МІНІСТЕРСТВО ФІНАНСІВ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ПОДАТКОВИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ФІНАНСІВ ТА ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Оптимізація процесу фармінгу криптовалюти Chia: економічні та технічні аспекти»

Здобувача вищої освіти другого (магістерського) рівня,
ІІ курсу, крупи КМІ-24-2, спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»,
освітня програма «Інформаційні управляючі системи і технології в економіці»

(підпис) Бузинника Дмитра В'ячеславовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник (підпис) Редич Олександр Володимирович, канд.екон.наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Керівник освітньо-професійної програми (підпис) Омельчук Антон Анатолійович, канд. техн. наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту за рішенням кафедри, протокол № 10 від «02» січня 2026

Завідувач кафедри (підпис) Філоненко Михайло Миколайович, канд. фіз.-мат. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Ірпінь – 2026

Реєстрація № 2 — 16.01.2026 (дата) — (підпис відповідальної особи)

Результати перевірки — до захисту (до захисту, на доопрацювання) — 20.01.2026 (дата) — (підпис)

Результат захисту — 5 (відмінно) (оцінка) — 04.02.2026 (дата) — (підпис)

Голова комісії: (підпис) О.С. Дюбанов

Члени комісії:

(підпис) А.Ю. Горбовий

(підпис) М.М. Філоненко

(підпис) І.Д. Погорєловська

БЛАНК ОЦІНЮВАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Об'єкти контролю	Діапазон оцінки в балах	Фактична кількість балів	Примітки	Дата, П.І.Б.: керівника, голови комісії членів комісії,секретаря, (підписи)
ОЦІНЮВАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ КОМІСІЄЮ ПО ЗАХИСТУ				
1. Зміст кваліфікаційної роботи (якість теоретичного матеріалу, його зв'язок з практичним, вміння представляти матеріал в логічній послідовності, наявність висновків та пропозицій)	**від 0 до 30**	27		04.02.2026 Дюбанов О.С. Горбовий А.Ю. Філоненко М.М. Погорєловська І.Д. Суховецька Л.П.
2. Дотримання вимог щодо оформлення	**від 0 до 10**	7		
3. Вчасне виконання роботи на всіх етапах у встановлені кафедрою терміни	**від 0 до 5**	5		
4. Рецензент	**від 0 до 5**	5		
РАЗОМ БАЛІВ	**від 0 до 50**	44		

Оцінювання кваліфікаційної роботи науковим керівником - 46 балів.

ПЕРЕВЕДЕННЯ ОЦІНКИ ЗА 100-БАЛЬНОЮ ШКАЛОЮ ДО НАЦІОНАЛЬНОЇ ШКАЛИ ТА ШКАЛИ ЄКТС

Оцінка за 100-бальною шкалою	Оцінка за шкалоюЄКТС	Оцінка за національною шкалою	Дата	П.І.Б.: голови, членів комісії, секретаря, (підпис)
90	A	5	04.02.2026	Дюбанов О.С. Горбовий А.Ю. Філоненко М.М. Погорєловська І.Д. Суховецька Л.П.

ПРАВИЛА ПЕРЕВЕДЕННЯ ОЦІНОК ДО НАЦІОНАЛЬНОЇ ШКАЛИ ТА ШКАЛИ ЄКТС

Оцінка за 100-бальною шкалою	Оцінка за шкалою ЄКТС	Оцінка за національною шкалою
90-100	A	5 (відмінно)
80-89	B	4 (добре)
70-79	C	
60-69	D	3 (задовільно)
50-59	E	
35-49	FX	2 (незадовільно)

Факультет фінансів та цифрових технологій
Кафедра комп'ютерних та інформаційних технологій і систем
Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»
Освітня програма «Інформаційні управляючі системи і технології в економіці»

Затверджую
Завідувач кафедри _____ Філоненко М.М.
«11» грудня 2024

Завдання на кваліфікаційну роботу
здобувачу вищої освіти
Бузиннику Дмитру В'ячеславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи:
«Оптимізація процесу фармінгу криптовалюти Chia: економічні та технічні аспекти»
Затверджена наказом ректора №1852 від 10.12.2024.
2. Строк здачі закінченої роботи «02» січня 2026
3. Мета роботи *визначення ефективних конфігурацій обладнання та параметрів його налаштування для зменшення витрат і підвищення прибутковості процесів фармінгу криптовалюти Chia на основі дослідження їх економічних та технічних аспектів.*

Об'єкт дослідження *процес фармінгу криптовалюти Chia як техніко-економічна система, що включає апаратне забезпечення, програмні компоненти та енергетичні характеристики.*
Предмет дослідження *методи та інструменти оптимізації фармінгу Chia, зокрема обладнання та параметри роботи HDD, режими APM.*
Орієнтовна база дослідження *відкриті ресурси та інформація про технології блокчейну та криптовалюти.*
4. Вихідні дані до роботи *спільнота та мережа криптовалюти Chia.*
5. Перелік графічного матеріалу *структурні схеми, алгоритми, лістинги програм, зображення стенду.*
6. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань за кожним розділом)
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ
1.1. Теоретичні основи аналізу фармінгу
1.2. Огляд блокчейн платформ
1.3. Постановка задачі оптимізації
РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ФАРМІНГУ
2.1. Технічна структура системи тестування

2.2. Огляд моделі оптимізації, використання технічного обладнання
2.3. Опис параметрів оптимізації
РОЗДІЛ 3.ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА: ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ ФАРМІНГУ, АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ
3.1 Організація процесу тестування
3.2. Дослідження параметрів оптимізації (було раніше: Оптим налаштувань) Розробка моделі для тестування системи. Аналіз резуль збору подій ядра операційної системи Windows
3.3. Математичні моделі дослідження та результати аналізу ефектив системи.

7. Календарний план виконання роботи

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційноїроботи	Строк виконання етапів роботи	
		За планом	Фактично
1	2	3	4
1	Вибір теми, підбір літературних джерел, формування структури кваліфікаційної роботи	До 15.12.2024	«13» 12.2024
2	**І розділ** (розкрити сутність і стан дослідження наукової проблематики роботи, після чого навести її загальну характеристику; огляд літератури за темою і вибір конкретних напрямів досліджень)	30.05.2025	«27» 05.2025
3	**ІІ розділ** (аналіз експериментальної частини про методики досліджень)	09.09.2025	«08» 09.2025
4	**ІІІ розділ** (проведені теоретичні і (або) експериментальні дослідження та проектні рішення)	22.11.2025	«20» 11.2025
5	**Висновки**	16.12.2025	«13» 12.2025
6	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень наукового керівника	20.12.2025	«20.» 12.2025
7	Отримання відгуку керівника	25.12.2025	«24» 12.2025
8	Отримання зовнішньої рецензії	25.01.2026	«25» 01.2026

8. Дата видачі завдання 11 грудня 2024

9. Керівник кваліфікаційної роботи — Редич О.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

10. Керівник освітньо-професійної програми — Омельчук А.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

11. Завдання до виконання отримав здобувач вищої освіти — Бузинник Д.В
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

«Оптимізація процесу фармінгу криптовалюти Chia: економічні та технічні аспекти»

Мета роботи полягає в визначенні ефективних конфігурацій обладнання та параметрів його налаштування для зменшення витрат і підвищення прибутковості процесів фармінгу криптовалюти Chia на основі дослідження їх економічних та технічних аспектів.

Завдання роботи:

1. Проаналізувати технічні та економічні фактори, що впливають на ефективність фармінгу Chia.
2. Дослідити режими APM та їхній вплив на енергоспоживання та швидкодію дискових систем.
3. Провести експериментальні вимірювання енергоспоживання HDD та затримок IO у режимах APM=1, 64 та 128.
4. Побудувати математичну модель енергоспоживання та дискових затримок.
5. Розробити рекомендації щодо оптимальних налаштувань обладнання для підвищення енергоефективності.

Предметом дослідження є методи та інструменти оптимізації фармінгу Chia, зокрема обладнання та параметри роботи HDD, режими APM.

Об’єктом дослідження виступає процес фармінгу криптовалюти Chia як техніко-економічна система, що включає апаратне забезпечення, програмні компоненти та енергетичні характеристики.

Базою дослідження виступає відкриті ресурси та інформація про технології блокчейну та криптовалюти.

За результатами дослідження сформульовані рекомендації щодо оптимального вибору режимів керування енергоспоживанням жорстких дисків (Advanced Power Management) у процесі фармінгу криптовалюти Chia, з урахуванням компромісу між зменшенням енергоспоживання та збільшенням часових затримок дискових операцій.

Встановлено, що використання знижених значень APM дозволяє досягти суттєвої економії електроенергії, проте потребує врахування впливу на швидкодію системи фармінгу та стабільність обробки запитів введення-виведення.

Одержані результати можуть бути використані при проєктуванні та експлуатації енергоефективних систем фармінгу криптовалюти Chia на основі жорстких дисків, а також при оптимізації параметрів обладнання з метою зменшення експлуатаційних витрат.

Запропоновані підходи можуть бути застосовані практикуючим фармерам, адміністраторам нод блокчейну, а також використані в подальших наукових дослідженнях, пов’язаних з аналізом енергоспоживання та продуктивності систем зберігання даних.

Кваліфікаційна робота містить 52 сторінки, 2 таблиць, 9 рисунків, список використаних джерел з 46 найменувань, 3 додатків.

Ключові слова: криптовалюта Chia, фармінг на жорстких дисках, енергоспоживання, розширене керування живленням, оптимізація параметрів дисків, енергоефективність, блокчейн.

Рік виконання кваліфікаційної роботи 2025-2026.

Рік захисту роботи 2026.

ABSTRACT

"Optimization of the Chia Cryptocurrency Farming Process: Economic and Technical Aspects"

The purpose of this work is to determine effective hardware configurations and their operating parameters in order to reduce costs and increase the profitability of Chia cryptocurrency farming processes based on the analysis of their economic and technical aspects.

Objectives of the study:

1. To analyze the technical and economic factors affecting the efficiency of Chia farming.
2. To investigate Advanced Power Management (APM) modes and their impact on energy consumption and performance of disk systems.
3. To conduct experimental measurements of HDD energy consumption and I/O latency under APM modes 1, 64, and 128.
4. To develop a mathematical model of energy consumption and disk latency.
5. To formulate recommendations for optimal hardware settings aimed at improving energy efficiency.

The subject of the study is the methods and tools for optimizing Chia farming, in particular HDD hardware, operating parameters, and APM modes.

The object of the study is the Chia cryptocurrency farming process as a technical and economic system that includes hardware, software components, and energy characteristics.

The research base consists of open resources and publicly available information related to blockchain technologies and cryptocurrencies.

Based on the results of the study, recommendations were formulated for the optimal selection of hard disk power management modes (Advanced Power Management) in the Chia farming process, taking into account the trade-off between reduced energy consumption and increased disk operation latency.

It was found that the use of lower APM values allows achieving significant energy savings; however, it requires consideration of the impact on farming system performance and the stability of input/output request processing.

The obtained results can be used in the design and operation of energy-efficient Chia cryptocurrency farming systems based on hard disk drives, as well as in the optimization of hardware parameters to reduce operational costs.

The proposed approaches may be applied by practicing farmers and blockchain node administrators and may also be used in further scientific research related to the analysis of energy consumption and performance of data storage systems.

The qualification thesis contains 52 pages, 2 tables, 9 figures, a list of references consisting of 46 sources, and 3 appendices.

Keywords: cryptocurrency Chia, hard disk farming (HDD), power consumption, Advanced Power Management (APM), disk optimization, energy efficiency, blockchain.

Year of completion of the master's thesis 2025-2026.

Year of defense of the work 2026.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ 3
ВСТУП 5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ 9
1.1. Теоретичні основи аналізу фармінгу 9
1.2. Огляд блокчейн платформ 13
1.3. Постановка задачі оптимізації 20
РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ФАРМІНГУ 24
2.1. Технічна структура системи тестування 24
2.2. Огляд моделі оптимізації, використання технічного обладнання 27
2.3. Опис параметрів оптимізації 28
РОЗДІЛ 3 32
ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА: ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ З ОПТИМІЗАЦІЇ ФАРМІНГУ, АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ 32
3.1 Організація процесу тестування 32
3.2. Дослідження параметрів оптимізації. 39
Аналіз результатів збору подій ядра операційної системи Windows 10 39
3.3. Математичні моделі дослідження та результати аналізу ефективності системи ... 41
ВИСНОВКИ 47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 49
ДОДАТКИ 53
Додаток А 53
Додаток Б 54
Додаток В 55

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

AC (англ. Alternating Current) – змінний струм.

DC (англ. Direct Current) – постійний струм.

ASIC (англ. Application-Specific Integrated Circuit) – спеціалізована інтегральна схема.

APM (англ. Advanced Power Management) – розширене керування живленням жорсткого диска.

CPU (англ. Central Processing Unit) – центральний процесор.

GPU (англ. Graphics Processing Unit) – графічний процесор.

HDD (англ. Hard Disk Drive) – жорсткий магнітний диск.

SSD (англ. Solid State Drive) – твердотілий накопичувач.

USB (англ. Universal Serial Bus) – універсальна послідовна шина.

SATA (англ. Serial ATA) – послідовний інтерфейс підключення накопичувачів.

NTFS (англ. New Technology File System) – журналююча файлова система ОС Windows.

PoW (англ. Proof of Work) – «доказ роботи», алгоритм консенсусу блокчейну.

PoS (англ. Proof of Stake) – «доказ частки володіння», алгоритм консенсусу блокчейну.

PoC (англ. Proof of Capacity) – «доказ ємності», консенсус на основі дискового простору.

PoST (англ. Proof of Space and Time) – «доказ простору та часу», алгоритм консенсусу, що використовується в Chia.

ETW (англ. Event Tracing for Windows) – технологія трасування подій в ОС Windows.

WPT (англ. Windows Performance Toolkit) – набір засобів аналізу продуктивності Windows.

WPR (англ. Windows Performance Recorder) – засіб запису трасувальних даних Windows.

WPA (англ. Windows Performance Analyzer) – засіб аналізу трасувальних даних

Windows.

CSV (англ. Comma-Separated Values) – текстовий формат табличних даних.

URL (англ. Uniform Resource Locator) – уніфікований локатор ресурсу (веб-адреса).

XCH – нативна криптовалюта (токен) блокчейну Chia.

EiB (англ. Exbibyte) – ексбібайт, 2^{160} байт.

TiB (англ. Tebibyte) – тебібайт, 2^{40} байт.

kWh – кіловат-година, одиниця вимірювання спожитої електроенергії.

NoSSD – стороннє програмне забезпечення для фармінгу Chia зі стисненими плотами.

K32 – стандартний розмір плота Chia (близько 101,4 GiB).

C34 – рівень стиснення плота в програмному забезпеченні NoSSD.

ПК – персональний комп’ютер.

ОС – операційна система.

ПЗ – програмне забезпечення.

