

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І.І. МЕЧНИКОВА

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

Кафедра математичного аналізу

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «Магістр»

«Порівняльні характеристики моделей автоматичного маркет-мейкінгу»

«Comparative characteristics of automated market maker models»

Виконала: здобувачка заочної форми навчання

спеціальності 111 Математика

Освітня програма «Математика»

Ткаченко Анастасія Володимирівна

Керівник: к.ф.-м.н., доц. Леончик Є.Ю.,

к.ф.-м.н., доц. Страхов Є.М.

Рецензент: к.ф.-м.н., доц. Коваленко Л.Г.

Рекомендовано до захисту:

протокол засідання кафедри

№ _____ від ____ . ____ . 20__ р.

Завідувач кафедри

(підпис)

(прізвище, ім'я)

Захищено на засіданні ЕК № _____

протокол № _____ від ____ . ____ . 20__ р.

Оцінка _____ / _____ / _____
(за національною шкалою/шкалою ECTS/бали)

Голова ЕК

(підпис)

(прізвище, ім'я)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. Основи, переваги та недоліки децентралізованих фінансів та автоматичного маркет-мейкінгу	5
1.1. Поняття, розвиток та основні характеристики децентралізованих фінансів	5
1.2. Автоматичний маркет-мейкінг: принципи роботи, переваги та недоліки	13
РОЗДІЛ 2. Моделі та алгоритми автоматичного маркет-мейкінгу: Uniswap, Balancer, Curve.....	19
2.1. Uniswap	19
2.2. Balancer	25
2.3. Curve.....	29
РОЗДІЛ 3. Порівняння моделей автоматичного маркет-мейкінгу на основі моделювання	36
3.1. Аналіз реальних випадків застосування моделей АММ в однакових початкових умовах	36
3.2. Рекомендації щодо вибору моделі автоматичного маркет-мейкінгу на основі порівняльного аналізу.....	49
ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	57

ВСТУП

Автоматичний маркет-мейкінг (Automated Market Making, AMM) є ключовим елементом сучасної фінансової системи, що забезпечує ліквідність на ринках децентралізованих фінансів (Decentralized Finance, DeFi). З огляду на зростання популярності криптовалют та цифрових активів дослідження AMM набуває особливої актуальності, оскільки такі моделі дозволяють уникнути центральних посередників і автоматизувати процес надання ліквідності, що сприяє більшій прозорості та зниженню операційних витрат.

На тлі традиційних фінансових систем, що покладаються на централізованих маркет-мейкерів, автоматичні моделі маркет-мейкінгу значно розширюють доступ до фінансових послуг та підвищують прозорість ринків. Використання AMM дозволяє користувачам безпосередньо брати участь у забезпеченні ліквідності, що сприяє децентралізації ринку та зниженню бар'єрів для участі.

Динамічний розвиток ринку криптовалют і децентралізованих бірж підсилює важливість дослідження ефективності AMM моделей, зокрема в умовах нестабільності криптоактивів та високої волатильності ринку. Важливою є здатність моделей забезпечувати стійке ціноутворення та достатній рівень ліквідності, що впливає на конкурентоспроможність ринку. Моделі AMM, зокрема на основі функцій постійної продуктивності, використовуються для формування цін на цифрові активи, проте вони мають свої обмеження у разі значних ринкових коливань, що призводить до значних втрат ліквідності. Актуальність теми дослідження автоматичних моделей маркет-мейкінгу зумовлена стрімким розвитком децентралізованих фінансів та потребою в інноваційних підходах до забезпечення ліквідності на фінансових ринках без посередників. Проблеми ефективності різних алгоритмів, зокрема постійних та змінних функцій продуктивності потребують глибшого аналізу для визначення їх переваг та недоліків у різних ринкових умовах.

Мета дослідження: вивчення та порівняння ефективності різних моделей автоматичного маркет-мейкінгу у контексті забезпечення ліквідності на ринках децентралізованих фінансів, виявлення переваг і недоліків застосування кожної з моделей в умовах нестабільності ринку.

Об'єкт дослідження: ринки децентралізованих фінансів, де застосовуються алгоритми автоматичного маркет-мейкінгу.

Предмет дослідження: математичні моделі автоматичного маркет-мейкінгу та їх вплив на ліквідність ринку та ціноутворення цифрових активів.

Методи дослідження: у роботі застосовують аналітичні методи дослідження для оцінки ефективності та ризиків різних моделей АММ, методи математичного моделювання для порівняння функціональних особливостей алгоритмів, статистичні методи для аналізу волатильності активів та її впливу на АММ.

РОЗДІЛ 1

Основи, переваги та недоліки децентралізованих фінансів та автоматичного маркет-мейкінгу

1.1. Поняття, розвиток та основні характеристики децентралізованих фінансів

В останні роки децентралізовані фінансові моделі набули широкої популярності як ключовий технологічний тренд, завдяки доступності послуг через Інтернет, відносно низьким витратам завдяки усуненню зайвих посередників та прозорості, що посилює привабливість цього напрямку. Технологічні компанії, що розробляють платформні рішення та надають різноманітні фінансові сервіси, стрімко посилюють свою економічну вагу та технічну досконалість.

