

УДК 004.94 (004.62)

Oleksandr Terentiev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Principal researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> **e-mail:** o.terentiev@gmail.com

Volodymyr Duda, graduate student
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4278-4635> **e-mail:** dudavolodimir@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR RESEARCHING THE IMPACT OF CRYPTOCURRENCY MINING TOWARDS CO₂ EMISSIONS

Abstract. *The article is dedicated to a current scientific and applied problem – the development of an information-analytical system for studying the impact of cryptocurrency mining on CO₂ emissions. The paper describes a system consisting of three modules, each of which has its own area of responsibility and functionality, providing flexibility for the use of various analytical models. The results of this research were achieved through the application of this system. The Pearson correlation coefficient for semi-annual data of hashrate and CO₂ emissions from 2014 to 2023 was calculated to be 0.87, indicating a strong linear relationship. Using Holt's linear model, it was forecasted that CO₂ emissions in 2025 will range from 3,895,776 to 5,259,276 tons per day. The proposed information system has a modular structure, uses data mining methods, and can be applied in other applied fields both independently and as part of other information-analytical systems as a subsystem.*

Keywords: *mathematical modelling, data processing, information and analytical system, CO₂ emission, cryptocurrency mining, Holt's linear trend model.*

О.М. Терентьев, В.О. Дуда

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, м. Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАЙНІНГУ КРИПТОВАЛЮТ НА ВИКИДИ СО₂

Анотація. *Стаття присвячена актуальній науково-прикладній проблемі – розробці інформаційно-аналітичної системи для дослідження впливу майнінгу криптовалют на викиди СО₂. В роботі описано систему, яка складається з трьох модулів, кожен з яких має власну область відповідальності та функціонал, що забезпечує гнучкість для використання різних аналітичних моделей. Результати даного дослідження досягнуті завдяки застосуванню даної системи. Обчислено значення кореляції Пірсона для піврічних даних хешрейту та викидів СО₂ за період з 2014 по 2023 роки, і воно дорівнює 0,87, що свідчить про наявність сильної лінійної залежності. З використанням лінійної моделі Хольта було спрогнозовано, що кількість викидів в 2025 році буде становити від 3,895,776 до 5,259,276 т щодобово. Пропонована інформаційна система має модульну структуру, використовує методи інтелектуального аналізу даних та може застосовуватись в інших прикладних областях окремо та в складі інших інформаційно-аналітичних систем як підсистема.*

Ключові слова: *математичне моделювання, обробка даних, інформаційно-аналітична система, викиди СО₂, майнінг криптовалют, модель Хольта з лінійним трендом.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.141-150>

© О.М. Терентьев, В.О. Дуда, 2024

Вступ

Майнінг криптовалют [1], таких як Біткойн (Bitcoin) або Етеріум (Ethereum), за останнє десятиріччя набув неабиякої популярності та розповсюдження у світі. Однак це призводить до появи проблеми енергоспоживання, оскільки майнінг криптовалют, насамперед Біткоїна, потребує значних обчислювальних потужностей. Для виконання відповідних обчислень, в криптомережі Біткоїна, використовуються спеціалізовані пристрої, які споживають велику кількість електроенергії. Це спричиняє значний вуглецевий слід [2], особливо у випадках, коли електроенергія генерується з невідновлюваних джерел, таких як вугілля або нафта. Більшість майнінгових ферм розташовані в регіонах із дешевою та часто неекологічною електроенергією, що додатково збільшує екологічне навантаження. Це призвело до рішень з обмеженнями на рівні країни чи пошуку альтернатив. Прогресивні та відповідальні майнінгові компанії починають використовувати відновлювані джерела енергії, щоб зменшити негативний вплив на довкілля. Деякі країни, наприклад Китай, вводять регуляції або заборони для зменшення енергетичного навантаження.

Дослідження впливу майнінгу криптовалют на екологію потребує використання комплексної інформаційно-аналітичної системи [3], яка повинна забезпечувати збір, збереження, аналіз та візуалізацію даних, що стосуються енергоспоживання, екологічних аспектів. Така інформаційно-аналітична система повинна забезпечувати автоматичний збір даних про хешрейт криптовалют з різних джерел, а також видобувати дані про енергоспоживання майнінгового обладнання, про вартість електроенергії та використання природних ресурсів для її генерації. Для розуміння екологічного впливу обчислювати вуглецевий слід на основі зібраних даних про енергоспоживання.