ВСТУП

Сучасний розвиток інформаційних технологій та цифрової економіки супроводжується стрімким збільшенням обсягів обробки, зберігання та передачі даних. Це створює нові вимоги до ефективності інформаційних систем, їх енергоспоживання та надійності. В умовах глобальних кліматичних викликів та зростання вартості електроенергії особливо важливим стає питання оптимізації використання апаратних ресурсів, зокрема накопичувачів даних, які є критичним компонентом у багатьох інформаційних інфраструктурах. У цьому контексті актуальним є пошук методів зменшення енергоспоживання без втрати продуктивності та стабільності роботи систем.

Окрему нішу в сучасних інформаційних системах займають технології блокчейн та криптовалюти, які все частіше розглядаються не лише як фінансові інструменти, а й як практична реалізація децентралізованих механізмів зберігання та перевірки даних. На відміну від традиційних криптовалютних систем, що використовують алгоритм Proof of Work і потребують значних енергетичних витрат, екосистема Chia базується на алгоритмі Proof of Space and Time [41], який передбачає використання дискового простору замість потужних обчислювальних ресурсів. Це робить Chia потенційно енергоефективною технологією, однак практична ефективність залежить від конфігурації обладнання, параметрів дискових систем та режимів їхньої роботи.

Актуальність теми. Незважаючи на активне поширення технології Chia, питання оптимізації процесу фармінгу криптовалюти залишаються слабко дослідженими. Більшість наявних робіт зосереджені на аналізі загальної архітектури мережі Chia, механізмах розподілу навантажень або побудові економічних моделей прибутковості. Технічні параметри роботи жорстких дисків, зокрема режими Advanced Power Management (APM), затримки введення-виведення (IO Time, Service Time), а також вплив енергозберігаючих механізмів на стабільність та швидкодію фармінгу, практично не вивчалися у науковому середовищі. Інформація з відкритих джерел, включно з технічними форумами та непрофесійними

експериментами користувачів, не має характеру системного дослідження та не дозволяє сформулювати аналітично обґрунтовані рекомендації.

Тому проведення структурованого експериментального дослідження енергоспоживання HDD у різних режимах APM під час фармінгу Chia є актуальним та своєчасним завданням. Особливо важливим є визначення балансу між енергозбереженням та продуктивністю, оскільки агресивні режими економії (наприклад, APM=1) можуть знижувати потужність, але збільшувати затримки доступу до даних та ризик втрати доказів (proofs), що негативно впливає на економічну ефективність ферми.

Мета роботи. Визначення ефективних конфігурацій обладнання та параметрів його налаштування для зменшення витрат і підвищення прибутковості процесів фармінгу криптовалюти Chia на основі експериментально отриманих практичних результатів.

Ступінь розробки проблеми. Технологічні аспекти роботи жорстких дисків у режимах енергозбереження досліджені лише частково та переважно в контексті серверних навантажень або мобільних пристроїв. У сфері криптовалютних технологій майже відсутні комплексні роботи, що досліджують саме поведінку дискових підсистем під час фармінгу Chia, аналізують затримки введення-виведення та вплив APM на продуктивність. Наявні джерела не містять даних щодо взаємозв’язку між енергоспоживанням, чергами доступу до диска та економічною вигодою фермерських вузлів. Це визначає недостатній ступінь дослідженості проблеми та підкреслює актуальність роботи.

Об’єктом дослідження є процес фармінгу криптовалюти Chia як техніко-економічна система, що включає апаратне забезпечення, програмні компоненти та енергетичні характеристики.

Предметом дослідження є методи та інструменти оптимізації фармінгу Chia, зокрема підвищення ефективності використання обладнання, параметри роботи HDD, режими APM, затримки введення-виведення та їхній вплив на

енергоспоживання й рентабельність.

Завдання дослідження:

6. Проаналізувати технічні та економічні фактори, що впливають на ефективність фармінгу Chia.
7. Дослідити режими APM та їхній вплив на енергоспоживання та швидкодію дискових систем.
8. Провести експериментальні вимірювання енергоспоживання HDD та затримок IO у режимах APM=1, 64 та 128.
9. Побудувати математичну модель енергоспоживання та дискових затримок.
10. Розробити рекомендації щодо оптимальних налаштувань обладнання для підвищення енергоефективності.

Методи дослідження включають експериментальні вимірювання енергоспоживання за допомогою ватметра, аналіз дискових метрик у Windows Performance Analyzer (IO Time, Service Time), статистичну обробку результатів, побудову математичної моделі та порівняльний аналіз продуктивності.

Наукова новизна. У роботі вперше виконано комплексне експериментальне дослідження впливу різних значень Advanced Power Management (APM) на енергоспоживання та робочу затримку жорстких дисків у процесі фармінгу криптовалюти Chia. Побудовано математичну модель, що описує залежність енергоспоживання диска від його режиму роботи та дискових затримок, включаючи IO Time, Service Time та Queue Time. Уперше встановлено кількісну взаємозалежність між зниженням енергоспоживання (до 13,34% у режимі APM=1) та збільшенням затримок доступу, що дозволяє оцінювати оптимальний баланс між енергоефективністю та швидкодією. Отримані результати можуть бути використані як основа для налаштування фермерських систем Chia з метою зменшення експлуатаційних витрат.

Апробація. Огляд перспектив розвитку та ризики блокчейну Chia були

представлені на міжн. наук.-практ. Інтернет-конф. «Економіка і бізнес: нові реалії, технологічні тренди, цифрові інновації» (Львів-Ірпінь, 15 травня 2025 р.), тези доповіді опубліковані у збірнику тез конференції [1].

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ

1.1. Теоретичні основи аналізу фармінгу

Фармінг криптовалюти являє собою процесом підтримки роботи блокчейн мережі (в даному випадку на мережі під назвою ”Chia”), за допомогою вільного місця на жорстких дисках. Це процес обслуговування блокчейну, в свою чергу блокчейн входить до такого поняття як «криптовалюта».

Криптовалюта — це децентралізована цифрова валюта, що використовує криптографію для забезпечення транзакцій та контролю над випуском нових одиниць. Криптовалюти, як-от Chia, слугують засобом обміну та збереження вартості в цих цифрових середовищах. **Криптовалюти** забезпечують фінансову інфраструктуру для цих процесів, дозволяючи здійснювати транзакції без посередників та знижуючи операційні витрати. Прикладом може слугувати блокчейн «Chia Network», який був заснований у 2017 році Бремом Коеном, творцем BitTorrent. Її основна мета — створення більш екологічної та безпечної криптовалюти [1].

Метою створення першої криптовалюти була незалежність від банківської системи, тобто вилучення 3-ї сторони (посередника) для збільшення безпеки (людського фактору), швидкості транзакцій, незалежності як суб’єкта. Саме на основі блокчейну і створена криптовалюта. По суті криптовалюта це просто запис даних який знаходиться всередині одного із блоків в блокчейні, а в свою чергу блокчейн і складається з ланцюга багатьох блоків які зв’язані між собою.
На сьогоднішній час електронні гроші на основі блокчейну розглядаються багатьма країнами як наступну еволюцію цінностей (грошей). Ми можемо передати будь-яку кількість криптовалюти знаходячись на різних кінцях земної кулі - за допомогою спеціального програмного забезпечення. Зняття коштів відбувається через біржі-посередники чи інших сірих посередників.

Технологія забезпечує децентралізоване, захищене та незмінне зберігання інформації й може застосовуватися як для обігу електронних грошей, так і для

електронного нотаріату, смарт-контрактів та систем електронного голосування. У навчальній літературі підкреслюється, що блокчейн виступає базою для побудови кіберпростору з високим рівнем довіри між учасниками мережі та вимагає розв’язання комплексу теоретичних і практичних задач – від протоколів консенсусу до математичного обґрунтування параметрів реальних блокчейн-систем [4]. Окремий напрям розвитку теорії та практики блокчейну пов’язаний з розглядом його як особливого типу розподіленої бази даних. У наукових публікаціях зазначається, що блокчейн змінює підхід до зберігання та обробки інформації: дані організовано у вигляді послідовності незмінних блоків, пов’язаних криптографічно, а копія реєстру підтримується на багатьох вузлах мережі. Це забезпечує високу стійкість до змін, прозорість історії транзакцій та підвищену надійність порівняно з традиційними централізованими базами даних. При цьому підкреслюється, що блокчейн активно досліджується й впроваджується в різних галузях — від фінансового сектору та логістики до охорони здоров’я та державних електронних сервісів, зокрема й в Україні [5]. Тобто серед переваг блокчейну слід зазначити її неможливість змінення її минулої історії, щодо безпеки у теперішній час - відповідають незалежні суб’єкти (ноди), які знаходяться у різних місцях нашої планети та ведуть книгу записів транзакцій. Причому істиною книгою записів буде вважатися та - яка знаходиться у хоча б 51% тримачів нод. Консенсус Накамото який описується у білому листі першої криптовалюти "біткоїн" описує детально, чому саме 51% буде істиною. Нода - це просто програмне забезпечення, яке керується своїми правилами. Тримачами цих нод називають майнерами. Але саме тримачів нод, які використовують саме жорсткі диски - називають фармерами.

Також слід зазначити можливість відмови в транзакції через деякий час - якщо сторони не виконають певні умови, це забезпечує захист від шахраїв. Активи доступні 24 години на добу. Навіть у разі виникнення стихійних лих та не переборних умов - активи можна вивести з власного рахунку, при умові зберігання ключа доступу (seed фрази, яка складається з 24 слів) в cloud хмарі в зашифрованому вигляді, вигравірувана табличка з металу для доступу до

власного рахунку та ін.

На сьогоднішній час вплив цифрових валют у найближчій перспективі - переоцінений, але у довгостроковій перспективі - недооцінений. Тому все більше спільнот розглядають блокчейн як не переписувальну скарбничку з даними, забезпечуючи достовірність та відкритість.

Використання методу "доказу роботи" (Proof Of Work), який використовує протокол Біткоїн, доносив припущення що це може створити надлишкову роботу яка буде споживати значну кількість електроенергії на всій планеті. З часом - все більше користувачів стали користуватися цим протоколом і це припущення підтвердилося. Споживання значної кількості електроенергії потрібна для знаходження красивого числа "nonce" майнерами, цей процес спочатку відбувався на звичайних домашніх процесорах "CPU", але потім перейшов на спеціалізованого спеціалізованого обладнання для обчислень "asic" [2].

Цей розвиток спеціалізованого обладнання, а саме концентрація його у великій кількості в великих поодиноких приміщеннях створив послаблення основного принципу Біткоїну - децентралізацію. Оскільки спеціалізоване обладнання для майнінгу належить та експлуатується кількома великими організаціями, розташованих поблизу місць розташування з дешевою електроенергією. Таким чином відбулася централізація пристроїв які підтримують безпеку блокчейну. Більш того використання великої кількості електроенергії порушує складні питання щодо викидів вуглецю, електронних відходів.

Використання протоколу Chia використовує досвід Біткоїну, та створює нову криптографію та технології. Завдяки цьому швидкість транзакцій та розмір блоків збільшився вдвічі завдяки сучасній інженерії створення програмного забезпечення. Новий консенсус Накамото, «Доказ простору та часу» (Proof of Space and Time), є значно енергоефективнішим [43], ніж «Доказ роботи»(Proof of Work). На теперішній час Chia не має спеціалізованого обладнання для фармінгу у корпоративному масштабі (asic), це створює передумови для безпеки мережі. Chia має 35 тисяч нод (рис.1.1) [37] (карту перебування фармерів України можна

передивитись на електронному ресурсі за посиланням [36] (Додаток Б)), а Біткоїн має лише 18500 нод [38], що в свою чергу ставить її у лідери серед кількістю нод і фармерів. Це забезпечує безпеку функціонування мережі та у свою чергу — транзакцій.

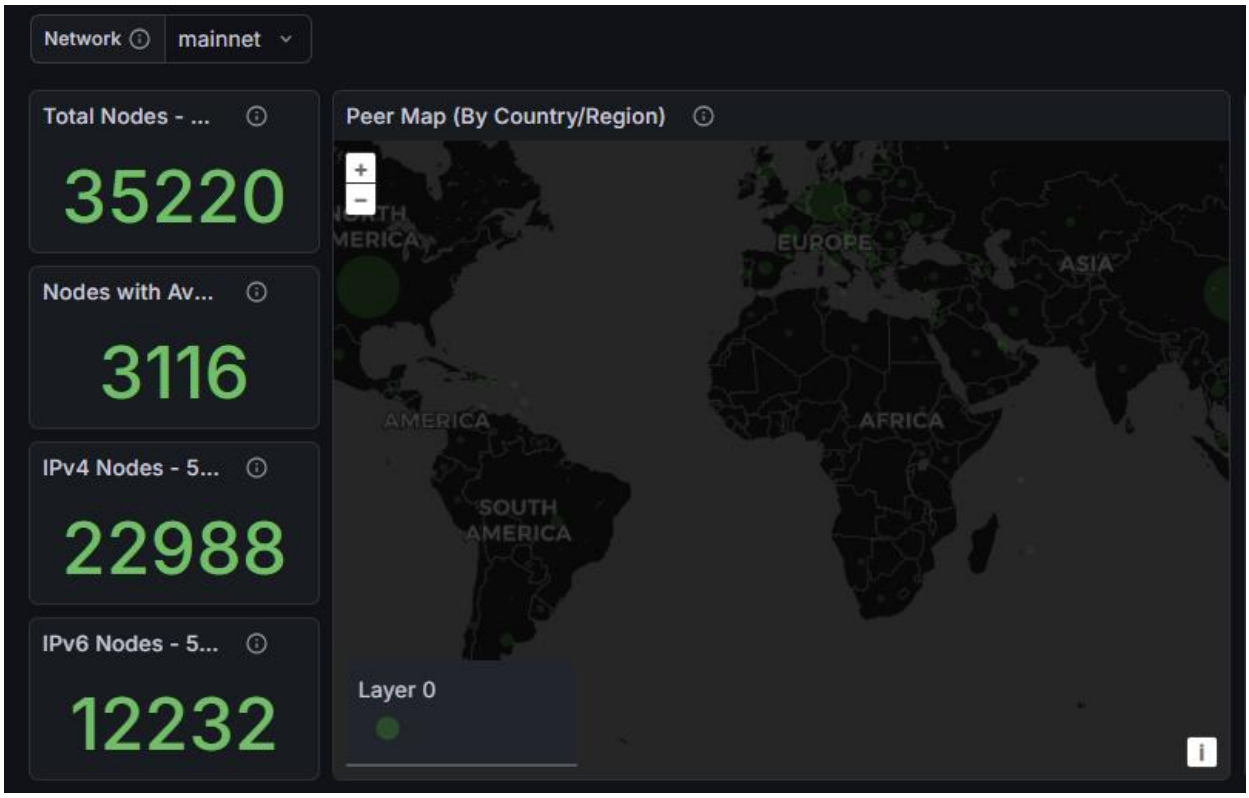


Рис.1.1 Кількість нод Chia, у 2025 році

Правове поле та готовність до блокчейну в Україні.

