative electricity prices highlight need for policy reform*. [Online]. Available: <https://www.ft.com/content/01d90c80-a819-4c10-99d1-34a7b64bd0c5>. Accessed: Aug. 14, 2025.
- [12] N. Buli and F. Crellin, *Europe's solar power surge hits prices, exposing storage needs*. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/business/energy/europes-solar-power-surge-hits-prices-exposing-storage-needs-2024-06-21>. Accessed: Jul. 01, 2025.
- [13] Aleasoft Energy Forecasting, *Record solar photovoltaic in Portugal in the second week of May*. [Online]. Available: <https://aleasoft.com/record-solar-photovoltaic-portugal-second-week-may/>. Accessed: Jul. 01, 2025.

Рекомендована кафедрою системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.07.2025

Бондарчук Олексій Валерійович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: alexey.bondarchuk@aleax.me ;

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

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Bondarchuk¹

B. I. Mokin¹

Optimal Forecasting and Control of Mining as a Flexible System for Power Grid Balancing Based on the FCR Method

¹Vinnitsia National Technical University

The paper considers the concept of using cryptocurrency mining farms as a flexible load for balancing modern power systems through the Frequency Containment Reserve (FCR) mechanism. The combination of solar generation forecasting and optimal load control algorithms makes it possible to integrate mining into frequency regulation, thereby reducing risks associated with fluctuations in electricity and cryptocurrency prices. A model of dynamic power distribution is proposed, which allocates capacities between selling electricity to the market, using it for mining, or curtailment, depending on frequency deviations in the grid, forecasted generation, and market conditions.

The economic feasibility of this approach is substantiated: during hours of low or negative electricity prices, selling under the "green tariff" often results in losses, while redirecting excess energy to mining ensures more stable revenues. At the same time, mining profitability itself depends on market factors, which makes the application of an intelligent control system particularly relevant. The model includes both day-ahead planning and real-time adjustments, which allows minimizing curtailment, stabilizing cash flows, and improving the efficiency of renewable energy utilization.

The scientific novelty lies in combining renewable energy forecasting, optimal power allocation, and FCR support methods. This approach forms a new business model where mining farms act as active participants in energy markets, providing economic returns while enhancing system stability. The study also highlights the importance of regulatory aspects and the need to account for technical constraints, which determine the conditions for practical implementation. Further research should focus on real-data testing of the model, refinement of control parameters, and possible integration with energy storage systems.

Keywords: cryptocurrency mining, balancing power systems, renewable energy, solar power plant, green tariff, active consumer.

Bondarchuk Oleksii V. — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: alexey.bondarchuk@aleax.me ;

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