Криптомережі використовують різні механізми консенсусу. Майнінг, або Proof-of-Work (PoW), працює на ідеї, що для підтвердження блоку та отримання нагороди потрібно зробити велику кількість операцій. Альтернативою цього підходу є Proof-of-Stake (PoS), який не вимагає значних обчислювальних потужностей. Необхідно лише володіти певною кількістю монет, і від їх кількості залежить ймовірність бути обраним валідатором для отримання винагороди за підтвердження транзакцій у криптомережі.

Постановка задачі

Метою цього дослідження є розробка системи для вивчення майнінгу криптовалют, зокрема Біткоїна та Етеріума, з акцентом на його ефективність, інструменти, що використовуються в цьому процесі, а також на вплив споживання електроенергії [4] та викиди CO₂. Дане дослідження спрямоване на створення системи аналізу ефективності майнінгу з точки зору використання ресурсів, оцінку вартості електроенергії, необхідної для здійснення майнінгових операцій, та вивчення екологічних наслідків діяльності майнерів. Особливу увагу буде приділено вивченню впливу високого споживання енергії на довкілля і розгляду можливих шляхів зменшення негативного ефекту.

Задача дослідження полягає в наступних етапах:

– Пошук інформаційних джерел для вивантаження даних про хешрейт видобутку Біткоїна, викиди CO₂ тощо.

– Розробка системи для збору та обробки інформації. Розбиття її на модулі з різним функціоналом та областями відповідальності. Розробка аналітичного підмодуля для підготовки, нормалізації та перевірки на коректність зібраних даних перед подальшим аналізом.

– Створення методів та алгоритмів для виявлення зв'язків між різними параметрами, такими як хешрейт та вуглецевий слід.

– Використання статистичних методів та моделей для прогнозування впливу майнінгу на екологію.

– Оцінка рівня викидів CO₂. Визначення рівня викидів CO₂, пов'язаних із споживанням електроенергії для майнінгу. Аналіз впливу споживання енергії на вуглецевий слід.

– Пошук можливих рішень для зменшення впливу майнінгу на довкілля.

– Дослідження альтернативних методів майнінгу, які можуть бути менш енергозатратними та мають мінімальні негативні впливи на екологію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті "Cryptocurrency energy consumption: Analysis, global trends and interaction" [5], застосовуючи кореляційно-регресійний аналіз, дослідники розробили модель, яка відображає залежність між витратами в IT-секторі, енергоспоживанням для майнінгу монет Біткоїна та Етеріума і глобальною капіталізацією ринку криптовалют. В їх дослідженні було прогнозовано, що споживання енергії для майнінгу Біткоїна може збільшитися до 142 ТВт·год на рік до 2026 року, а вплив на довкілля від видобутку Біткоїна в 2022 році становив щонайменше 27,4 млн тонн викидів CO₂.

Кембриджський Біткойн-індекс споживання електроенергії (CBECI – Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index) [6] є інструментом для оцінки щоденного споживання електроенергії мережею Біткоїна та прогнозування щорічного споживання електроенергії. Його методологія базується на гібридному підході зверху вниз, спочатку розробленому Марком Бевандом, який використовує кошик реального обладнання з припущенням, що майнери діють як раціональні економічні агенти, використовуючи тільки прибуткове обладнання.

У дослідженні "Implications of cryptocurrency energy usage on climate change" [7] було встановлено зв'язок між викидами CO₂ та енергоспоживанням для майнінгу Біткоїна. Результати показали, що хешрейт має найбільший вплив на викиди CO₂ та енергоспоживання для його видобутку.

Теоретичні основи дослідження

Майнінг, або Proof-of-Work [1], є процесом видобутку цифрової валюти за допомогою спеціалізованого обладнання, який здійснюють учасники мережі [8]. Показник складності майнінгу [10] визначається хешрейтом мережі та часом, витраченим на знаходження попередніх блоків. Якщо хешрейт збільшується, це означає, що до майнінгу криптовалюти приєдналися нові учасники, додавши своє обладнання до мережі. Це призводить до зростання обчислювальної потужності мережі, що зменшує час, необхідний для знаходження блоку, порівняно з нижчим хешрейтом.