Окрему увагу при аналізі блокчейн-платформ доцільно приділити умовам їх упровадження в Україні. У вітчизняних дослідженнях підкреслюється, що блокчейн розглядається як цифровий реєстр, у якому записи організовано у вигляді послідовності блоків, а дані зберігаються децентралізовано на багатьох вузлах мережі. Це створює високий рівень прозорості та довіри між учасниками, оскільки зміна вже зафіксованої інформації практично неможлива без виявлення порушення. В Україні правове регулювання віртуальних активів перебуває на стадії формування та розвитку. У 2022 році було прийнято Закон України «Про віртуальні активи», який визначає загальні правові засади обігу віртуальних активів, однак його повноцінне впровадження залежить від змін до

податкового та фінансового законодавства. Закон розглядає віртуальні активи як нематеріальні блага, що мають вартість та можуть бути об’єктом цивільних прав, але не визнає їх платіжним засобом. Станом на сьогодні значна частина нормативної бази залишається у вигляді проєктів та концепцій, що зумовлює актуальність досліджень у сфері технологій блокчейну, криптовалют та їх економічного впливу [3].

Глобальний рівень: L2-рішення та економічний потенціал.

Додатково Chia розвивається як базовий рівень для створення рішень другого рівня (Layer 2), що дозволяє будувати токенізовані сервіси, смарт-контракти та фінансові інструменти поверх основного блокчейну. Використання Chialisp та механізмів CAT (Chia Asset Tokens) відкриває можливість створення цифрових активів, які можуть бути інтегровані з централізованими та децентралізованими біржами. Це формує передумови для виходу екосистеми Chia за межі класичного фармінгу та її використання у глобальній фінансовій інфраструктурі, зокрема для прозорого обліку активів, екологічних сертифікатів і вторинних ринків цифрових токенів [46].

1.2. Огляд блокчейн платформ

Розвиток блокчейну привів до появи кількох класів алгоритмів консенсусу: класичного Proof-of-Work (PoW), Proof-of-Stake (PoS), а також альтернатив, що використовують дисковий простір як основний ресурс – Proof-of-Space (PoS), Proof-of-Capacity (PoC), Proof-of-Space-Time (PoST) та різні варіанти proof-of-storage для децентралізованих сховищ. На відміну від PoW, де витрачаються великі обсяги електроенергії на обчислення хешів, підходи на основі простору диску використовують відносно дешевий та універсальний ресурс – жорсткі диски та інші накопичувачі, що зменшує енергоспоживання і знижує поріг входу для учасників мережі [44].

Найближчими до теми даної роботи є блокчейн-системи, у яких жорсткі диски є ключовим ресурсом для забезпечення консенсусу: Chia (Proof of Space

and Time), Signum (колишній Burstcoin, Proof of Capacity / Proof of Commitment), MASS, Spacemesh, а також низка платформ децентралізованого зберігання даних (Filecoin, Sia, Storj, Arweave), що використовують надлишковий дисковий простір для зберігання корисних даних. Нижче наведено короткий огляд цих рішень та порівняння їх з Chia.

Підходи до консенсусу на основі дискового простору.

Proof of Space (PoS) – це клас алгоритмів, де вузол доводить, що виділив певний обсяг пам'яті або дискового простору, створивши спеціальну структуру даних (плот, граф тощо). На відміну від PoW, вузол витрачає ресурси не на постійні обчислення, а на попередню підготовку й зберігання даних, після чого перевірка відносно дешева за енергією. Перші формалізації PoS у контексті криптовалют з'явилися після Bitcoin як "зеленіша" альтернатива PoW [44].

Proof of Capacity (PoC) – практичний варіант PoS, у якому майнери заздалегідь "плотять" (precompute) спеціальні таблиці значень і зберігають їх на HDD. Під час майнінгу вузол лише зчитує вже підготовлені дані, тому споживання енергії невелике, а ключовим фактором стає доступний обсяг диску [44].

Proof of Space-Time (PoST) – розвиток ідеї PoS, який додає часову компоненту: вузол повинен не лише виділити простір, а й підтримувати його у виділеному стані протягом певного часу. Це використовується в Chia та Spacemesh для підвищення захищеності й запобігання атакам із перезаписом або "перепаковкою" простору [44].

Паралельно з цим сформувався клас систем proof-of-storage / proof-of-retrievability, де HDD-простір використовується не для зберігання псевдовипадкових даних (як у Chia), а для зберігання реальних файлів користувачів – це Filecoin, Sia, Storj, Arweave та інші платформи децентралізованого зберігання [45]**.**

Signum (Burstcoin): Proof of Capacity / Proof of Commitment

Signum Network (раніше Burstcoin) — одна з перших криптовалют, яка реалізувала повноцінний Proof of Capacity на основі жорстких дисків. У PoC-

моделі вузол спочатку виконує ресурсомістку операцію “plotting” – генерує й записує великі обсяги даних (плоти) на диск, після чого процес майнінгу зводиться до читання цих даних з мінімальними витратами енергії [44].

У сучасній версії Signum використовує вдосконалений механізм Proof-of-Commitment (PoC+), який поєднує ідею PoC з елементами стейкінгу: виділений дисковий простір доповнюється “зобов’язанням” у вигляді токенів, що впливає на шанси знайти блок. Такий підхід прагне поєднати енергоефективність PoC з економічною моделлю PoS і зменшити ризики зловживань великими дисковими фермами [40].

Особливість Signum полягає в тому, що його консенсус історично розроблявся саме під HDD: перша реалізація PoC з використанням алгоритму Shabal для плотів була запущена ще як Burstcoin і розглядалася як альтернатива ASIC-майнінгу в Bitcoin [44]. На відміну від Chia, де основна увага приділяється поєднанню PoSpace та PoTime, Signum більше фокусується на поєднанні ємності та фінансових зобов’язань (PoC+), а не на часі.

MASS: блокчейн з PoC-консенсусом

MASS – ще одна блокчейн-платформа, що використовує Proof of Capacity як базовий механізм консенсусу. Проект позиціонується як “децентралізований майнінг на жорстких дисках”: достатньо ПК та HDD, без потреби в потужних ASIC або GPU. У MASS PoC вузол демонструє мережі доказ доступної ефективної ємності, а ймовірність генерації блоку пропорційна саме цьому параметру [6].

Розробники MASS підкреслюють такі властивості свого протоколу:

1. справедливість – усі вузли мають однакові граничні витрати, оскільки ключовим ресурсом є HDD-ємність;
2. відсутність потреби в спец обладнанні;
3. можливість будувати “ферми” з багатьох жорстких дисків при відносно невеликому енергоспоживанні [7].

На відміну від Chia, де поєднуються PoSpace і PoTime та використовується більш складна криптографія, MASS робить акцент саме на простоті та прозорості

PoC-консенсусу, залишаючись ближчим до класичної моделі “дисковий аналог PoW”.

Spacemesh: Proof of Space-Time для “домашніх майнерів”

Spacemesh — блокчейн, який, подібно до Chia, використовує Proof of Space-Time (PoST) як основу консенсусу. Ідея полягає в тому, що учасник (“smesher”) виділяє частину дискового простору (HDD або SSD) і тримає його зайнятим протягом тривалого часу, що підтверджується криптографічним протоколом [8].

У протоколі Spacemesh використовується зв’язка двох компонент:

1. PoST – доказ того, що простір дійсно виділений;
2. PoET (Proof of Elapsed Time) – доказ того, що цей простір зберігався протягом певного інтервалу часу [9].

Spacemesh робить акцент на:

- можливості стабільного заробітку для “домашніх майнерів” з невеликими ресурсами;
- низьких вимогах до енергії за рахунок використання HDD-простору замість інтенсивних обчислень;
- протидії централізації, оскільки дисковий простір відносно дешевий і доступний для широкого кола користувачів [10].

У порівнянні з Chia, Spacemesh теж використовує PoST, але має іншу архітектуру консенсусу (mesh-структура замість лінійного ланцюга) та іншу економіку розподілу винагород.

Chia: Proof of Space and Time як енергоефективний консенсус

Chia Network — одна з найвідоміших блокчейн-платформ, що використовує HDD-простір як основний ресурс. У Chia застосовується механізм Proof of Space and Time (PoST):

- Proof of Space — фермер створює спеціальні “плоти”, записуючи великі обсяги псевдовипадкових даних на диск;
- Proof of Time — додає часову послідовність (verifiable delay functions), що підсилює безпеку й запобігає певним класам атак [11].

На відміну від Filecoin або Sia, Chia не зберігає корисні дані користувачів –

плоти містять спеціально згенеровані структури для участі в лотереї блоків [44].

Основний фокус Chia – це:

1. екологічність (значно менше енергоспоживання порівняно з PoW);
2. можливість фермерства на звичайних жорстких дисках;
3. криптографічно стійкий механізм PoST, що продовжує вдосконалюватися (зокрема, Chia пропонує нове покоління PoSpace-протоколів для підвищення безпеки та енергоефективності) [12].

Для даної кваліфікаційної роботи Chia є референсною платформою, оскільки:

- прямо використовує HDD як базовий ресурс для консенсусу;
- має достатньо розвинену екосистему й документацію;
- дозволяє налаштовувати параметри обладнання (в тому числі режими енергозбереження HDD), що важливо для дослідження APM та енергоспоживання.

Децентралізовані платформи зберігання: Filecoin, Sia, Storj, Arweave

Окремий клас становлять системи, де жорсткі диски використовуються не для консенсусу як такого, а для зберігання корисних даних. Вони теж тісно пов’язані з HDD, але їхня ціль – побудова децентралізованого хмарного сховища.

1. Filecoin – платформа децентралізованого зберігання, яка використовує унікальний proof-of-storage / proof-of-replication: вузли доводять, що зберігають певні дані, і отримують за це винагороду у токені FIL [13].
2. Sia / Siacoin – подібна система, де користувачі орендують надлишковий дисковий простір один в одного, а дані шифруються й розподіляються по багатьох вузлах [14].
3. Storj – децентралізоване сховище, що використовує шифрування, шардінг та розподіл сегментів даних по глобальній мережі вузлів, винагороджуючи власників дискового простору токенами STORJ [45].
4. Arweave – платформа “перманентного зберігання”, яка використовує структуру blockweave та економічну модель, орієнтовану на одноразову оплату за довгострокове зберігання даних [15].

Ці системи потребують значних обсягів HDD, але їхня мета — не фермерство/майнінг у класичному розумінні, а побудова стійкої, децентралізованої альтернативи традиційним хмарним сховищам. Порівняно з Chia, їхній консенсус тісно пов’язаний із можливістю відтворити збережені дані, тоді як у Chia плоти не мають прикладної цінності поза блокчейном [45].

Окремі дослідження продуктивності та надійності децентралізованих систем зберігання показують, що використання дискових ресурсів у таких мережах супроводжується специфічними патернами навантаження, які істотно відрізняються від традиційних централізованих сховищ і вимагають окремого аналізу енергоспоживання та затримок доступу до даних [19].

Порівняння Chia з іншими HDD-орієнтованими платформами

Якщо порівнювати перелічені системи з Chia з точки зору використання жорстких дисків, можна виділити кілька ключових аспектів:

1. Тип ресурсу та ціль використання

- Chia, Signum, MASS, Spacemesh використовують дисковий простір як основний ресурс консенсусу (PoS/PoC/PoST).
- Filecoin, Sia, Storj, Arweave використовують HDD для зберігання корисних даних та стимулювання децентралізованих сховищ. У Chia плоти не несуть прикладного навантаження, тоді як у Filecoin/Sia збережені дані корисні для кінцевих користувачів [44].

2. Енергоспоживання

Усі згадані HDD-орієнтовані рішення помітно енергоефективніші за PoW-криптовалюти, оскільки основний ресурс – дисковий простір, а не постійні хеш-обчислення. Chia та Spacemesh особливо підкреслюють екологічність PoST як альтернативи енерговитратному майнінгу [11].

3. Апартні вимоги

- У Chia, Signum, MASS та Spacemesh достатньо споживчих HDD, проте важливо дотримуватись обмежень по часу розв’язання proof’ів (секунди), що впливає на вимоги до дискової підсистеми та налаштувань енергозбереження [16].

- У децентралізованих сховищах (Filecoin, Sia, Storj) HDD часто поєднуються з вимогами до пропускної здатності мережі та доступності вузла (аптайм) [17].

4. Економічна модель

- Chia орієнтована на роль “екологічної” L1-мережі з власним токеном XCH і акцентом на консенсусі PoST [11].
- Signum комбінує PoC з PoC+ (стейкінг), надаючи додаткові фінансові механізми [18].
- MASS робить акцент на справедливості PoC і мінімізації бар’єрів входу [7].
- Filecoin, Sia, Storj, Arweave будують ринки зберігання й орендних відносин між власниками дисків та користувачами даних [17].

5. Практична значущість для даної роботи

Для задачі оптимізації фармінгу криптовалюти Chia з точки зору енергоспоживання HDD найбільш релевантними є саме Chia та інші PoC/PoST-орієнтовані платформи (Signum, MASS, Spacemesh), оскільки вони мають схожу модель “фермерства” на жорстких дисках. Порівняння з децентралізованими сховищами (Filecoin, Sia тощо) корисне для ширшого контексту, але в них інша природа навантаження (запит/віддача корисних даних), тоді як у Chia навантаження визначається патерном читання плотів для пошуку proof’ів.

Проведений огляд показує, що Chia є частиною більш широкого класу блокчейн-платформ, які використовують жорсткі диски як основний або ключовий ресурс, але одночасно суттєво відрізняється від них як за цільовим призначенням, так і за деталями реалізації консенсусу. Signum та MASS демонструють розвиток Proof of Capacity як “дискового аналога PoW”, тоді як Spacemesh і Chia розвивають Proof of Space-Time з орієнтацією на енергоефективність і доступність для звичайних користувачів. Децентралізовані сховища (Filecoin, Sia, Storj, Arweave) роблять HDD центральним елементом бізнес-логіки, але в іншому вимірі – зберігання та відтворення даних, а не пошуку блоків. Більш того на теперішній час ємність піддослідної мережі займає

велику кількість дискового простору, а саме 9.15 EiB [39] (Додаток В), що дорівнює 9,594,470 TiB, що в свою чергу створює додатковий захист від зловмисних атак.

Для даної кваліфікаційної роботи це обґрунтовує вибір Chia як основної платформи дослідження, а також вказує, що результати оптимізації енергоспоживання HDD (зокрема, через налаштування APM) можуть бути методологічно цікавими й для інших HDD-орієнтованих блокчейн-систем.

1.3. Постановка задачі оптимізації

Як було показано у попередніх підрозділах, процес фармінгу криптовалюти Chia базується на консенсусі Proof of Space and Time (PoST), у якому основним ресурсом є дисковий простір, що використовується для зберігання попередньо згенерованих плотів. Фермер перевіряє свої плоти у відповідь на мережеві виклики (challenges), виконуючи порівняно невелику кількість операцій читання з диска, тоді як більшу частину часу накопичувач перебуває в режимі очікування або слабкого навантаження [20]. Це робить Chia значно енергоефективнішою порівняно з класичними системами Proof of Work, але водночас висуває специфічні вимоги до дискової підсистеми — зокрема до затримок доступу та режимів енергозбереження [44].