Останнім часом значна частина наукових публікацій зосереджується на темі децентралізованих фінансів, розглядаючи їх як ключовий напрям розвитку віртуальних активів. Особливо актуальними є дослідження, що стосуються цифрових фінансових інструментів, платформ, ризиків, які супроводжують використання віртуальних активів як платіжного засобу та інвестиційного ресурсу, управління цими ризиками. В Україні наукова спільнота поки приділяє недостатньо уваги розвитку децентралізованих фінансів та вивченню ризиків, пов'язаних з використанням віртуальних активів. На поточний момент дослідники зосереджуються переважно на класифікації та оцінці ризиків, пов'язаних з віртуальними активами у правовому контексті.

Децентралізовані фінансові сервіси об'єднують аналоги традиційних фінансових інструментів, реалізованих за допомогою цифрових технологій [19]. Ці послуги загальнодоступні, функціонують як проекти з відкритим кодом і здебільшого базуються на смартконтрактах – специфічних угодах, закодованих у вигляді математичних алгоритмів, виконання яких забезпечується програмними засобами на блокчейн-платформах в Інтернет-мережі [21].

До сфери децентралізованих фінансових послуг належать некастодіальні кредитні протоколи під заставу криптоактивів, децентралізовані біржі (Decentralized Exchange, DEX), ринки прогнозування, протоколи для випуску синтетичних активів та деривативів. Смартконтракти на одній блокчейн-платформі можуть бути інтегровані між собою завдяки стандартизації токенів і програмній сумісності [21].

Bitcoin і Ethereum стали першими криптовалютами платформами, що реалізували ідеї DeFi. Обидві криптовалюти діють через великі комп'ютерні мережі без централізованого управління, що дозволяє будь-якому користувачу Інтернету взаємодіяти з фінансовою системою через пірингові (P2P) та децентралізовані додатки (dApps), які охоплюють основні аспекти кредитування, позикових операцій і торгівлі у децентралізованих структурах.

Peer-to-peer, або P2P (від англ. «рівний до рівного») – це архітектурна модель системи, в основі якої знаходиться мережа рівноправних вузлів, кожен з яких виконує функції клієнта і сервера водночас [13].

DApps (англ. decentralized applications) – це децентралізовані додатки сервер-клієнтського типу, які функціонують на платформах, подібних до Ethereum або Ethereum Classic. Відмінною особливістю децентралізованих систем є те, що кожен вузол мережі здійснює обчислення, чого немає в централізованих і навіть розподілених системах [7].

Станом на 2021 рік ринок децентралізованих фінансів демонструє високий рівень зрілості, що підтверджується зростанням популярності торгових операцій, які не залежать від участі посередників і державного контролю. Такий підхід сприяє досягненню справжньої децентралізації, наближаючи учасників ринку до фінансової незалежності. До ринку децентралізованих фінансів належать різні суб'єкти, зокрема інвестиційні фонди, торгові компанії та навіть централізовані платформи прибутковості. Ці платформи здійснюють надання фінансових продуктів, залучаючи третю сторону, яка управляє процесом і здійснює контроль над фінансовими операціями. Такі проекти, як правило, забезпечують ліквідність для DeFi-протоколів, а зростаючий інтерес великих

інвесторів до децентралізованих фінансів підкріплює позитивну тенденцію зростання капіталу на цьому ринку.

Сервіси та додатки DeFi корисні для резидентів країн із слаборозвиненою або нестабільною економікою, розвинених держав, де попит на такі рішення проявляється у кредитуванні, інвестуванні та впровадженні нових моделей отримання доходів.

DeFi пропонують перспективу альтернативної фінансової архітектури, орієнтованої на депосередництво – усунення посередників та децентралізацію фінансових операцій. Однак значною проблемою залишаються ризики, пов'язані з використанням DeFi у тіньових схемах, включаючи маніпуляції ринком, помилкові стимули, надмірну короткострокову орієнтованість, системні ризики, схеми Понці, шахрайські операції та відмивання грошей, що формує скептичне ставлення до поширення DeFi.

У 2020 році криптоіндустрія зазнала стрімкого розвитку сектору DeFi, що спостерігалось особливо у період з червня по вересень, відомий як «літо DeFi 2020». Саме тоді ринкова капіталізація протоколів DeFi зростає у 12 разів, досягнувши 19,6 мільярда доларів. Співвідношення капіталізації DeFi проєктів до загальної капіталізації крипторинку збільшилося з 1,7 мільярда доларів (0,9%) до 19,6 мільярда доларів (4,6%) (рис. 1.1) [16].