Хешрейт [9] – це сумарна обчислювальна потужність майнінгового обладнання, залученого в процес видобутку криптовалюти.

Система збору та обробки інформації

Інформаційно-аналітична система для дослідження впливу майнінгу криптовалют на економіку та екологію являє собою складну структуру, що охоплює декілька важливих компонентів та процесів. Для комплексного підходу до даного дослідження систему було поділено на три головних модулі, як показано на рис. 1: модуль збору інформації, модуль аналізу даних, модуль збереження та візуалізації даних.

Модуль збору інформації призначений для збору та збереження даних, пов'язаних з енергоспоживанням, екологічними та економічними аспектами майнінгу. Початкові дані збираються з різних джерел, що включають дані про хешрейт та ціни криптовалют, ефективність майнінгового обладнання та інформацію про екологічний вплив для генерації електроенергії.

Модуль аналізу даних відповідає за обробку зібраних даних, перетворюючи їх у табличні результати. Спершу проводиться попередня обробка: очищення від можливих помилок і аномалій, а також заповнення відсутніх значень.

Для обчислення кількості викидів CO₂ використовуються дані про енергоспоживання для розрахунку вуглецевого сліду. Це включає обчислення викидів CO₂, пов'язаних з виробництвом електроенергії для майнінгу, із урахуванням типу енергетичних ресурсів, що використовуються. Система аналізує, наскільки майнінг впливає на навколишнє середовище.

Модуль збереження та візуалізації даних відповідає за сховище, що накопичує результати аналізу у вигляді звітів, таблиць, графіків. Через цей модуль користувач взаємодіє з результатами роботи системи.

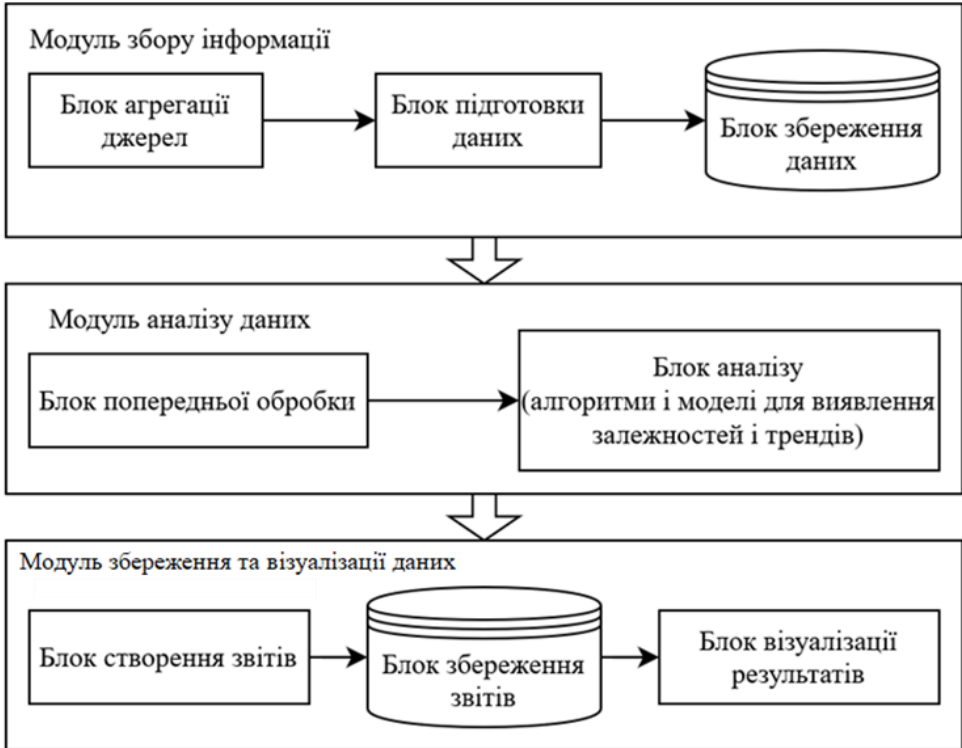


Рис. 1. Структура інформаційно-аналітичної системи

Екологічна проблема

Майнінг криптовалют є енергоємним процесом, і тому багато майнінг-ферм розташовані в регіонах з дешевою електроенергією (Грузія, Чорногорія, Україна, Казахстан), яка часто виробляється з вугілля або природного газу. Це зумовлює значний вуглецевий слід, оскільки спалювання вугілля та природного газу є основними джерелами викидів вуглекислого газу (CO_2) і інших шкідливих речовин.