У загальному випадку задача оптимізації фармінгу Chia полягає у пошуку таких технічних та експлуатаційних параметрів системи, за яких досягається прийнятний компроміс між:

1. енергоспоживанням фермерського вузла;
2. стабільністю та своєчасністю обробки викликів (відсутність втрати proof’ів через надмірні затримки);
3. економічною доцільністю (відношення очікуваного доходу до витрат на електроенергію та обладнання);
4. ресурсним зносом накопичувачів.

З теоретичної точки зору ферма Chia може розглядатися як техніко-

економічна система, у якій вхідні параметри визначаються вибором апаратної платформи, конфігурацією дискових накопичувачів, файловою системою, параметрами енергозбереження (APM, спіндаун, таймаути простою), типом та розміром плотів (k-розмір), а також режимами роботи програмного забезпечення [11].

Вихідними показниками такої системи є:

1. середнє енергоспоживання (Вт) та спожита енергія за проміжок часу (кВт·год);
2. затримки дискових операцій (IO Time, Disk Service Time, Queue Time);
3. частка втрачених або прострочених відповідей (stale/invalid proofs);
4. економічні показники: витрати на електроенергію, умовний прибуток від фармінгу, строк окупності обладнання.

Загальна задача оптимізації у найширшій постановці може бути представлена як багатокритеріальна:

1. мінімізувати середнє енергоспоживання та сумарні витрати на електроенергію;
2. мінімізувати ризики втрати доказів через надмірні затримки диска;
3. мінімізувати додатковий знос накопичувачів;
4. максимізувати очікуваний прибуток або звести до мінімуму строк окупності.

При цьому система підлягає ряду обмежень. По-перше, затримка обробки викликів не повинна перевищувати граничні значення, визначені протоколом Chia: час пошуку та відновлення proof'а має вкладатися у кілька секунд, а повний цикл розв'язання доказу — відповідати вимогам консенсусу (типово до 8 секунд за актуальними рекомендаціями Chia Network) [16]. По-друге, режими енергозбереження не повинні призводити до систематичних таймаутів, надмірного накопичення черги запитів чи нестабільності фермерського програмного забезпечення. По-третє, обмеження задаються апаратними можливостями конкретного стенду (тип процесора, обсяг оперативної пам'яті, інтерфейс підключення дисків, можливості ОС тощо) [21].

У межах даної роботи загальна задача оптимізації звужується до часткової задачі, пов’язаної з налаштуванням режимів роботи жорсткого диска як основного споживача енергії у фермерському вузлі. Експериментальна частина сфокусована на дослідженні впливу значень параметра Advanced Power Management (APM) на енергоспоживання жорсткого диска та дискові затримки під час фармінгу. Для цього використовується зовнішній HDD із файловою системою NTFS, підключений до ПК під керуванням Windows, а вимірювання енергоспоживання здійснюються за допомогою ватметра із фіксацією значень кВт·год. Паралельно з цим, за допомогою інструментів xperf та Windows Performance Analyzer збираються WPA-показники IO Time, Disk Service Time та Queue Time для процесу фармінгу.

Таким чином, у рамках роботи виділяється конкретна задача оптимізації параметрів APM, яку можна сформулювати наступним чином:

Для заданої конфігурації повної ноди (модель жорсткого диска, інтерфейс підключення, файлове середовище, версія ПЗ фармінгу) знайти такі значення параметра APM, які мінімізують споживання електроенергії жорстким диском за одиницю часу або за період роботи T, за умови, що:

показники затримок IO (IO Time, Service Time, Queue Time) залишаються у допустимих межах, що не призводять до втрати proof’ів;

система зберігає стабільність роботи фермерського ПЗ протягом усього інтервалу тестування.

На практиці параметр APM впливає на компроміс між енергоефективністю та затримками. При низьких значеннях APM (наприклад, 1) диск частіше переходить у енергозберігаючі стани (спіндаун, зупинка шпинделя), що знижує середню споживану потужність, але збільшує час пробудження та пошуку потрібних секторів на магнітних доріжках. При вищих значеннях (128 та вище) диск працює у більш агресивному режимі готовності, зменшуючи IO-затримки, але споживаючи більше енергії в простої. Подібна проблема оптимізації режимів спіндауну та таймаутів простою обговорюється й у практичних рекомендаціях до фермерів Chia спільнотами користувачів, де вказується, що занадто агресивні

режими сну можуть призвести до втрати частини proof'ів та передчасного зносу механіки накопичувача.

Беручи до уваги наведене, постановка задачі оптимізації в даній роботі може бути підсумована так:

1. Визначити ключові технічні параметри фермерської системи, які суттєво впливають на енергоспоживання та затримки введення-виведення (передусім параметр APM для HDD).

2. Побудувати математичні моделі енергоспоживання та дискових затримок у різних режимах APM на основі експериментальних даних.

3. Оцінити компроміс між економією енергії та погіршенням дискових затримок, зокрема вплив на Queue Time і сумарний IO Time.

4. Сформулювати практичні рекомендації щодо вибору режимів APM (та, за можливості, інших налаштувань) для фермерів Chia, які прагнуть зменшити витрати на електроенергію без критичного погіршення стабільності фармінгу.

Результати вирішення цієї задачі будуть використані у наступних розділах для побудови експериментального стенду, проведення вимірювань, аналізу отриманих даних та формування висновків щодо ефективності запропонованих підходів до оптимізації процесу фармінгу криптовалюти Chia.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ФАРМІНГУ

2.1. Технічна структура системи тестування

Для проведення експериментального дослідження впливу параметрів Advanced Power Management (APM) на енергоспоживання та дискові затримки у процесі фармінгу криптовалюти Chia було створено спеціалізований тестовий стенд. Технічна структура системи тестування включає апаратні та програмні компоненти, що забезпечують формування навантаження на накопичувач, контроль параметрів роботи жорсткого диска, реєстрацію енергоспоживання та збір даних про дискові операції введення-виведення.

Основу системи становить персональний комп’ютер на базі процесора Ryzen 5 7500F з операційною системою Windows 10 Pro x64, який виконує роль генератора навантаження та аналітичного інструмента. На ПК встановлено програмне забезпечення для фармінгу: NoSSD (використовується у фінальних тестах), службові компоненти Chia, утиліта CrystalDiskInfo для керування режимами APM, а також інструменти збору системних трас xperf та Windows Performance Analyzer, що дозволяють фіксувати показники IO Time, Disk Service Time та Queue Time.

Підключення тестового накопичувача здійснюється через активний USB-хаб ORICO H7013-U3, який отримує живлення від окремого зовнішнього блока живлення TY0500200Z1MN (5 V, 2 A). Така конфігурація забезпечує стабільність напруги та ізоляцію тестового диска від ривків живлення, які можуть виникати при використанні портів ПК. У ланцюг живлення хаба включено ватметр Intertek 3680W, що встановлюється між мережею 220 В та блоком живлення USB-хаба. Це дозволяє вимірювати реальне споживання електроенергії, яке припадає саме на роботу зовнішнього HDD, а також фіксувати інтегральні значення у вигляді кВт·год.

Тестовим накопичувачем є зовнішній жорсткий диск Seagate Backup Plus Portable, який містить внутрішній пристрій ST4000LM024 (4 ТБ, SMR), відформатований у файловій системі NTFS. Саме він виступає об’єктом

дослідження, оскільки його енергоспоживання та поведінка при зміні значень APM (1, 64, 128) визначають кінцеві результати оптимізації процесу фармінгу. Використання інтерфейсу USB 3.0 забезпечує достатню пропускну здатність для моделювання реальних умов роботи фермерського вузла.

На основі апаратних та програмних компонентів побудовано структурну модель експериментальної системи. Персональний комп’ютер ініціює операції читання, необхідні для процесу пошуку доказів під час фармінгу, формуючи фактичне дискове навантаження. Параметри APM встановлюються через CrystalDiskInfo, після чого xperf реєструє часові характеристики дискових операцій, а ватметр одночасно вимірює споживання енергії. Дані, отримані від двох незалежних джерел (дискові затримки та електроспоживання), синхронізуються та використовуються для побудови математичної моделі енергетичного профілю жорсткого диска в різних режимах APM.

На рисунку 2.1 наведено структурну схему системи тестування, яка відображає взаємозв’язок між апаратними компонентами та програмними модулями. Схема демонструє потоки даних та енергії під час проведення експерименту, включно з каналом USB-з’єднання між комп’ютером та тестовим диском, а також каналом живлення між мережею 220 В та блоком живлення USB-хаба, через який здійснюється вимірювання енергоспоживання.

Технічна структура тестового стенду забезпечує можливість одночасного вимірювання двох ключових параметрів — енергоспоживання та дискових затримок — що дозволяє комплексно оцінювати ефективність різних режимів роботи HDD у контексті оптимізації процесу фармінгу криптовалюти Chia.

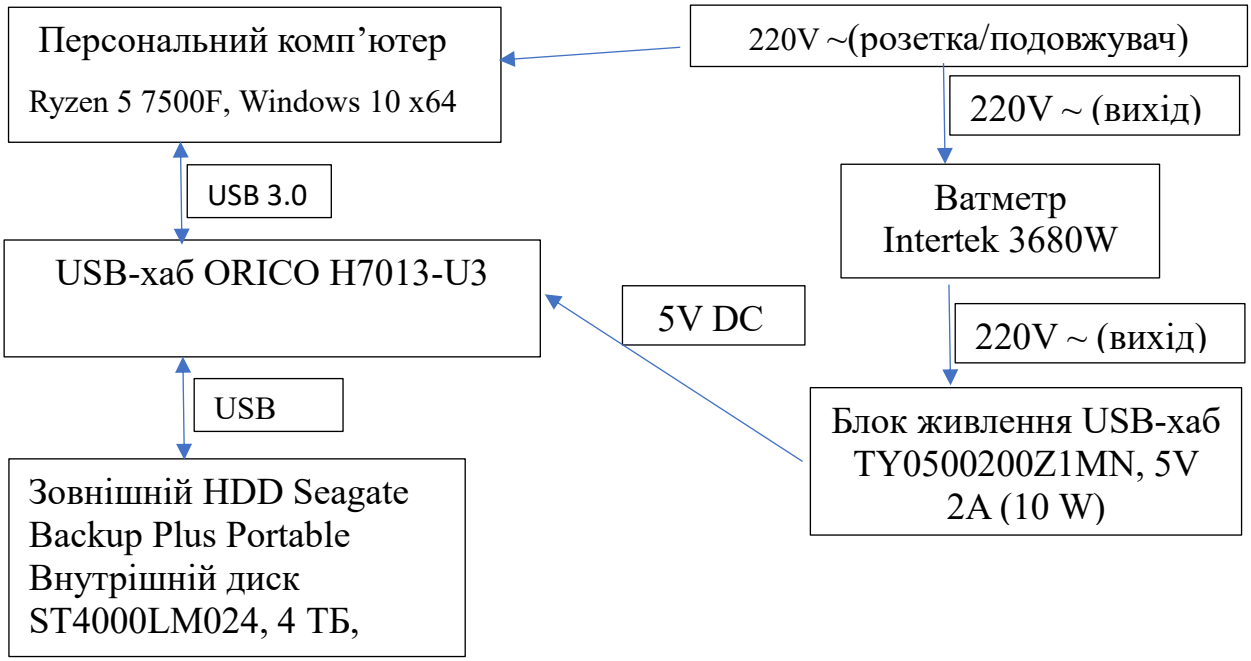


Рис. 2.1 Схематична структура системи тестування

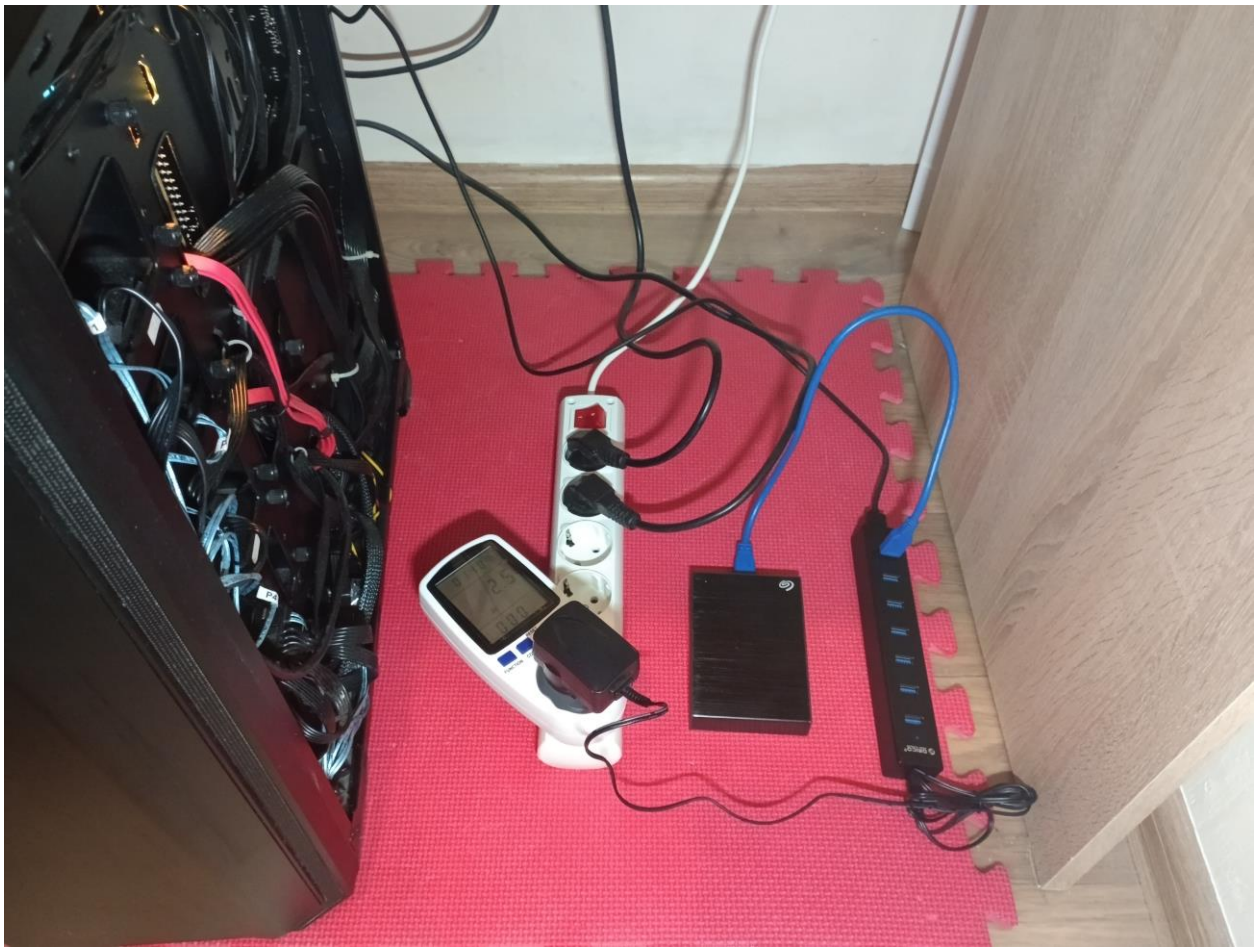


Рис.2.2 Використання обладнання

2.2. Огляд моделі оптимізації, використання технічного обладнання

Одним з методів збору інформації є використання пакету інструмента Windows Performance Toolkit (WPT), який має інструменти моніторингу. Цей інструмент розподіляється на засоби запису Windows Perfomance Record та на засіб перегляду результатів Windows Perfomance Analyzer (WPA).