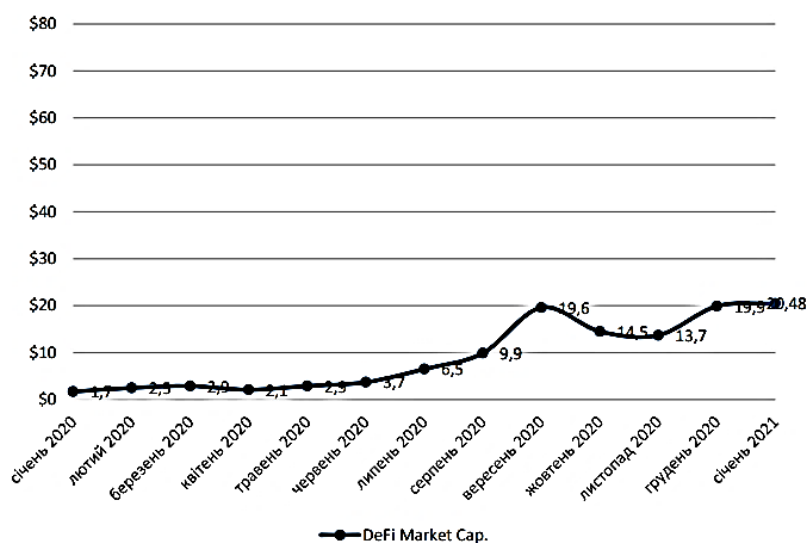


Рис. 1.1. Глобальна ринкова капіталізація протоколів DeFi

Ринок DeFi охоплює ключові напрями: фармінг (біржі, кредитування, страхування, опціони, синтетичні активи), майнінг ліквідності, роздачу токенів та початкові пропозиції на децентралізованих біржах. Фінансові операції у криптосекторі, включно з наданням ліквідності та токенизацією матеріальних активів, стимулюють розвиток нових моделей діяльності.

Загальна заблокована вартість активів (Total Value Locked, TVL) у квітні 2021 року перевищила 86,05 мільярда доларів, ставши важливим показником ефективності протоколів DeFi. Чим більша TVL, тим кращою вважається робота протоколу, оскільки значна частина капіталу використовується для маркетмейкінгу, кредитування, управління активами та арбітражу, приносячи дохід провайдерам капіталу.

Одним з прикладів успішної інтеграції реальних активів у сферу DeFi стала Centrifuge, компанія, що через свою платформу Tinline використовує нецифрові активи як заставу для отримання кредитів у MakerDAO. MakerDAO, будучи платформою смарт-контрактів на базі Ethereum, дозволяє випускати стейблкоїн DAI під заставу криптоактивів [24]. Так, 21 квітня 2021 року через MakerDAO був оформлений кредит у 181 тис. доларів під заставу нерухомості, що стало однією з перших реальних заставних операцій на блокчейні.

Такі види фінансової діяльності, як маркетмейкерство (ММ), страхування та створення структурованих продуктів, донедавна залишалися доступними лише інституціональним інвесторам, що володіли значним капіталом і спеціалізованими знаннями. Однак завдяки DeFi ці бар'єри значно знизилися, відкривши доступ до зазначених фінансових операцій для широкого загалу.

Однією з найінноваційніших особливостей DeFi сьогодні є фармінг – діяльність, що передбачає надання капіталу для підтримки протоколів DeFi з метою отримання доходу на вкладений капітал. Більшість протоколів DeFi функціонують як фінансові додатки peer-to-peer (P2P), у яких вкладений капітал спрямовується на надання послуг кінцевим користувачам. Збори, стягнуті з користувачів, надалі розподіляються між постачальниками капіталу та самим

протоколом, при цьому постачальники капіталу отримують так звану внутрішню прибутковість.

У криптоіндустрії протоколи DeFi активно стимулюють ліквідність через програми майнінгу ліквідності, які передбачають винагороду власними токенами протоколу в обмін на внесення капіталу. Ці токени, як правило, наділені правами управління і можуть забезпечувати фінансову вигоду для користувачів DeFi.

Майнінг ліквідності як програма винагороди вперше була запущена компанією Synthetix у липні 2019 року, а в червні 2020 року стала популярною завдяки проекту Compound. Зростаюча популярність таких програм призвела до появи численних проєктів улітку 2020 року, що взяли назви на честь харчових продуктів і овочів: Yam (солодка картопля) і Pickle (солоний огірок).

Фармінг як вид діяльності не позбавлений ризиків, зокрема можливості втрат через блокування капіталу, що може призвести до упущення потенційно вигідніших інвестиційних можливостей. Найбільш розповсюдженою формою майнінгу ліквідності є надання ліквідності для токенів на децентралізованих біржах за допомогою криптовалют ETH, BTC або стейблкоїнів, прив'язаних до долара США. Ці програми сприяють зростанню ліквідності навколо власних токенів протоколу та дозволяють користувачам легко торгувати ними на децентралізованих біржах.

Світ DeFi розвивається надзвичайно швидко, що вимагає від інвесторів оперативного ухвалення рішень щодо доцільності вкладень у проєкти. Через це часто зростає синдром втраченої вигоди (Fear of Missing Out, FOMO), який особливо відчувається в динамічному середовищі криптовалютного ринку.

Незалежно від ролі інвестора, трейдера чи фермера, існують ключові ризики, зокрема вразливості смартконтрактів, ризик імперманентних втрат (Impermanent Loss, IL) і загальний системний ризик, пов'язаний із можливим обвалом криптовалютного ринку. Навіть якщо проєкт має технічно досконалу архітектуру, його учасники не повністю захищені від ризиків, пов'язаних із можливими вразливістю та шахрайством з боку зловмисників.

Як один із провідних інструментів у сфері DeFi, децентралізоване кредитування у квітні 2021 року продемонструвало значне зростання, перевищивши показники 2020 року у 102 рази, досягнувши обсягу запозичень у 9,7 мільярда доларів.