Загальновідомо, що збільшення світового хешрейту тісно корелює зі збільшенням викидів CO_2 . Тобто, якщо вуглекислого газу при спалюванні вугілля виділяється більше 1 кг на 1 кВт·год [12], то, на основі попередніх обчислень, в атмосферу потрапляє більше ніж 216 000 тонн CO_2 кожен день.

Зв'язок між зростанням хешрейту та викидами CO_2 наведено на рис. 2. Обчислене значення кореляції Пірсона, для піврічних даних хешрейту та викидами CO_2 за період з 2014 по 2023 роки, дорівнює 0,87, що свідчить про наявність сильної лінійної залежності.

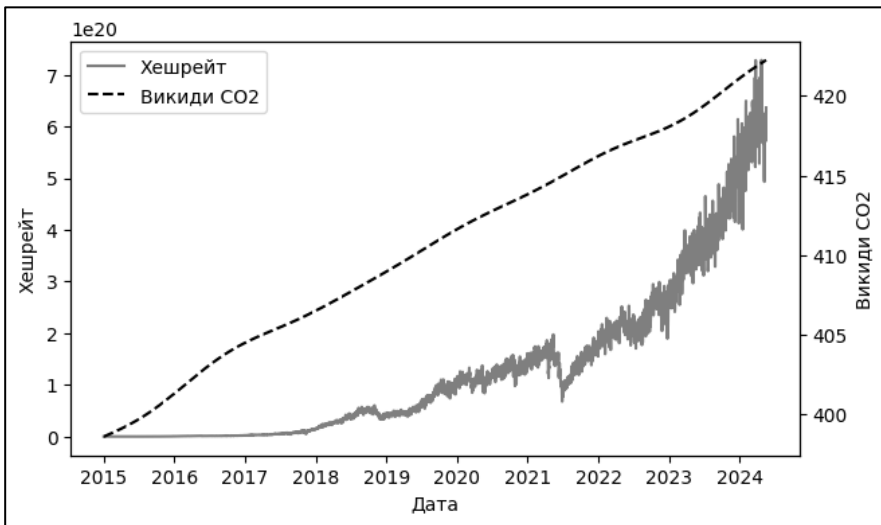


Рис. 2. Графік хешрейту (суцільна лінія, ліва вісь ординат, одиниця виміру 10^{20} X/c) та викидів CO_2 (штрихова лінія, права вісь ординат) за період з 2015 по 2024 роки

Оскільки хешрейт постійно з часом зростає, потреба в енергії для майнінгу збільшується, що, у свою чергу, підвищує викиди CO_2 , особливо якщо значна частина електроенергії походить від спалювання саме викопного палива (табл. 1).

Перехід до використання електростанцій з відновлюваними джерелами енергії для майнінгу криптовалют сприяє: зменшенню викидів CO_2 , зменшенню залежності від постачання вугілля та газу, стабільним витратам на енергію, позитивному іміджу криптоіндустрії через підтримку сталого розвитку.

Так як електростанції з відновлюваними джерелами періодично мають надлишкову енергію, то використання її для майнінгу може стати додатковим джерелом доходу для країни. Це дозволяє ефективно використовувати ресурси, які раніше були непридатними для комерційного використання.

Таблиця 1. Порівняння генерації енергії та кількості викидів CO₂ різними енергоресурсами в ЄС за 2023 рік [11]

Енергоресурс	Мін. генерація електроенергії (ГВт)	Макс. генерація електроенергії (ГВт)	Мін. к-сть викидів CO ₂ (Мт/день)	Макс. к-сть викидів CO ₂ (Мт/день)
Вугілля	23.63	57.46	0.65	1.58
Викопний газ	30.52	57.9	0.29	0.53
Атомна	56.71	78.43	Немає викидів	Немає викидів
Гідро	29.42	50.5	Немає викидів	Немає викидів
Вітряна	26.89	74.03	Немає викидів	Немає викидів
Сонячна	5.19	36.3	Немає викидів	Немає викидів

Заборона майнінгу криптовалют є також одним із варіантів розв'язання проблем, пов'язаних з високим енергоспоживанням та негативним впливом на екологію. Цей підхід передбачає введення на державному рівні регуляцій або повних заборон на діяльність, пов'язану з майнінгом криптовалют. Наслідки заборони майнінгу в Китаї показано в табл. 2, у вигляді зниження викидів CO₂ від майнінгу до нуля в цій країні.