Використання засобу запису WPR можливий через графічний режим управління та через командний режим (Command-Line), причому командний режим управління забезпечить більш стабільний процес запису статистичної інформації. Для цього використовується командний рядок з утілітою xperf [31].

Використання утиліти xperf, яка входить у пакет Windows Performance Toolkit є галузевим стандартом для збору статистичних показників ядра операційної системи Windows.

Наприклад команда:

xperf -on PROC_THREAD+LOADER+DISK_IO+DISK_IO_INIT+POWER -start USBlogger -on Microsoft-Windows-USB-USBPORT

Яка фактично запускає дві паралельні сесії збору даних (ETW sessions):

1. стандартну для ядра (Kernel Logger);
2. спеціалізовану для USB.

Використання технічного обладнання. Під час тестування використовувалося наступне обладнання (рис.2.1 та рис.2.2):

- персональний комп’ютер на базі процесора Ryzen 5 7500f, операційна система: Windows 10 Pro x64;
- USB-хаб Orico модель: H7013-U3, до якого підключений штатний зовнішній блок живлення AC\DC ADAPTER dongguan toye electronics technology co. ltd модель:TY0500200z1mn, output: 5V 2A 10W;
- ваттметр Intertek 3680W;
- зовнішній жорсткий диск Seagate Backup Plus Portable P/N:2R2APB-500, в якому є внутрішній диск Seagate модель:ST4000LM024-2AN17V ємністю 4 терабайти, 2020 року випуску.

2.3. Опис параметрів оптимізації

У даній кваліфікаційній роботі оптимізація процесу фармінгу криптовалюти Chia розглядається як задача пошуку такого режиму роботи жорсткого диска, за якого досягається зменшення енергоспоживання при збереженні прийнятних часових характеристик дискових операцій.

Також щодо оптимізації вільного простору на диску – використовуються зменшені за розміром плоти даних для фармінгу об'ємом всього 36.96 Gib від ПЗ NoSSD, це дозволяє збільшити рівень винагороди фармеру на 275% у порівнянні з офіційними плотами даних chia "K32" – який становить 101.4 GiB [32] рис.2.4.

New compression levels (v3), plot filter 256

Compression Level	C30	C31	C32	C33	C34	C35	C36	C37	C38
Plot size (GiB)	47.51	44.93	42.30	39.65	36.96	34.36	31.71	28.96	26.16
Reward	213%	226%	240%	256%	275%	295%	320%	350%	388%
Capacity per RTX 4090 (PiB)	4.24	3.34	2.33	1.49	0.966	0.572	0.307	0.185	0.106
Capacity per GTX 1080 Ti (PiB)	0.661	0.509	0.359	0.235	0.147	0.0853	-	-	-

Рис. 2.4 Порівняння зменшених плотів для фармінгу "NoSSD" від офіційних плотів "K32"

Параметром, що підлягає оптимізації, є рівень розширеного керування живленням жорсткого диска **APM (Advanced Power Management)**, який задається як ціле число в діапазоні від 0 до 255 та визначає компроміс між продуктивністю та енергоефективністю накопичувача [25; 26]. У роботі розглядаються три репрезентативні режими:

- **APM = 128** – типовий (заводський) рівень, який використовується як базовий для порівняння;
- **APM = 64** – проміжний рівень, що у більшості реалізацій відповідає помірному енергозбереженню;

- **APM = 1** – максимальний рівень енергозбереження, за якого диск має право агресивно переходити у режими зупинки шпинделя.

З метою формалізації задачі оптимізації введемо дві групи параметрів: **енергетичні** та **часові**.

До **енергетичних параметрів** належать:

E_apm(T) – спожита енергія жорстким диском за проміжок часу T (кВт·год), виміряна за допомогою зовнішнього ватметра;

P_apm - середня потужність споживання диска у відповідному режимі APM (Вт), яка обчислюється за формулою:

P_apm = E_apm(T) : T * 1000

Ці параметри дозволяють оцінити інтегральну економію енергії.

Згідно з вимогами до фермерських вузлів Chia, зниження енергоспоживання є доцільним лише за умови, що воно не перешкоджає своєчасній обробці викликів мережі [22; 16].

До часових параметрів належать показники, зібрані за допомогою Windows Performance Analyzer на основі трас ETW (xperf) для процесу фармінгу [23; 24]:

- T_io(APM) – сумарний час операцій введення-виведення (IO Time), який включає логічний і фізичний час виконання дискових запитів;
- T_serv(APM) – сумарний час обслуговування запитів накопичувачем (Disk Service Time), що складається з пошуку сектора, обертання магнітних пластин до потрібної доріжки та передачі даних;
- T_queue(APM) - сумарний час очікування в черзі (**Queue Time**), який визначається як різниця

  T_queue(APM) = T_io(APM) – T_serv(APM)

Параметр T-queue відображає, наскільки інтенсивно накопичуються невиконані запити до диска, зокрема через переходи в енергозберігаючі стани (зупинка шпинделя, паркування головок) та час пробудження. У контексті фармінгу Chia надмірне зростання черги може призвести до втрати доказів (proof'ів), якщо час зчитування даних з плотів наближається до граничних значень протоколу [22; 27].

З метою порівняння режимів APM у роботі вводиться також нормована форма часових параметрів, де за базовий режим приймається APM=128:

$$k_io(APM) = T_io(APM) : T_io(128), \quad (2.1)$$

$$k_serv(APM)=T_serv(APM) : T_serv(128), \quad (2.2)$$

$$k_queue(APM) = T_queue(APM) : T_queue(128) \quad (2.3)$$

Таке нормування дозволяє наочно оцінювати, у скільки разів зростає або зменшується відповідний часовий показник при переході до іншого рівня APM, не прив'язуючись до конкретної тривалості експерименту. Додатково розглядається частка часу очікування в черзі за формулою (2.4):

$$A_queue(APM) = T_queue(APM) : T_io(APM) \quad (2.4)$$

яка показує, яку частину загального часу IO становить саме очікування, а не реальна робота диска. Це важливо для інтерпретації результатів: однакове зростання T_io може бути зумовлене як фізичними обмеженнями накопичувача, так і надто агресивними режимами сну.

Таким чином, параметром керування в задачі оптимізації є рівень APM, а цільовими показниками – енергетичні (E_apm, P_apm) та часові (T_io, T_serv, T_queue, A_queue) характеристики. У подальших розділах на основі зібраних експериментальних даних буде побудовано математичні моделі залежності енергоспоживання та затримок від параметра APM, виконано порівняльний

аналіз режимів APM=1, 64, 128 та сформульовано рекомендації щодо вибору оптимального режиму роботи жорсткого диска для фермерських вузлів Chia.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА: ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ З ОПТИМІЗАЦІЇ ФАРМІНГУ, АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ

3.1 Організація процесу тестування

Організація процесу тестування спрямована на отримання порівнюваних даних щодо енергоспоживання та часових характеристик жорсткого диска в різних режимах APM під час фармінгу криптовалюти Chia. Для цього була побудована експериментальна схема, у якій енергоспоживання вимірюється окремо для ланцюга живлення зовнішнього USB-накопичувача, а часові затримки дискових операцій реєструються засобами трасування подій Windows (ETW) з подальшим аналізом у Windows Performance Analyzer.

Основним джерелом навантаження на диск виступає фермерське програмне забезпечення для Chia з підтримкою стиснених плотів — NoSSD, яке реалізує компресію рівня C34 та виокремлюється як сторонній високоефективний фармер/плотер для блокчейну Chia [28]. Саме він створює характерний для реального фармінгу патерн читання з диска: періодичні звернення до набору плотів при надзвичайно низькому середньому навантаженні на обчислювальні ресурси.

Загальна схема експерименту

Тестовий стенд включає персональний комп’ютер під керуванням Windows 10, активний USB-хаб із зовнішнім блоком живлення, ватметр (розташований між мережею 220 В та блоком живлення USB-хаба) та зовнішній жорсткий диск Seagate Backup Plus Portable, всередині якого встановлено 2.5" накопичувач Seagate ST4000LM024 (4 ТБ, 5400 об/хв). Факт використання саме моделі ST4000LM024 у складі комерційного зовнішнього накопичувача підтверджується, зокрема, незалежними оглядами [29].

Ватметр підключається тільки до ланцюга живлення USB-хабу, тому всі показники енергії та потужності характеризують сумарне споживання саме

зовнішнього накопичувача (із урахуванням втрат у блоці живлення), але не всього ПК. Для вимірювань використовується побутовий електронний лічильник типу “power meter plug”, функціональні можливості якого (відображення миттєвої потужності, накопиченої енергії в кВт·год, мінімальних/максимальних значень тощо) відповідають класу пристроїв, описаних, наприклад, у описі характеристик ваттметра [30].

Підготовка програмного середовища

Перед проведенням тестів на ПК налаштовується середовище фармінгу Chia:

1. встановлюється легкий фермер NoSSD який є лідером серед найбільш ефективного програмного забезпечення, завдяки цьому він займає найбільший рівень об’єму серед об’єднання фермерів (пулів) навколо блокчейну (Додаток А) [42].
2. завантажується й перевіряється набір плотів на зовнішньому диску;
3. перевіряється коректність роботи фермерського ПЗ у стандартному режимі (без агресивного енергозбереження).

Налаштування режимів APM

Параметр Advanced Power Management (APM) для жорсткого диска налаштовується за допомогою утиліти моніторингу стану накопичувачів (наприклад, CrystalDiskInfo), яка дозволяє вказати потрібне значення APM у діапазоні 1–254 і застосувати його до вибраного пристрою. Значення APM інтерпретуються прошивкою накопичувача відповідно до специфікації виробника: низькі значення відповідають агресивному енергозбереженню (частіший спіндаун шпинделя), високі — продуктивному режиму з мінімальним втручанням у таймінги живлення. Загальні принципи роботи APM наведені в оглядових матеріалах [25] та в технічній документації до серії Barracuda 2.5" [33].

У рамках експерименту обираються три режими:

- APM = 128 — заводське значення, яке використовується як базова лінія (“номінальний режим”);
- APM = 64 — компромісний режим, що очікувано зменшує

енергоспоживання за рахунок більш м’якого спіндауну;

- APM = 1 — максимально енергоощадний режим, що дозволяє диску швидко переходити до зупинки шпинделя і, відповідно, потенційно помітно знижувати середнє споживання потужності.

Перед кожним запуском тесту значення APM змінюється, після чого система перезавантажується або виконується відключення/перепідключення диска для гарантії застосування нового режиму прошивкою.

Один із методів заміни параметру енергоспоживання застосовується через код Python, який завчасно повинен бути встановлений. Також, потрібно встановити додаткову програму «smartmontools», та запустити зазначений код від імені адміністратора у PowerShell:

```
import subprocess
import sys
import platform
def set_apm_level(disk_path, level):
    # Формуємо команду для smartctl
    command = ["smartctl", "-s", f"apm,{level}", disk_path]

    print(f"Відправка команди: {' '.join(command)}")

    try:
        # Запускаємо процес та захоплюємо вивід
        result = subprocess.run(
            command,
            capture_output=True,
            text=True,
            check=False # Не зупиняємо виконання, якщо smartctl поверне не 0 (він часто повертає бітову маску)
        )
```

```
            print("--- Результат виконання ---")
            print(result.stdout)

            if "APM level set to" in result.stdout:
                print(f"УСПІХ: Рівень APM змінено на {level}!")
            else:
                print("ПОПЕРЕДЖЕННЯ: Перевірте вивід вище, можливо помилка доступу або диск не підтримує команду.")

        except FileNotFoundError:
            print("ПОМИЛКА: Утиліта 'smartctl' не знайдена. Встановіть smartmontools.")

    # Вказуємо шлях до диску
    if platform.system() == "Windows":
        target_disk = "/dev/pd5"
    else:
        target_disk = "/dev/sdb"

    # Встановлюємо рівень APM=1 (максимальне енергозбереження)
    set_apm_level(target_disk, 1)
```

Збір даних про енергоспоживання

Для кожного значення APM проводиться окремий експеримент із фіксованою тривалістю (не менше 5 годин), протягом якого фермерське ПЗ працює в стандартному режимі, а ватметр реєструє:

1. миттєву потужність (Вт);
2. мінімальну та максимальну потужність за період тесту;
3. накопичену спожиту енергію (кВт·год).

Функціональність багатьох побутових лічильників енергії (відображення

миттєвого навантаження, накопиченої енергії, мін/макс значень) описується в інструкції до приладу а також доступний огляд відхилень від норми приладу [34].

Після завершення кожного запуску знімаються показники “Total kWh”, “Min W”, “Max W” для відповідного режиму APM. Дані заносяться до таблиці у форматі CSV, де для кожного режиму фіксуються:

1. значення APM;
2. тривалість тесту T;
3. спожита енергія E_apm(T);
4. мінімальна та максимальна потужність P(APM)_min, P(APM)_max.

На основі цих значень надалі обчислюється середня потужність P_apm та відносна економія енергії між режимами.

Збір даних дискових затримок (xperf + WPA)

Паралельно з енергетичними вимірюваннями запускається трасування подій ядра Windows за допомогою xperf з набором прапорів, що фіксують події дискового введення/виведення, планувальника та підсистеми живлення (рис.3.1).

Приклад організації таких сесій для аналізу продуктивності детально розглянуто в статтях Microsoft/Windows/WPA/Detailed Walkthough [35].