Серед основних протоколів децентралізованого кредитування виділяються Compound, Maker, Aave та Cream. Compound Finance, розроблений компанією Compound Labs на базі Ethereum, є відкритим протоколом цифрового фінансового ринку, який дозволяє будь-якому користувачу позичати або надавати в позику криптовалюту. На 1 квітня 2021 року платформа Compound підтримувала дев'ять різних токенів (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Загальна заблокована вартість DeFi (TVL) станом на 1 квітня 2021 року

Загальний обсяг запозичень: 9,864,059,983 дол. США			
№	Протокол	Обсяг запозичень, дол. США	Відсоток, %
1	Compound	5,558,982,593	56.36
2	Maker	2,930,512,852	29.71
3	Aave V2	766,139,069	7.77
4	Aave V1	556,693,458	5.64
5	Cream	39,380,275	0.40
6	WePiggy	9,674,577	0.10
7	Fo Tube Bank	2,256,167	0.02
8	QIAN	319,580	0.00
9	bZx	101,413	0.00

Maker – найстаріший протокол у сфері запозичення DeFi, що дозволяє отримувати кредити з надлишковим забезпеченням, підтримуючи понад 30 різних токенів для випуску DAI, децентралізованого стейблкоїну, прив'язаного до курсу долара США. Окрім функцій кредитування, Maker виступає емітентом стейблкоїну DAI, забезпечуючи його стабільність завдяки автоматизованій системі смартконтрактів на блокчейні Ethereum [24].

Aave, ще один відомий протокол децентралізованого фінансового ринку, подібний за функціоналом до Compound. На квітень 2021 року Aave підтримує 24 різних активи для надання й запозичення, що перевищує кількість активів

на Compound. Compound та Aave надають можливість кредиторам підтримувати ліквідність проєкту, передаючи криптовалюту в кредитні пули та отримуючи дохід у вигляді відсотків. Позичальники можуть брати кредити з цих пулів ліквідності, сплачуючи відповідні відсотки. Відмінною особливістю Aave є впровадження нових принципів кредитування, зокрема зміна ставок, обмін застави та флеш-позики. Флеш-позика – це короткостроковий кредит без забезпечення, де за умовами смартконтракту весь процес запозичення, використання та погашення кредиту відбувається в межах однієї транзакції. Якщо транзакція не відповідає умовам повернення, активуються заходи безпеки, і система автоматично відхиляє таку транзакцію, забезпечуючи стабільність та надійність мережі [6].

Cream Finance (C.R.E.A.M), заснований у липні 2020 року Дж. Хуангом і Л. Ченгом, є форком Compound – розділенням програмного проєкту, яке дозволяє обслуговувати екзотичні активи з мінімальним обсягом торгів. Він працює на платформах Ethereum, Binance Smart Chain і Fantom. Cream відзначається гнучкішою політикою залучення активів у порівнянні з Compound і Aave, що дозволило проєкту швидко залучити більше активів, ніж інші цифрові фінансові ініціативи. Це був один із перших кредитних протоколів, який приймав дохідні токени та токени постачальників ліквідності як забезпечення.

При використанні децентралізованих протоколів кредитування та запозичення необхідно враховувати технічні ризики, зокрема можливі помилки в смартконтрактах. Якщо код недостатньо захищений, хакери можуть отримати доступ до забезпечення цих протоколів. Для позичальників основними ризиками залишаються втрати через помилки в управлінні коефіцієнтом забезпечення: через волатильність криптовалют ставка за кредитом може знизитися нижче мінімального коефіцієнта, що призведе до ліквідації застави й значних збитків у вигляді ліквідаційного збору. Тому критично важливо контролювати й підтримувати належне співвідношення заставного забезпечення.

Стейблкоїни як неволатильні активи стали ключовою частиною криптоеко системи, що сприяє глобальному руху коштів на крипторинку. Станом

на 1 квітня 2021 року загальна ринкова капіталізація стейблкоїнів становила 64,5 мільярда доларів, що в 12 разів перевищує показники 2020 року.

USDT (колишній RealCoin), централізований стейблкоїн, уперше з'явився на біржі Bitfinex у 2015 році. Як перший стейблкоїн на ринку USDT зберігає перевагу за обсягами емісії й послідовно утримує лідерство на ринку стейблкоїнів. Станом на квітень 2021 року ринкова капіталізація USDT становила 40 мільярдів доларів, що відповідає понад 66% від загальної частки ринку стейблкоїнів.

USDT підтримує прив'язку до долара США за допомогою системи забезпечення в співвідношенні один до одного (1:1). Це означає, що готівкові резерви використовуються як забезпечення, аналогічно тому, як долар у минулому столітті був прив'язаний до золота. Однак, процес випуску стейблкоїна Tether (USDT) викликає занепокоєння через непрозорість. Оскільки Tether має централізований випуск і резервний фонд, багато представників криптоспільноти ставляться до нього зі скепсисом.

Скептичне ставлення частково підтвердилось у березні 2019 року, коли Tether змінив свою політику, забезпечивши USDT кредитами своїх дочірніх компаній. Протягом років різні державні регулятори проводили розслідування щодо Tether. У лютому 2021 року генеральний прокурор Нью-Йорка завершив розслідування фінансів Bitfinex і Tether без офіційних звинувачень, проте було накладено колективний штраф у 18,5 мільйонів доларів, що мав врегулювати звинувачення у змішуванні клієнтських і корпоративних активів.

Історія Tether продовжує розвиватися і навряд чи буде завершена найближчим часом. Лістинг USDT на Coinbase став одним із нещодавніх кроків, який зміцнив його легітимність на ринку. Технічний директор Bitfinex підтвердив, що Tether зареєстрований і регулюється FinCEN.