Таблиця 2. Порівняння кількості викидів CO₂ за 2022 та 2024 роки [5]

Країна	Кількість викидів CO ₂ на 1 Твт·год	Відсоток світового хешрейту на 2022 рік	Кількість викидів CO ₂ на 2022 рік (Мт)	Відсоток світового хешрейту на 2024 рік	Кількість викидів CO ₂ на 2024 рік (Мт)
США	0.367	41	10.34	35.4	25
Китай	0.531	23	8.39	0	0
Казахстан	0.636	14	6.12	18.1	22.1
Малайзія	0.544	3	1.12	4.58	4.7
Німеччина	0.385	3	0.79	4.48	3.3
Канада	0.128	7	0.62	9.55	2.3

Прогнозування значення хешрейту на основі лінійної моделі Хольта

З метою прогнозування майбутнього значення хешрейту криптовалюти Біткоїн, що буде досягнуто в період з 2024 по 2030 роки, була побудована модель Хольта із урахуванням лінійного тренду. Дана модель – це модифікація методу експоненційного згладжування, що включає трендову складову. Описується дана модель наступним рівнянням [13]:

$$\hat{x}_\tau(t) = \hat{a}_{1,t} + \tau \cdot \hat{a}_{2,t},$$

де $\hat{x}_\tau(t)$ – значення прогнозу хешрейту, $\hat{a}_{1,t}$ – прогноз, очищений від тренду (за своєю суттю – експоненційне згладжування), $\hat{a}_{2,t}$ – параметр лінійного тренду, параметр τ – горизонт прогнозування [13]. Хольтом були запропоновані наступні рівняння для обчислення параметрів адаптації моделі лінійного росту:

$$\hat{a}_{1,t} = \alpha_1 \cdot x_t + (1 - \alpha_1) \cdot (\hat{a}_{1,t-1} + \hat{a}_{2,t-1}), \quad (1)$$

$$\hat{a}_{2,t} = \alpha_2 \cdot (\hat{a}_{1,t} + \hat{a}_{1,t-1}) + (1 - \alpha_2) \cdot \hat{a}_{2,t-1}, \quad (2)$$

де $\alpha_1, \alpha_2 \in (0 ; 1)$ – параметри експоненційного згладжування.

В рамках даного дослідження на основі використання мови програмування Delphi було реалізовано наступний алгоритм оцінювання параметрів моделі, що складається з двох кроків.

Перший крок – оцінювання коефіцієнтів. Для визначення початкових значень параметрів адаптації (оцінок коефіцієнтів адаптивного полінома першого порядку) $\hat{a}_{1,1}$ та $\hat{a}_{2,1}$, якщо розглянути горизонти прогнозування на 0 та 1 кроків, то можна отримати наступні рівняння [13]:

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \hat{x}_{\tau=0}(t = 1) = \hat{a}_{1,1}, \\ \hat{x}_2 &= \hat{x}_{\tau=1}(t = 1) = \hat{a}_{1,1} + \hat{a}_{2,1}. \end{aligned}$$

Нехай $\hat{x}_1 = x_1$, $\hat{x}_2 = x_2$, тоді можна отримати $\hat{a}_{1,t}$ та $\hat{a}_{2,t}$ в момент часу $t = 2$ у вигляді [13]:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{1,2} &= x_1, \\ \hat{a}_{2,2} &= x_2 - x_1. \end{aligned}$$

Другий крок – побудова прогнозу моделі Хольта. Обчисливши значення коефіцієнтів $\hat{a}_{1,t}$ та $\hat{a}_{2,t}$ на момент часу t , можна будувати прогноз $\hat{x}(t + \tau)$, тобто в момент часу на τ кроків вперед (горизонт τ) за формулою [13]:

$$\hat{x}(t + \tau) = \hat{x}_\tau(t) = \hat{a}_{1,t} + \tau \cdot \hat{a}_{2,t}.$$

Наприклад, для горизонту прогнозування $\tau = 1$ маємо:

$$\hat{x}_3 = \hat{x}(2 + 1) = \hat{x}_1(2) = \hat{a}_{1,2} + \hat{a}_{2,2},$$

де $\hat{a}_{1,2} = x_1$ та $\hat{a}_{2,2} = x_2 - x_1$.