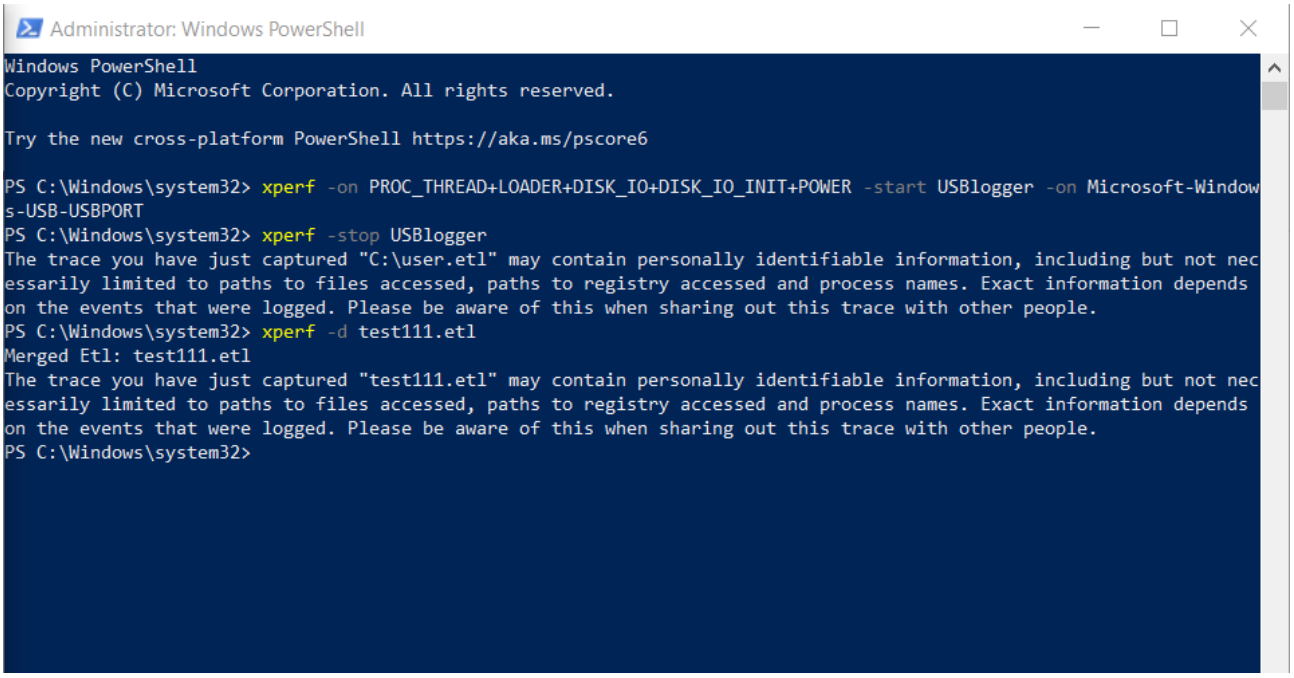


Рис. 3.1 Збір даних (xperf) та збереження результату

Загальна послідовність дій:

1. Запуск xperf із набором прапорів ядра (PROC_THREAD, LOADER, DISK_IO, DISK_IO_INIT, POWER) та, за потреби, окремих провайдерів USB для деталізації роботи зовнішнього накопичувача.

2. Запуск фермерського ПЗ (NoSSD) і перевірка того, що процес фармінгу стабільно працює, плоти доступні, мережевого статусу.

3. Підтримка роботи системи протягом усього інтервалу тестування (5 годин) без втручань користувача.

4. Завершення трасування xperf, збереження .etl-файлу, побудова профілю в Windows Performance Analyzer.

У WPA фокусується увага на таблицях:

- Disk Usage → Utilization by Process, Path Name, Stack — для фільтрації подій за процесом фермерського ПЗ і томом зовнішнього диска;
- Disk IO Summary — для отримання сумарних значень IO Time та Disk Service Time;
- похідна колонка Queue Time, яка обчислюється як різниця між IO Time та Service Time.

Отримані енергетичні та часові дані в подальших підрозділах використовуються для побудови математичних моделей залежності енергоспоживання та дискових затримок від параметра APM та для аналізу компромісу між енергоефективністю й продуктивністю фермерського вузла.

Методологія збору ETW-трас командним рядком на базі Windows Performance Toolkit описана в офіційних та експертних джерелах [31].

Отримані .etl-файли відкриваються у Windows Performance Analyzer, де на основі таблиць Disk Usage та Disk IO Summary відфільтровуються події, що належать до процесу фармінгу (бібліотеки libclient.dll), а також до цільового тому (диск Z:, який відповідає зовнішньому HDD).

Основний процес фармінгу

Одночасно зі збором даних запускається основний процес роботи фармінгу на основі програми NoSSD (рис.3.2).

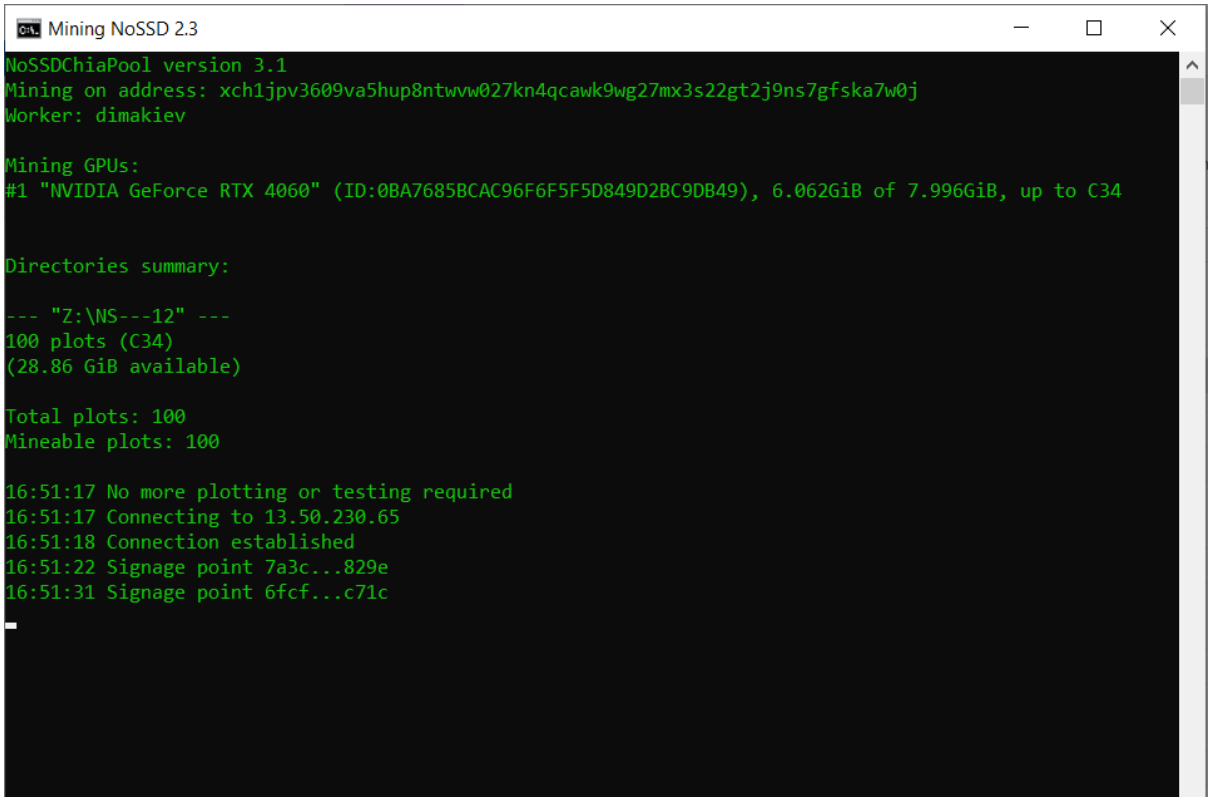
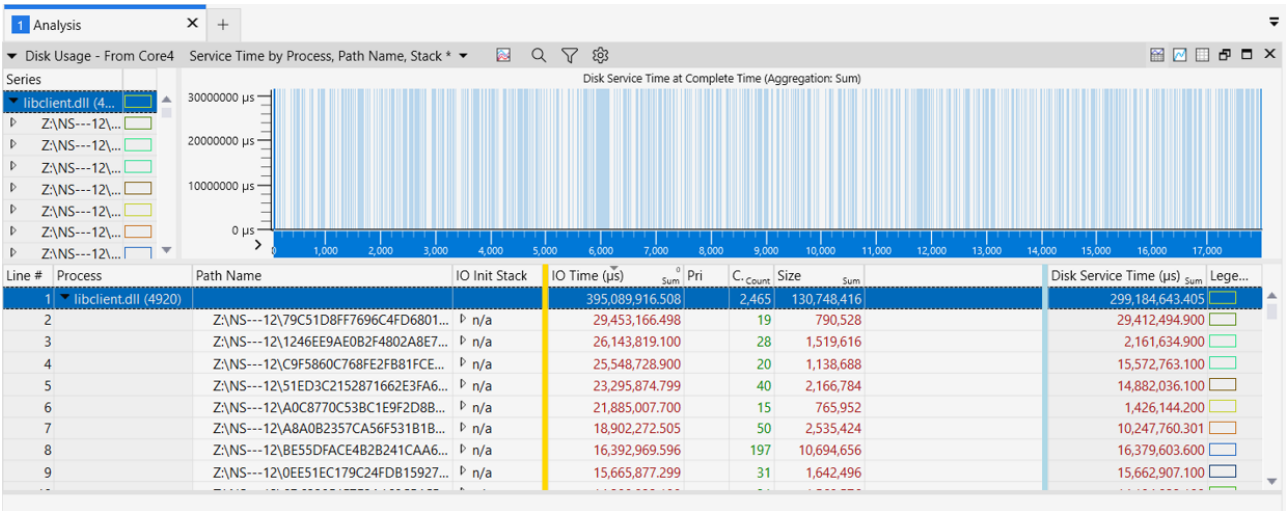


Рис. 3.2 Основна робота фармінгу за допомогою програми NoSSD

3.2. Дослідження параметрів оптимізації. Аналіз результатів збору подій ядра операційної системи Windows 10

Для збору даних ми використали програму xperf v.15.2.2.215.53015, яка входить до пакету програм Windows Perfomance Toolkit.

Для перегляду результатів аналізу подій — використали програму Microsoft Perfomance Analyzer v.11.7.383.39833 (рис. 3.3)



Line #	Process	Path Name	IO Init Stack	IO Time (µs) Sum	Pri	C. Count	Size Sum	Disk Service Time (µs) Sum	Lege...
1	libclient.dll (4920)			395,089,916.508		2,465	130,748,416	299,184,643.405	
2		Z:\NS---12\79C51D8FF7696C4FD6801...	n/a	29,453,166.498		19	790,528	29,412,494.900	
3		Z:\NS---12\1246EE9AE0B2F4802A8E7...	n/a	26,143,819.100		28	1,519,616	2,161,634.900	
4		Z:\NS---12\C9F5860C768FE2FB81FCE...	n/a	25,548,728.900		20	1,138,688	15,572,763.100	
5		Z:\NS---12\51ED3C2152871662E3FA6...	n/a	23,295,874.799		40	2,166,784	14,882,036.100	
6		Z:\NS---12\A0C8770C53BC1E9F2D8B...	n/a	21,885,007.700		15	765,952	1,426,144.200	
7		Z:\NS---12\A8A0B2357CA56F531B1B...	n/a	18,902,272.505		50	2,535,424	10,247,760.301	
8		Z:\NS---12\BE55DFACE4B2B241CAA6...	n/a	16,392,969.596		197	10,694,656	16,379,603.600	
9		Z:\NS---12\0EE51EC179C24FDB15927...	n/a	15,665,877.299		31	1,642,496	15,662,907.100	

Рис. 3.3 ”Windows Perfomance Analyzer”

Колонка з назвою «IO time» (тобто час вводу-виводу) - відповідає за час вводу-виводу, це логічний та фізичний час на виконання повної операції, в даному випадку отриманий від процесу libclient.dll (який відповідає за процес фармінгу). В це значення входить:

1. час проходження запиту через драйвери Windows;

2. час очікування в черзі (Queue Time), якщо диск зайнятий іншими завданнями - запит висить і чекає;

3. безпосередньо читання/запис даних диском.

Колонка з назвою «Disk Service Time» відповідає за час обслуговування диском запитів (як правило на фізичному рівні). В це значення входить:

1. пошук сектора (Seek time);

2. обертання магнітного диску до потрібного місця (Rotational latency);

3. передача даних.

Отримання даних від різних режимів роботи АРМ 1, 64, 128 можна звести у порівняльну таблицю (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Порівняння APM 1, 64, 128

Режим APM	IO Time (**загальний час** вводу-виводу)	Service Time (**фізична робота**)	Різниця між ввводом-виводом і фізичною роботою (IO – Service). Тобто це **логічна робота** (час очікування в черзі (Queue Time))	Пояснення
1 (Мінімальне енергоспоживання)	~1006 сек	~760 сек	~246 сек	Режим максимальної енергоефективності. Електропривід магнітних дисків вимикається після короткого проміжку часу.
64 (Середнє значення енергоспоживання)	~551 сек	~493 сек	~58 сек	Компромісний режим роботи жортского диску. Затримки читання менші, чим при APM 1, адже диск не переходить у сон так часто. Через деякий час зменшується швидкість обертання елекропривіду.
128 (Значення енергоспоживання за замовчуванням)	~395 сек	~299 сек	~96 сек	Стандартний режим роботи. Диск довгий час тримає головку зчитування навпроти магнітних дисків та довгий час не ставить її у положення паркування.

Як видно із таблиці – при зменшенні рівня APM – збільшується загальний час виконання операцій вводу-виводу, це пов’язано з тим що диску потрібно більше часу щоб запустити сервопривід та знайти потрібну дорожку на магнітному диску.

3.3. Математичні моделі дослідження та результати аналізу ефективності системи

Під час практичної частини — використовувався ватметр ”Intertek 3680W”, дані з якого записувались погодинно, тривалість тесту по 5год для кожного з 3х режимів роботи диску. Використання різних режимів роботи диску можливе за допомоги технології Advanced Power Management (APM), яка дає змогу надати через інтерфейс жорсткого диска значення (від 0 до 255) для функції APM. Жорсткий диск запам’ятовує це значення і працює у цьому режимі. Під час практичної частини використовувались такі значення APM: 1, 64, 128, при чому 1 відповідає за максимальний режим енергозбереження диску, а 128 за значенням по-замовчуванням. За проміжний результат відповідає значення 64. Результати тесту наведені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Результати тесту

	Загалом спожито (Kwh)	Різниця (Kwh)	Найнижчий показник одномоментного споживання за весь час тесту (W)	Найбільний показник одномоментного споживання за вес час тесту (W)
Apm: 128, відмітка часу (год:хв): 01:00	0.003	0.003	2.4	5.4
Apm: 128, відмітка часу (год:хв): 02:00	0.006	0.003	2.4	5.4
Apm: 128, відмітка часу (год:хв): 03:00	0.009	0.003	2.4	5.4
Apm: 128, відмітка часу (год:хв): 04:00	0.012	0.003	2.4	5.4
Apm: 128, відмітка часу (год:хв): 05:00	0.015	0.003	2	5.4
Apm: 64, відмітка часу (год:хв): 01:00	0.002	0.002	1.8	5.3
Apm: 64,	0.005	0.003	1.8	5.4

відмітка часу (год:хв): 02:00				
Apm: 64, відмітка часу (год:хв): 03:00	0.008	0.003	1.8	5.4
Apm: 64, відмітка часу (год:хв): 04:00	0.011	0.003	1.8	5.4
Apm: 64, відмітка часу (год:хв): 05:00	0.014	0.003	1.8	5.4
Apm: 1, відмітка часу (год:хв): 01:00	0.002	0.002	1.8	5.4
Apm: 1, відмітка часу (год:хв): 02:00	0.005	0.003	1.8	5.4
Apm: 1, відмітка часу (год:хв): 03:00	0.008	0.003	1.8	5.6
Apm: 1, відмітка часу (год:хв): 04:00	0.01	0.002	1.8	5.7
Apm: 1, відмітка часу (год:хв): 05:00	0.013	0.003	1.8	5.7

Математична модель енергоспоживання HDD у режимах APM.

Мат модель складається із наступних математичних виразів:

Визначення середньої потужності для кожного режиму APM здійснюється за формулою (3.1):

P_avg = E_kWh / T * 1000 (Вт) (3.1)

де:

P_apm – середня потужність відповідно режиму APM

T - час тесту у годинах (від 1 до 5),

E_kWh накопичену енергію для кожної години.