Maker як один із перших децентралізованих «Центральних банків» DeFi діє як кредитний протокол, де стейблкоїн DAI випускається як побічний продукт попиту на кредити, при цьому застава (переважно ETH) депонується у сховищах Maker. Заставні активи мають високий коефіцієнт забезпечення (зазвичай 150%

і більше, за винятком стейблкоїнів), що допомагає захищати протокол від «чорного лебедя» – важкопрогнозованих подій із серйозними наслідками [22].

Maker здійснює регулювання кількості DAI шляхом коригування процентних ставок за кредитами для впливу на попит і пропозицію. Одним із викликів є те, що надмірне забезпечення обмежує ефективність використання капіталу, що ускладнює масштабування відповідно до попиту. Для зниження ціни DAI використовується арбітражна техніка, яка потребує значного капіталу для викупу більшої кількості DAI. Наприклад, основне сховище ETH з коефіцієнтом забезпечення 150% вимагає від позичальника витратити 1,5 долара за кожен DAI, що призводить до таких сценаріїв, як «Чорний четвер» або зростання ціни DAI вище 1 долара під час запуску майнінгу ліквідності на Compound.

Кожен стейблкоїн має свої унікальні недоліки, не обмежуючись лише проблемами Tether чи DAI. Головна складність полягає у досягненні балансу між децентралізацією, характерною для DeFi, та здатністю валюти стабільно підтримувати свою прив'язку. Централізовані стейблкоїни є більш ефективними, але вимагають довіри до центральної організації та несуть системні ризики, подібні до традиційних фінансів. DAI є децентралізованим, проте він не забезпечує повної капітальної ефективності й може не відповідати ринковому попиту.

З моменту створення Tether і DAI з'явилися нові децентралізовані протоколи стейблкоїнів, спрямовані на підвищення децентралізації, стабільності ціни та ефективності використання капіталу. Ці протоколи називаються алгоритмічними стейблкоїнами.

1.2. Автоматичний маркет-мейкінг: принципи роботи, переваги та недоліки

Автоматичний маркет-мейкінг відіграє ключову роль у децентралізованих фінансах, забезпечуючи ліквідність та підвищуючи доступність торгівлі для широкого кола користувачів без потреби в традиційних посередниках. Завдяки

АММ, користувачі можуть торгувати активами за допомогою смарт-контрактів і пулів ліквідності, які автоматично регулюють ціни відповідно до попиту та пропозиції, знижуючи таким чином операційні витрати та збільшуючи прозорість процесу торгівлі. Ця модель допомагає уникати звичайних ринкових бар'єрів, зокрема участі великих маркет-мейкерів та значних фінансових витрат для підтримки ліквідності [6].

Водночас АММ пропонує нові можливості для інвесторів і користувачів, дозволяючи їм додавати активи до пулів ліквідності та отримувати частку комісійних зборів, тим самим створюючи пасивний дохід. У той же час автоматичний маркет-мейкінг залишається вразливим до імперманентних втрат та інших ризиків, пов'язаних із волатильністю ринку, що потребує особливої уваги під час вибору платформ для інвестицій.

Зі стрімким зростанням DeFi, АММ стали фундаментом для багатьох платформ, включно з популярними біржами Uniswap, Curve, і SushiSwap, де вони забезпечують ліквідність і легкий доступ до торгівлі криптовалютами. АММ сприяє доступності фінансових послуг, надаючи можливість інвесторам навіть із невеликими капіталами надавати ліквідність, отримуючи винагороду у вигляді частини торгових комісій. Такий підхід створює альтернативу традиційним моделям, роблячи ринок більш демократичним і доступним. Окрім цього, децентралізовані біржі на основі АММ відзначаються стійкістю до цензури, адже смарт-контракти дозволяють обходити обмеження, запроваджені в централізованих фінансових установах, тим самим підвищуючи свободу доступу до фінансів для користувачів у всьому світі.

Автоматичний маркет-мейкінг ґрунтується на кількох ключових принципах, які забезпечують функціонування децентралізованих бірж без традиційних маркет-мейкерів. Основні принципи АММ включають такі аспекти:

1. Пули ліквідності. АММ використовує концепцію пулів ліквідності, куди користувачі додають пари активів (наприклад, ETH/DAI), що дозволяє іншим користувачам обмінювати один актив на інший безпосередньо

в пулі. Кожна транзакція автоматично змінює баланс активів у пулі, що впливає на ціноутворення.

2. Моделі ціноутворення. В основі роботи АММ лежать математичні моделі, які визначають ціни активів залежно від балансу в пулі. Наприклад, найпоширенішою є модель постійного добутку (Constant Product Market Maker, CPMM), де ціни активів регулюються згідно закону $x \cdot y = k$, де x і y – кількість активів у пулі, k – константа.
3. Імперманентні втрати. Постачальники ліквідності можуть зазнавати імперманентних втрат, або тимчасову втрату вартості, через зміну ціни активів, які вони надали в пул ліквідності. Втрата порівнюється з потенційним прибутком, який міг би бути отриманий, якби ці активи зберігали поза пулом.
4. Децентралізація та смарт-контракти. Взаємодія користувачів із пулом ліквідності відбувається через смарт-контракти, що гарантують автоматичне виконання торгівлі та ліквідацію активів, без участі посередників. Смарт-контракти забезпечують безпеку, прозорість та незмінність умов угоди.
5. Винагорода за ліквідність. Для залучення ліквідності на платформи АММ використовуються механізми винагород. Вкладники отримують частку комісійних зборів від кожної транзакції, що здійснюється в пулі. Це стимулює учасників зберігати свої активи в пулі, забезпечуючи стабільну ліквідність для трейдерів [8].