Після чого обчислюються $\hat{a}_{1,3}$ та $\hat{a}_{2,3}$ за формулами (1) та (2) і отримуємо

$$\hat{x}_4 = \hat{x}(3 + 1) = \hat{x}_1(3) = \hat{a}_{1,3} + \hat{a}_{2,3},$$

далі аналогічним чином процес продовжується.

Перед побудовою моделі, дані хешрейту було прологарифмовано десятковим логарифмом, з метою згладжування викидів та аномалій в даних дослідженнях та звуження області допустимих значень. В результаті для наведеної моделі Хольта було отримано наступні значення оцінок коефіцієнтів моделі: $\hat{a}_{1,t} = 0,75$ та $\hat{a}_{2,t} = 0,34$. Для обчислення оцінок коефіцієнтів було використано власноруч написану програму, на мові програмування Delphi. На основі отриманої моделі побудовано прогноз на логарифмованих даних, після чого виконано операцію оберненого десяткового логарифмування, тобто десять піднесена до ступеня значення прогнозу. Статистична характеристика моделі за критерієм MAPE (mean absolute percent error – середня абсолютна

процентна похибка) склала 35%, тобто на ретроспективних історичних даних прогноз моделі відхилився від реального в середньому на 35%. В табл. 3 наведено відповідні реальні та отримані, на основі побудованої моделі Хольта, значення прогнозу хешрейту з 2014 до 2030 року.

Таблиця 3. Реальне та прогнозні значення хешрейту криптовалюти Біткоїн

Рік та місяць	Хешрейт (реальне значення) (X/c)	Хешрейт (десятичний логарифм) (X/c)	Прогнозне значення хешрейту (десятичний логарифм)	Прогнозне значення хешрейту (X/c)
2014_12	3,12109E+17	1,2429	17,3635	2,3094E+17
2015_12	8,22063E+17	1,2532	17,8407	6,92968E+17
2016_12	2,54042E+18	1,2649	18,4505	2,82171E+18
2017_12	1,42492E+19	1,2823	18,9662	9,25119E+18
2018_12	4,25221E+19	1,2929	19,8560	7,17724E+19
2019_12	9,51742E+19	1,3006	20,0703	1,17566E+20
2020_12	1,44611E+20	1,3045	20,2788	1,90027E+20
2021_12	1,72503E+20	1,3061	19,9764	9,47182E+19
2022_12	2,5304E+20	1,3097	20,4323	2,70586E+20
2023_12	4,1271E+20	1,3142	20,6097	4,07094E+20
2024_12			20,8170	6,56195E+20
2025_12			21,0199	1,04691E+21
2026_12			21,2228	1,67027E+21
2027_12			21,4257	2,66478E+21
2028_12			21,6285	4,25145E+21
2029_12			21,8314	6,78287E+21
2030_12			22,0343	1,08216E+22

На основі отриманих результатів можна розробити декілька сценаріїв.

Сценарій 1 (базовий, позитивний). Значення хешрейту у 2030 році буде дорівнювати 1,08216E+22, а ціна на електроенергію не зміниться і становитиме 0,11 євро. В цьому випадку кожен день викиди CO₂ будуть становити 3895776 т, а загальні витрати на майнінг дорівнювати 428,53 мільйонів євро.

Сценарій 2 (критичний, негативний). Значення хешрейту у 2030 році буде на 35% більше від базового позитивного сценарію та дорівнюватиме 1,46091E+22, при цьому вартість електроенергії зросте майже удвічі до 0,2 євро. В цьому випадку кожен день викиди CO₂ будуть становити 5 259 276 т, а загальні витрати на майнінг дорівнювати 1,052 мільярдів євро.