Виконаємо розрахунки:

P_128 = 0.015/5 · 1000 = **3.0** Вт

P_64 = 0.014/5 · 1000 = **2.8** Вт

P_1 = 0.013/5 · 1000 = **2.6** Вт

Лінійна модель енергії для кожного режиму APM росте майже лінійно з часом (від 1 години до 5ти).

Обчислимо **відсоток економії енергії** для різних режимів роботи:

Обчислення будемо здійснювати за формулою (3.2):

Savings = (P_ref - P_avg) : P_ref * 100% (3.2)

де:

* базовий (референсний) режим — APM = 128.

* P_avg = середня потужність для режиму APM (Вт)

* P_ref = базове (референсне) споживання APM128 (Вт)

Підставимо значення відносно apm128:

Savings_apm**1** = (3.0 – 2.6) : 3.0 * 100% = **13.33%**

Savings_apm**64** = (3.0 – 2.8) : 3.0 * 100% = **6.67%**

На основі експериментальних даних було побудовано математичну модель енергоспоживання жорсткого диска в різних режимах APM. Для кожного режиму APM розглядається залежність спожитої енергії E_apm(T) від тривалості роботи T. Результати вимірювань показують, що для часового інтервалу до 5 годин ця залежність є практично лінійною (3.3):

E_apm(T) ≈ K_apm * T (3.3)

Де K_apm – це коефіцієнт, що дорівнює середній потужності диска в даному режимі, виражений у кВт.

Для APM=128 середня потужність становить P128≈3.0Вт, що відповідає моделі E _128(T) ≈ 0.003T кВт*год.

Для APM=64 отримано P64≈2.8Вт і модель E _64(T) ≈ 0.028T кВт*год.

Для APM=1, P128≈2.6Вт, і модель E _1(T) ≈ 0.026T кВт*год.

Таким чином, зниження параметра APM з 128 до 1 забезпечує зменшення середньої потужності приблизно на 13.33%, що підтверджується різницею

спожитої енергії (0.015 кВт·год проти 0.013 кВт·год за 5 годин роботи).

Отримавши дані загального споживання за весь час тесту – ми можемо скласти діаграму енергоспоживання (рис.3.6).

Дано:

X-вісь — режим APM (1, 64, 128)

Y-вісь — загальне споживання за весь час тесту (kWh)

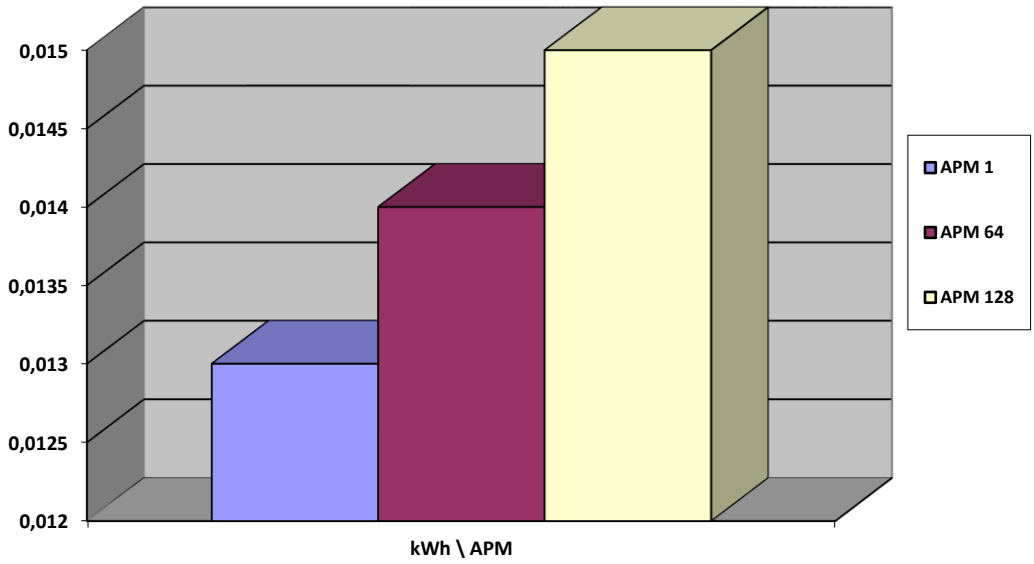


Рис. 3.6 Стовпчикова діаграма енергоспоживання

В результаті на діаграмі відображення загальні значення споживання електроенергії, а саме: apm_1 = 0.013 (kWh), apm_64=0.014(kWh), apm_128=0.015(kWh).

Математична модель дискової затримки на основі WPA-показників.

Згідно з таблицею 3.3 з трьома режимами APM і значеннями IO Time, Service Time та їх різницею (Queue Time) ми можемо визначити означення та математичну модель дискової затримки.

Створимо дискретну модель, оскільки досліджуються лише окремі фіксовані значення параметра APM (1,64,128), а не весь діапазон значень параметра APM (3.4).

$$T_{IO(APM)} = \begin{cases} 1006\,c,\ APM = 1, \\ 551\,c,\ APM = 64, \\ 395\,c,\ APM = 128, \end{cases}$$

$$T_{serv(APM)} = \begin{cases} 760\,c,\ APM = 1, \\ 493\,c,\ APM = 64, \\ 299\,c,\ APM = 128, \end{cases} \quad (3.4)$$

$$T_{queue(APM)} = \begin{cases} 246\,c, & APM = 1, \\ 58\,c, & APM = 64, \\ 96\,c, & APM = 128, \end{cases}$$

Створимо нормовану (порівняльну) модель, щоб показати порівняння із базовим режимом APM=128, адже це зручно для ведення коефіцієнтів відносного збільшення/зменшення:

$$k_{IO}(APM) = \frac{T_{IO}(APM)}{T_{IO}(128)},\ \ k_{serv}(APM) = \frac{T_{serv}(APM)}{T_{serv}(128)},\ k_{queue}(APM) = \frac{T_{queue}(APM)}{T_{queue}(128)},$$

Підставляємо числа (наближено):

- Для **APM = 1**:

$$k_{IO}(1) \approx \frac{1006}{395} \approx 2.55,\ k_{serv}(1) \approx \frac{760}{299} \approx 2.54,\ k_{queue}(1) \approx \frac{246}{96} \approx 2.56,$$

- Для **APM = 64**:

$$k_{IO}(64) \approx \frac{551}{395} \approx 1.40,\ k_{serv}(64) \approx \frac{493}{299} \approx 1.65,\ k_{queue}(64) \approx \frac{58}{96} \approx 0.60,$$

- Для **APM = 128** (базове значення):

$$k_{IO}(128) = 1\ \ k_{serv}(128) = 1\ k_{queue}(128) = 1$$

Таким чином, при зниженні значення APM до 1 - сумарний час введення-

виведення зростає приблизно у 2.55 рази порівняно зі стандартним режимом APM=128, а час очікування в черзі — приблизно у 2.56 рази.

Для проміжного значення APM=64 сумарний час IO збільшується приблизно на 40%, однак час очікування в черзі, навпаки, зменшується приблизно до 60% від базового значення, що свідчить про компромісний характер цього режиму.

На рисунку 3.7 представлено порівняльну діаграму часових характеристик дискових операцій для різних режимів Advanced Power Management. Як видно з діаграми, при зменшенні значення APM до 1 спостерігається істотне зростання загального часу введення-виведення, що обумовлено збільшенням часу очікування в черзі. Фізичний час обслуговування диском (Service Time) змінюється суттєво, що підтверджує гіпотезу про вплив енергозберігаючих режимів, а ось логічні затримки – ростуть менш суттєво.

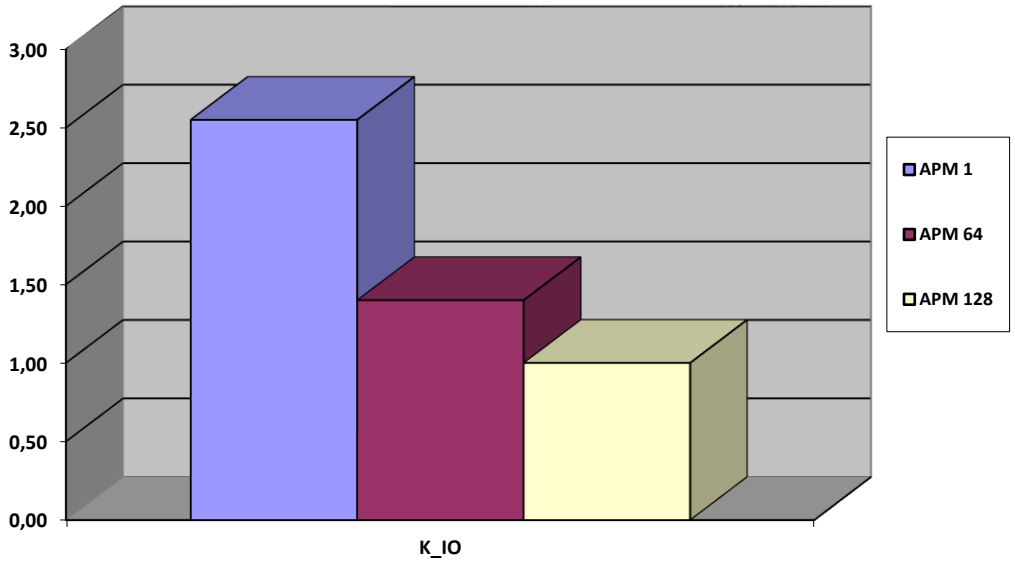


Рис. 3.7 Порівняльна діаграма часових характеристик дискових операцій залежно від режиму APM

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі на тему «Оптимізація процесу фармінгу криптовалюти Chia: економічні та технічні аспекти» було досліджено процес фармінгу як техніко-економічну систему, що включає дискове обладнання, програмне забезпечення та параметри енергоспоживання. Мета роботи полягала у виявленні можливостей зниження споживання електроенергії жорсткими дисками в процесі фармінгу Chia без критичного погіршення часових характеристик дискових операцій та стабільності роботи фермерського вузла.

У ході дослідження були вирішені такі основні завдання:

1. Проведено теоретичний аналіз сучасних підходів до побудови блокчейн-платформ на основі простору диску (Proof of Space, Proof of Capacity, Proof of Space-Time) та виконано порівняння Chia з іншими HDD-орієнтованими платформами. Показано, що Chia є репрезентативним прикладом PoST-системи з акцентом на енергоефективності, доступності для «домашніх» фермерів та використанні жорстких дисків як основного ресурсу.

2. Сформульовано задачу оптимізації параметрів дискової підсистеми фермерського вузла. Задача подана як пошук такого режиму роботи HDD, за якого мінімізується споживання енергії при обмеженнях на затримки введення-виведення (IO Time, Service Time, Queue Time) і збереженні коректної роботи фармінгу (відсутність втрати proof'ів, стабільність ПЗ).

3. Розроблено та описано технічну структуру системи тестування, що включає персональний комп'ютер під керуванням Windows 10, зовнішній жорсткий диск Seagate ST4000LM024 у складі Seagate Backup Plus Portable, активний USB-хаб із власним блоком живлення, ватметр для вимірювання спожитої енергії лінією живлення USB-хаба, а також інструментарій Windows Performance Toolkit (xperf) та Windows Performance Analyzer для збору й аналізу ETW-трас. Схема підключення та ролі всіх компонентів стенду були формалізовані у вигляді технічної структури системи

тестування.

4. Описано параметри оптимізації та побудовано математичні моделі енергоспоживання та дискових затримок. Запроваджено енергетичні параметри E_apm(T), P_apm, часові параметри T_io(APM), T_serv(APM), T_queue(APM). Для опису впливу режимів APM побудовано дискретні та нормовані моделі, у яких базовим режимом виступає APM=128.

5. Реалізовано експериментальну методику вимірювання енергоспоживання HDD для трьох режимів APM (1, 64, 128) з використанням ватметра та паралельного запису ETW-трас. Для кожного режиму проведено тривалі тести (не менше 5 годин) у реальному режимі фармінгу на основі набору плотів кримтповалюти Chia із використанням фермерського програмного забезпечення.

6. Проаналізовано отримані експериментальні дані та побудовано на їх основі практичні моделі. Показано, що при переході зі стандартного режиму APM=128 до енергоощадного APM=1 спожита енергія за однаковий інтервал часу зменшується з 0.015 до 0.013 кВт·год, що відповідає **економії близько 13.34%.** Середня потужність жорсткого диска в цих режимах становить відповідно приблизно 3.0 Вт (APM=128) та 2.6 Вт (APM=1). Для диска ємністю 4 ТБ це означає потенційну економію близько 3.5 кВт·год на рік в перерахунку на один накопичувач при цілодобовій роботі.

7. У той же час показано, що зниження APM до 1 супроводжується **істотним зростанням часових затримок**. Нормовані коефіцієнти для показників IO Time та Queue Time демонструють, що при APM=1 сумарний час введення-виведення та час очікування в черзі збільшуються приблизно у 2.5 раза порівняно з базовим режимом APM=128. Це підтверджує наявність **компромісу між енергоефективністю та швидкодією** диска: агресивне енергозбереження знижує середнє споживання, але суттєво погіршує реакцію системи на дискові запити, що є критичним фактором для систем зі змішаним навантаженням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бузинник Д. В. Метавсесвіти та криптовалюти: перспективи розвитку та ризики блокчейну Chia /Д. В. Бузинник, О.В. Редич // Економіка і бізнес: нові реалії, технологічні тренди, цифрові інновації. Economy and business: new realities, technological trends, digital innovations: матер. міжнар. наук.-практ.конф. Львів-Ірпінь, 15 травня 2025 р. [Елекронне вид.] .– Львів: СПДФО Омельченко В. Г., 2025. – С. 441–445. URL: https://surli.cc/mocdat (Дата звернення 03.08.2025).

2. Штучний інтелект в Україні: як розвивається галузь і яку користь для країни приносить. URL: https://surli.cc/oflsgm (Дата звернення 01.05.2025).

3. Закон України «Про віртуальні активи». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2074-20#Text (Дата звернення 13.08.2025).

4. Ковальчук Л. В. Вступ до технології блокчейн та криптовалют: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 142 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54180 (Дата звернення 11.10.2025).

5. Мишківська Я. В. Еволюція баз даних із появою технології блокчейн // Вісник студентського наукового товариства ДонНУ. – 2023. – Вип. 14. – С. 218–223.
URL: https://jvestnik-sss.donnu.edu.ua/article/view/14719/14628 (Дата звернення 11.10.2025).

6. MASS Decentralized HARD DRIVE mining cryptocurrency | PoC | Low Energy cost. URL: https://surli.cc/gzjslw (Дата звернення 12.12.2025).

7. Rahadyan Harimurti. Minning easier and more efficient with MASS POC Blockchain Technology. URL: https://surli.cc/ytkdrt (Дата звернення 12.12.2025).