Автоматичні маркет-мейкери можна класифікувати на кілька типів залежно від моделей, що використовуються. Основні типи АММ включають:

1. Uniswap (модель постійного добутку) є одним із найпопулярніших АММ, що використовує модель постійного продукту ($x \cdot y = k$). Ця модель дозволяє автоматично регулювати ціни активів залежно від їх кількостей у пулі. Перевагою Uniswap є його простота та ефективність в торгівлі токенами,

оскільки немає необхідності в централізованих біржах. Однак користувачі можуть стикатися з імперманентними втратами при значних коливаннях цін [17].

2. Balancer (модель з багатьма активами) дозволяє створювати пули з кількома активами, підтримуючи різні співвідношення між ними (не лише 50/50). Це означає, що провайдери ліквідності можуть створити пул з кількох токенів, оптимізуючи свої інвестиції. Перевагою Balancer є можливість адаптувати пул під конкретні потреби, що робить його корисним для тих, хто хоче диверсифікувати ризики [2].

3. Curve (оптимізація для стейблкоїнів) спеціалізується на ліквідності для стейблкоїнів, використовуючи модель, яка оптимізована для мінімізації імперманентних втрат при торгівлі токенами з подібними цінами. Це дозволяє забезпечити високу ліквідність для стейблкоїнів і знижує комісії за транзакції. Curve є вигідним варіантом для трейдерів, які бажають здійснювати операції зі стейблкоїнами з максимальною ефективністю [5].

4. SushiSwap (форк Uniswap з додатковими функціями) є форком Uniswap, який пропонує додаткові можливості, такі як «суші» (SUSHI) токени для винагороди провайдерів ліквідності, а також функції, пов'язані з управлінням спільноти. Це робить SushiSwap привабливим для користувачів, які хочуть надавати ліквідність та брати участь в управлінні платформою [15].

5. PancakeSwap є популярним АММ на Binance Smart Chain (BSC), який пропонує швидкі та недорогі транзакції. Він використовує аналогічну модель до Uniswap, але оптимізований для користувачів BSC. Перевагою PancakeSwap є низькі комісії та швидкість обробки, що робить його вигідним варіантом для трейдерів у цій екосистемі [12].

Кожен тип АММ має свої особливості та переваги, корисні в різних торгових ситуаціях залежно від потреб користувачів і специфіки активів.

Автоматичні маркет-мейкери (АММ) пропонують суттєві переваги, які роблять їх привабливими для користувачів та інвесторів у децентралізованих фінансах:

1. Відсутність необхідності в традиційному маркет-мейкінгу. АММ усувають потребу в посередниках, таких як традиційні маркет-мейкери або біржі. Це дозволяє користувачам взаємодіяти безпосередньо з ліквідністю через смарт-контракти, що знижує витрати на транзакції та підвищує ефективність.
2. Забезпечення ліквідності для нових активів. АММ дозволяють новим токенам отримувати ліквідність без необхідності проходити через суворі умови централізованих бірж. Це сприяє швидшому запуску нових активів на ринку та забезпечує можливість торгівлі для менш відомих токенів.
3. Можливості для пасивного доходу через пул ліквідності. Користувачі, які надають ліквідність у пули, отримують частку комісійних зборів від транзакцій, що відбуваються в цих пулах. Це створює можливість для пасивного доходу, оскільки провайдери ліквідності можуть заробляти на своїх інвестиціях, зберігаючи активи у пулі.
4. Відкритість та прозорість механізмів. Усі транзакції та механізми роботи АММ базуються на смарт-контрактах, які доступні для перевірки. Це забезпечує високий рівень прозорості та довіри, оскільки користувачі можуть самостійно перевірити умови та логіку роботи механізмів [11].

Автоматичні маркет-мейкери (АММ) мають недоліки, які можуть впливати на їх ефективність та ризики для користувачів:

1. Проблема імперманентних втрат. Імперманентні втрати виникають, коли ціни активів у пулі ліквідності змінюються відносно один одного. Це може призвести до ситуації, коли загальна вартість активів у пулі стає меншою, ніж якби ці активи були збережені поза пулом. Це помітно при значних коливаннях цін, і користувачі можуть не усвідомлювати цей ризик при наданні ліквідності.
2. Ризики ліквідності та волатильності. АММ можуть зазнавати значних ризиків ліквідності у випадках, коли активи в пулі не користуються популярністю. Це може призвести до труднощів з виконанням угод і значних коливань цін, які не відображають реальної вартості активів.

3. Високі комісії за транзакції на блокчейнах з великим навантаженням. У періоди високого навантаження на блокчейн (наприклад, під час різких ринкових змін) комісії за транзакції можуть суттєво зрости. Це зменшує прибутковість торгівлі та завадить учасникам ринку зменшувати витрати на операції.
4. Можливі проблеми з безпекою та вразливістю контрактів. АММ функціонують на основі смарт-контрактів, які можуть мати вразливісті або помилки в коді. Якщо хакери виявлять вразливісті, це може призвести до втрати коштів користувачів або порушення роботи платформи [11]. Історично були випадки, коли атаки на смарт-контракти призводили до значних фінансових втрат для інвесторів.