Для другого сценарію, значення ціни за електроенергію у 0,2 євро було визначено як найбільш очікувану, на основі аналізу зміни середньоєвропейської ціни за останні 7 років. Протягом цього періоду ціна на електроенергію зросла майже на 85%.

Висновки

У цій роботі представлено інформаційно-аналітичну систему для дослідження впливу майнінгу криптовалют на світове споживання електроенергії та викиди CO₂. Система складається з модулів, кожен з яких має власну область відповідальності та функціонал, що забезпечує гнучкість для використання різних аналітичних моделей. Результати дослідження наведені у вигляді таблиць та графіків.

В ході дослідження порівнюються різні інструменти майнінгу криптовалют та підходи, такі як Proof-of-Work (PoW) і Proof-of-Stake (PoS). Особлива увага приділяється оцінці споживання електроенергії в ЄС та рівню викидів CO₂, пов'язаних із майнінговою діяльністю.

Розроблено модуль для збору, обробки та аналізу інформації про обладнання для майнінгу, хешрейт, ціни на електроенергію в ЄС та викиди CO₂. З використанням моделі Хольта із включенням лінійного тренду було спрогнозовано вплив майнінгу на економіку та екологію на 2030 рік.

Досліджено можливі рішення для зменшення негативного впливу майнінгу на довкілля. Зокрема, запропоновано перехід на Proof-of-Stake, що дозволяє значно зменшити споживання енергії та викиди CO₂.

REFERENCES

1. Gervais, A., Karame, G. O., Wüst, K., Glykantzis, V., Ritzdorf, H., & Capkun, S. (2016). On the security and performance of proof of work blockchains. In *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC conference on computer and communications security* (pp. 3-16).
2. Butrym, O. V., & Panchenko, G. G. (2023). Carbon footprint of electricity production. *Energy Technologies & Resource Saving*, 77(4), 19–30. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.02>
3. Trofymchuk, O. M., & Itskovych, V. Ye. (2023). Method of processing information about the state of the environment based on data obtained through a service-oriented network. *Environmental Safety and Natural Resources*, 48(4), 117–129. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.117-129>
4. Ethereum. Ethereum Energy Consumption. Retrieved from <https://ethereum.org/en/energy-consumption/>
5. Bublyk, Y., Borzenko, O., & Hlazova, A. (2023). Cryptocurrency energy consumption: Analysis, global trends and interaction. *Environmental Economics*, 14(2), 49–59. [https://doi.org/10.21511/ee.14\(2\).2023.04](https://doi.org/10.21511/ee.14(2).2023.04)
6. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. Retrieved from <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>
7. Zhang, D., Chen, X. H., Lau, C. K., & Xu, B. (2023). Implications of cryptocurrency energy usage on climate change. *Technological Forecasting and Social Change*, 187, 122219. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122219>
8. Bitcoin. Running A Full Node. Retrieved from <https://bitcoin.org/en/full-node#what-is-a-full-node>
9. What is cryptocurrency mining? [Що таке майнінг криптовалют?] (In Ukrainian). Retrieved from <https://blog.whitebit.com/uk/what-is-cryptocurrency-mining/>
10. Fantazzini, D., & Kolodin, N. (2020). Does the Hashrate affect the bitcoin price? *Journal of Risk and Financial Management*, 13(11), 263. <https://doi.org/10.3390/jrfm13110263>
11. EU CO2 emission tracker. Retrieved from <https://energyandcleanair.org/product/eu-co2-emission-tracker/>

12. Skrypnyk, D. (2021). Organizational and economic mechanism of energy efficiency model development of the national economy (p. 111). Retrieved from https://science.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2021/12/Diss_SkrypnykD.pdf
13. Holt, C. C. (2004a). Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International Journal of Forecasting*, 20(1), 5–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2003.09.015>

Стаття надійшла до редакції 20.06.2024 і прийнята до друку після рецензування 06.09.2024

The article was received 20.06.2024 and was accepted after revision 06.09.2024

Терентьєв Олександр Миколайович

доктор технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник відділу прикладної інформатики, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> **e-mail:** o.terentiev@gmail.com

Дуда Володимир Олександрович

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4278-4635> **e-mail:** dudavolodimir@gmail.com