8. What Is Spacemesh? URL: https://docs.spacemesh.io/docs/learn/spacemesh?utm_source (Дата звернення 12.12.2025).

9. Github - spacemeshos/protocol. URL: https://github.com/spacemeshos/protocol?utm_source (Дата звернення 12.12.2025).

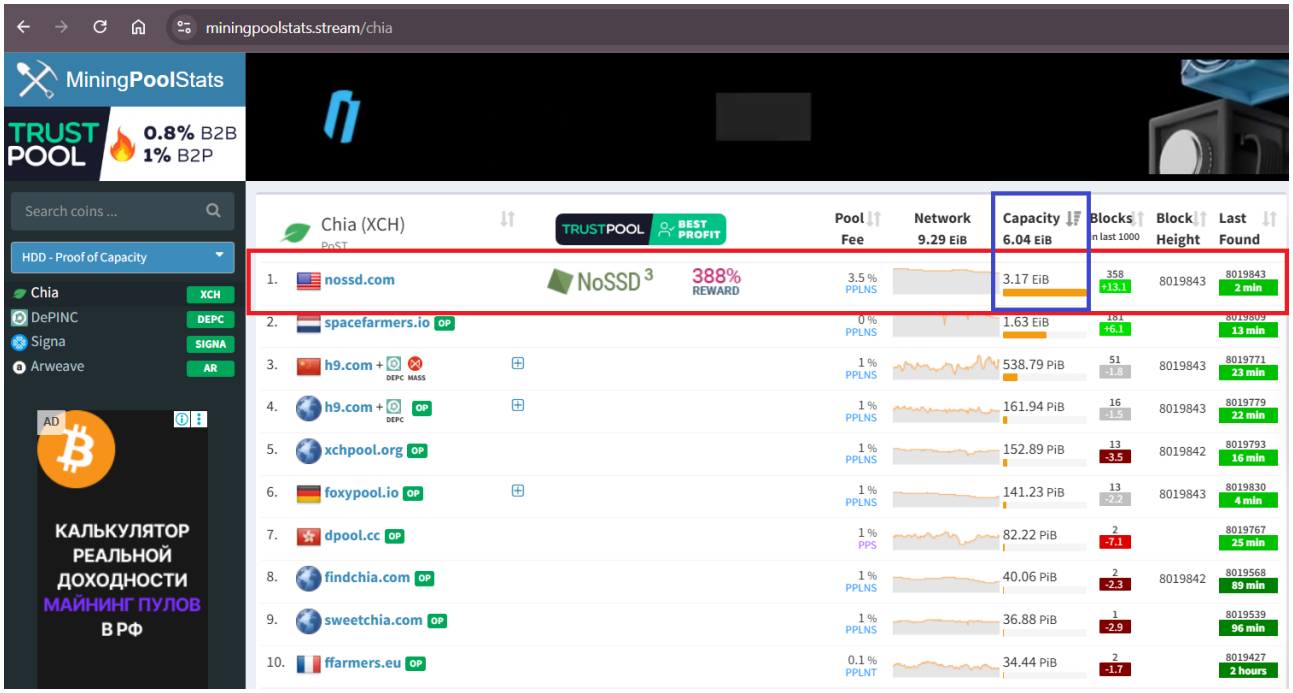
10. Aviv Eyal. Why should you know about Proofs of Space Time? URL: https://surli.cc/ucofjq (Дата звернення 12.12.2025).
11. How to Farm Chia? a Guide to Chia (XCH) Token Farming Using a Hard Drive. URL: https://www.binance.com/ru-UA/square/post/1638392730690?utm_source (Дата звернення 12.12.2025).
12. Understanding the Next-Generation Proof of Space. URL: https://surli.cc/owvvtg (Дата звернення 12.12.2025).
13. The top 7 decentralized cloud storage platforms (2025 Edition). URL: https://surli.cc/jtvldc (Дата звернення 12.12.2025).
14. Brien Posey, Robert Sheldon. Compare 7 decentralized data storage networks. URL: https://surli.cc/qybirm (Дата звернення 12.12.2025).
15. IPFS comparisons. URL: https://docs.ipfs.tech/concepts/comparisons/?utm_source
16. Farming Requirements. URL: https://surli.cc/qaahbj (Дата звернення 12.12.2025).
17. An Overview of Decentralized Cloud Storage Services. URL: https://surli.cc/qpsght (Дата звернення 12.12.2025).
18. Proof of Capacity Vs. Proof of Commitment. URL: https://surli.cc/ydwdbb (Дата звернення 12.12.2025).
19. Zhengyu Wu, Brian Lin, Nick Nikiforakis, Aruna Balasubramanian. Degrees of Decentralized Freedom: Comparing Modern Decentralized Storage Platforms. URL: https://tma.ifip.org/2025/wp-content/uploads/sites/14/2025/06/tma2025_paper16.pdf (Дата звернення 12.12.2025).
20. Jonmichael Hands. Storage - Chia Farming Workload Analysis. URL: https://docs.chia.net/chia-blockchain/resources/chia-farming-workload/?utm_source (Дата звернення 12.12.2025).
21. So you think you want to farm chia? URL: https://surli.cc/euzano (Дата звернення 12.12.2025).
22. Proof of Space. URL: https://surli.cc/gxuadj (Дата звернення 12.12.2025).
23. Windows Performance Analyzer. URL: https://surli.cc/zpmciv (Дата звернення

12.12.2025).
24. Windows Performance Toolkit Technical Reference. URL: https://surli.cc/amfybs (Дата звернення 12.12.2025).
25. Advanced Power Management. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Power_Management?utm_source (Дата звернення 12.12.2025).
26. What do different values of hard drive's Advanced Power Management feature (hdparm -B) affect, except spin-down? URL: https://surli.cc/tgquhq (Дата звернення 12.12.2025).
27. What is APM? And what exactly does it do? URL: https://surli.cc/fisyon (Дата звернення 12.12.2025).
28. NoSSD official site. URL: https://nossd.com/ (Дата звернення 12.12.2025).
29. Simon Crisp. Seagate Ultra Touch HDD 4TB Review. URL: https://surli.cc/bzklty (Дата звернення 12.12.2025).
30. Power Meter Plug, Electricity Usage Monitor. URL: https://www.ato.com/power-meter-plug-electricity-usage-monitor (Дата звернення 12.12.2025).
31. WPA Basics: Detailed Walkthrough. URL: https://surli.cc/ynzmqk (Дата звернення 12.12.2025).
32. Chia-docs:K size with compression level. URL: https://docs.chia.net/chia-blockchain/resources/k-sizes/ (Дата звернення 12.12.2025).
33. Barracuda SATA 2.5" Product Manual for ST4000LM024. URL: https://surli.cc/ghgrzo (Дата звернення 12.12.2025).
34. Електролічильник ваттметр вольтметр амперметр розетка Intertek Cat 2 3680W. Огляд. URL: https://www.youtube.com/watch?v=Yv7JmCLr3Z8 (Дата звернення 12.12.2025).
35. Microsoft learn. URL: https://surli.cc/tgcrnv (Дата звернення 12.12.2025).
36. Chia IP Nodes Location. URL: https://brause.de/chia/ip-location.html (Дата звернення 12.12.2025).
37. Grafana Chia node status. URL: https://surli.cc/ljcoho (Дата звернення 12.12.2025).

38. How Many Bitcoin Nodes Are There and Their Significance in 2025. URL: https://surli.cc/fcpulb (Дата звернення 12.12.2025).
39. Netspace of Chia. URL: https://surli.cc/jvhemu (Дата звернення 12.12.2025).
40. Alamgir Hossain. Diving into $SIGN: What is Signum Network and it's Crypto. URL: https://www.binance.com/en/square/post/23516794482345?utm_source (Дата звернення 12.12.2025).
41. Consensus basics. URL: https://docs.chia.net/consensus-basics/ (Дата звернення 10.12.2025).
42. Pool node capacity of chia blockchain. URL: https://miningpoolstats.stream/chia (Дата звернення 13.11.2025).
43. Chia Business Whitepaper. URL: https://surli.cc/yqykwh (Дата звернення 15.11.2025).
44. Proof of space. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Proof_of_space?utm_source (Дата звернення 12.12.2025).
45. Prashanth Noble Bose. Comprehensive Explanation of Decentralized Storage Solutions. URL: https://medium.com/alpha-global-investments/comprehensive-explanation-of-decentralized-storage-solutions-e50170d56b70?utm_source (Дата звернення 12.12.2025).
46. Chia Network Documentation URL: https://docs.chia.net/ (Дата звернення 12.12.2025).

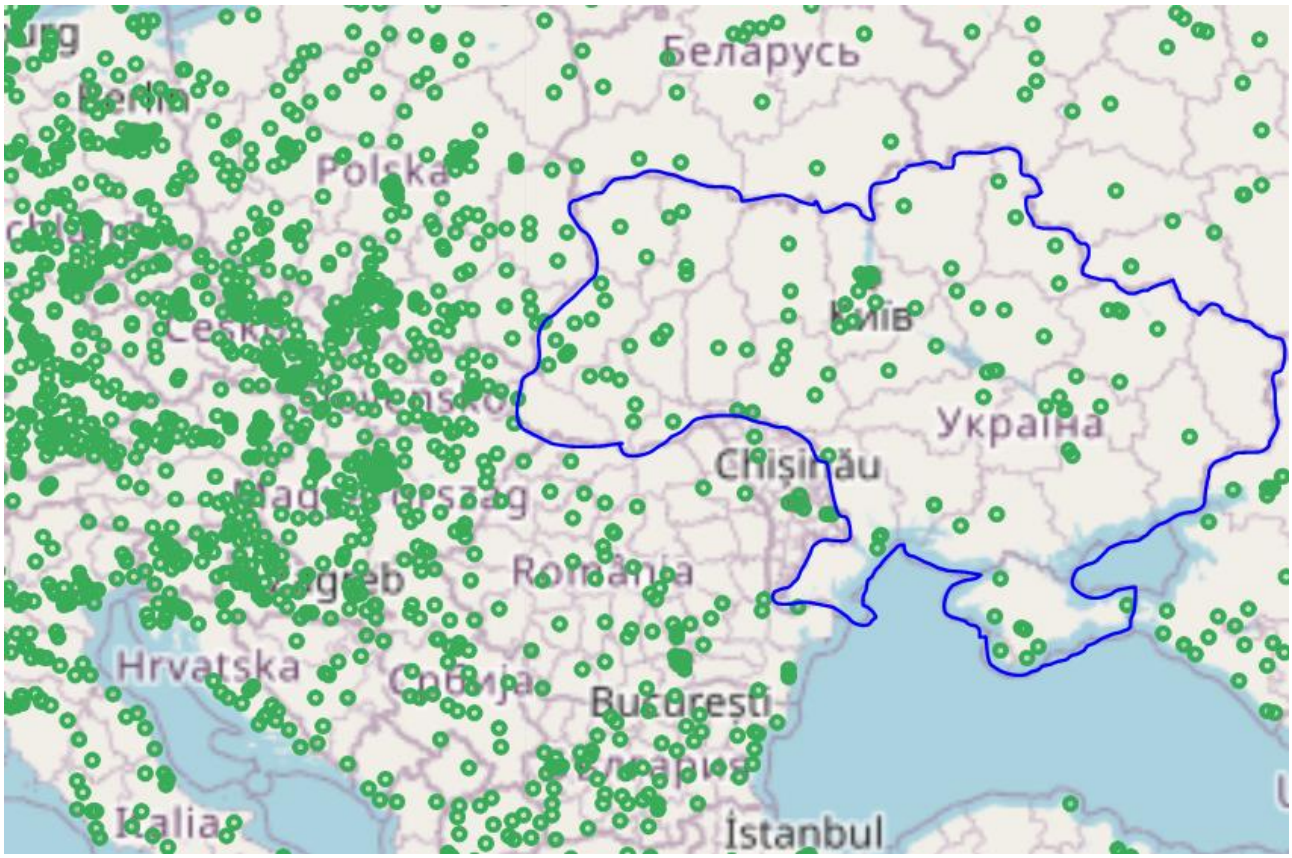
ДОДАТКИ

Додаток А



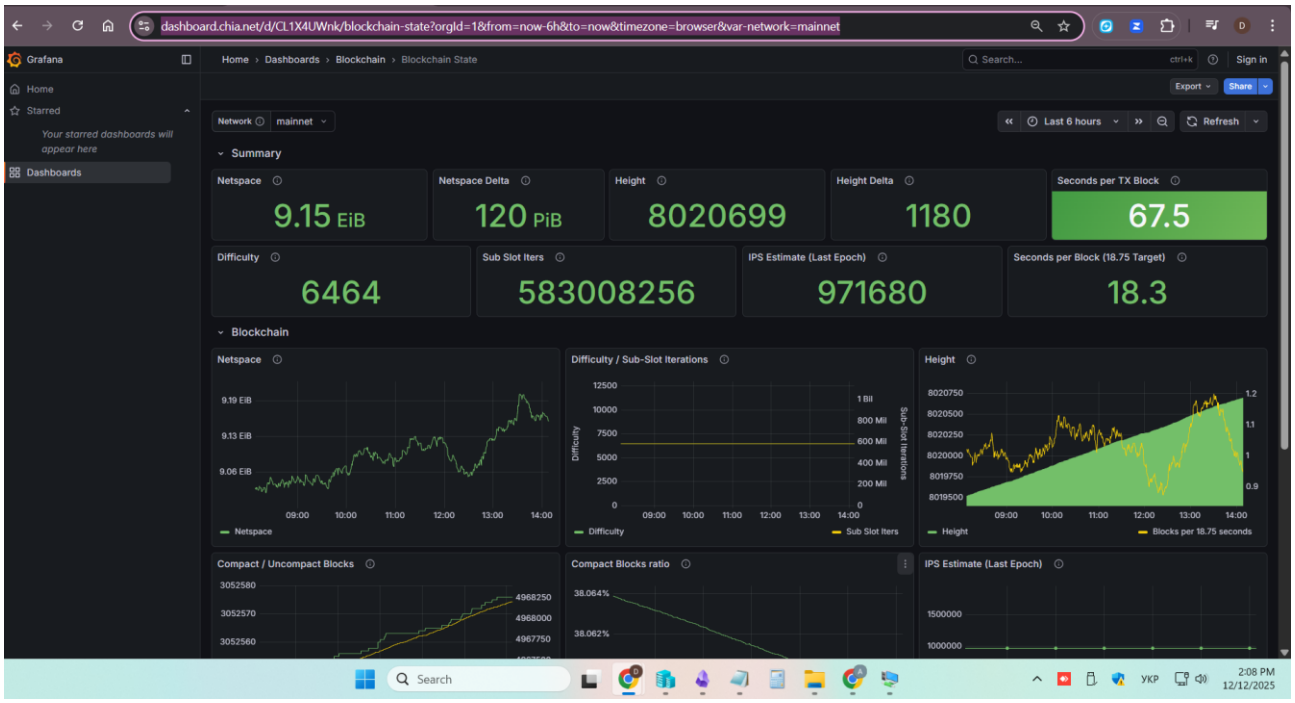
Джерело: відображення у відсотках об'єму пулу "NoSSD"- від загальної мережі блокчейну [36].

Додаток Б



Джерело: мапа наявності повних нод блокчейну "Chia" по містам України та за її межами [42].

Додаток В



Джерело: ємність піддослідної мережі займає 9.15 EiB [39].