У майбутньому розвиток автоматичних маркет-мейкерів може включати вдосконалення механізмів управління ліквідністю, зокрема через інтеграцію нових математичних моделей, які мінімізують імперманентні втрати і підвищують ефективність торгівлі. Розвиток технологій безпеки та нових протоколів може зменшити ризики, пов'язані з безпекою смарт-контрактів.

Загалом, АММ мають великий потенціал для подальшого вдосконалення і розширення в фінансових ринках, стаючи основним інструментом для забезпечення ліквідності та доступності фінансових послуг у децентралізованих системах. Зі зростанням популярності децентралізованих фінансів, автоматичні маркет-мейкери можуть відігравати ще більш значну роль у формуванні нових економічних моделей.

РОЗДІЛ 2

Моделі та алгоритми автоматичного маркет-мейкінгу:

Uniswap, Balancer, Curve

Метою розділу є аналіз і порівняння основних моделей автоматичного маркет-мейкінгу Uniswap, Balancer і Curve. Завдання полягає у визначенні їхніх ключових характеристик, ефективності в забезпеченні ліквідності, вивченні специфічних алгоритмів для оптимізації ціноутворення та ліквідності.

2.1. Uniswap

Uniswap – це одна з найбільш відомих децентралізованих бірж (DEX), що працює на основі технології Ethereum. Вона була запущена в 2018 році і швидко здобула популярність завдяки своїй простоті використання та інноваційній моделі автоматичного маркет-мейкінгу [17].

Uniswap використовує модель постійного продукту (Constant Product Market Maker, CPMM), яка дозволяє користувачам обмінювати токени без необхідності в традиційних брокерах або централізованих платформах. Користувачі можуть створювати пули ліквідності, додаючи пари tokenів, що забезпечує ліквідність для торгових операцій. Унікальність Uniswap полягає в тому, що будь-хто може стати провайдером ліквідності, надаючи свої активи в пул, і отримувати частку комісійних зборів від транзакцій, що відбуваються в цьому пулі.

Перед розглядом алгоритму Uniswap V2, спочатку більш детально розглянемо поняття імперманентних втрат (Impermanent Loss, IL) та спосіб їх обчислення.

Якщо функція АММ є опуклою (ціна зростає при купівлі та знижується при продажу), тоді угода без компенсації у вигляді транзакційної комісії завжди призводить до втрат для постачальників ліквідності. Припустимо, що одна угода викликає переміщення функції АММ із точки 1 у точку 2, тоді спотова ціна (абсолютне значення похідної функції) у точках 1 та 2 дорівнює P_1 та P_2

відповідно, P_3 – фактична торгова ціна. Враховуючи властивості опуклих функцій, матимемо $P_1 > P_3 > P_2$ (рис. 2.1) [1].

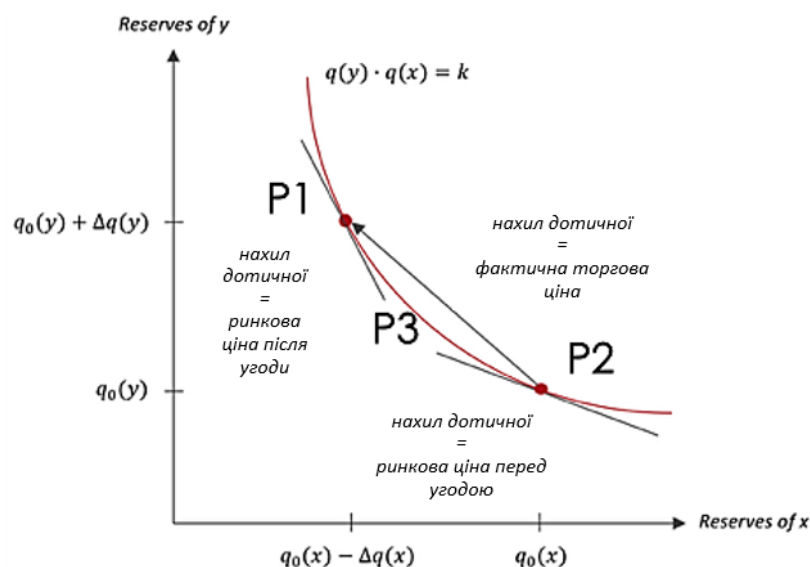


Рис. 2.1 Функція AMM алгоритму Uniswap

Імперманентні втрати визначаються як різниця у вартості між поточною вартістю токенів постачальника ліквідності в пулі після торгів (V) та поточною вартістю цих токенів, за умови їх утримання поза пулом без надання ліквідності (V_{held}). Для зручності імперманентні втрати та ціни будуть виражені в термінах токена Y (ціна 1 токена Y є одиницею).

$$V = P_2 x_2 + y_2; V_{held} = P_2 x_1 + y_1;$$

$$IL = V - V_{held} = P_2 x_2 + y_2 - P_2 x_1 - y_1;$$

$$IL = P_2(x_2 - x_1) + (y_2 - y_1) = (x_2 - x_1) \left(P_2 - \frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1} \right);$$

$$IL = (x_2 - x_1)(P_2 - P_3) < 0.$$

З отриманого бачимо, що імперманентні втрати завжди менші за нуль ($x_2 > x_1, P_3 > P_2$).

Uniswap V2 використовує просту, але потужну формулу для визначення умов торгівлі ($x \cdot y = k$). Добуток резервів токенів у пулі ліквідності є постійною величиною, усі угоди повністю визначаються кількістю токенів у пулі ліквідності [18].

$$-\frac{dy}{dx} = P;$$

$$-\frac{d\left(\frac{k}{x}\right)}{dx} = \frac{k}{x^2} = \frac{y}{x} = P;$$

$$Px = y;$$

$$V_x = V_y.$$

Використовуючи подібні міркування обчислимо імперманентні втрати угоди з комісією та без неї в Uniswap V2. Будемо припускати, що відбувається зміна ціни з P на Pk .

Імперманентні втрати в Uniswap V2 без урахування комісії:

$$x \cdot y = L^2, L - \text{константа ліквідності};$$

$$(x_1, y_1) \rightarrow (x_2, y_2); P \rightarrow P' = Pk;$$

$$x = \frac{L}{\sqrt{P}}; y = L\sqrt{P};$$

$$IL(k) = \frac{V - V_{held}}{V_{held}} = \frac{(P'x_2 + y_2) - (P'x_1 + y_1)}{P'x_1 + y_1};$$

$$IL(k) = \frac{\left(Pk \frac{L}{\sqrt{Pk}} + L\sqrt{Pk}\right) - \left(Pk \frac{L}{\sqrt{P}} + L\sqrt{P}\right)}{\left(Pk \frac{L}{\sqrt{P}} + L\sqrt{P}\right)};$$

$$IL(k) = \frac{2\sqrt{k}}{k+1} - 1.$$

Отже, імперманентні втрати, виміряні у відсотках, можуть бути виражені функцією від k .

Графік залежності імперманентних втрат $IL(k)$ від зміни k начно демонструє той факт, що чим більші відносні зміни ціни, тим більшими будуть імперманентні втрати (рис 2.2). Це можна пояснити тим, що більш цінні токени постачальників ліквідності купуються з пулу, залишаючи більше менш цінних токенів.

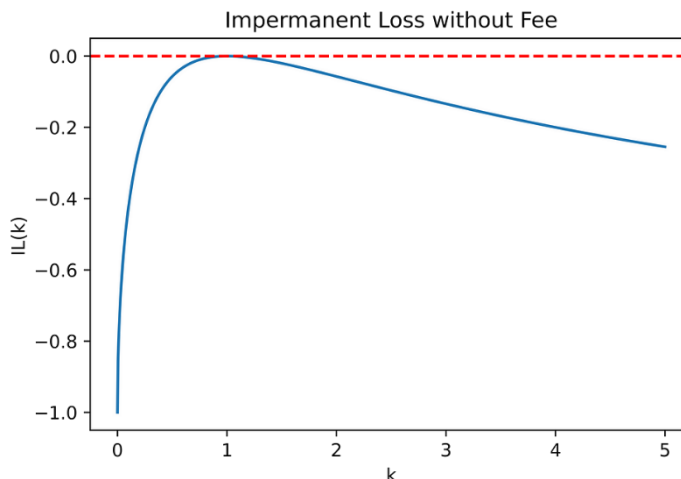


Рис. 2.2. Імперманентні втрати без урахування комісії (Uniswap V2)

Далі дослідимо поведінку $IL(k)$ за умови додавання комісії за транзакцію:

$$x \cdot y = L^2;$$

$$(x_1, y_1) \rightarrow (x_2, y_2); P \rightarrow P' = Pk;$$

$$x_2 - \rho(x_2 - x_1) = \frac{L}{\sqrt{Pk}}, \text{ де } \rho - \text{відсоток комісії};$$

$$y_2 = L\sqrt{Pk}; x_1 = \frac{L}{\sqrt{P}}; y_1 = L\sqrt{P};$$

$$IL(k) = \frac{V - V_{held}}{V_{held}} = \frac{(P'x_2 + y_2) - (P'x_1 + y_1)}{P'x_1 + y_1};$$

$$IL(k) = \frac{\left(L\sqrt{Pk} + \frac{\frac{L}{\sqrt{Pk}} - \rho \frac{L}{\sqrt{P}}}{1 - \rho} Pk \right) - \left(L\sqrt{P} + \frac{L}{\sqrt{P}} Pk \right)}{\left(L\sqrt{P} + \frac{L}{\sqrt{P}} Pk \right)};$$

$$IL(k, \rho) = \frac{\sqrt{k}(2 - \rho) - \rho k}{(1 + k)(1 - \rho)} - 1.$$

Отримана функція $IL(k, \rho)$ подібна до функції імперманентних втрат без урахування комісії, $IL(k, 0) = IL(k)$. З побудованого графіку імперманентних втрат зі стандартною комісією $\rho = 0,3\%$ видно, що для $k \in [0,994; 1]$ функція $IL(k)$ – додатна, тобто у цьому проміжку постачальники ліквідності фактично отримують прибуток (отримана комісія перевищує втрати) (рис 2.3). Тобто

запровадження комісії дозволяє постачальникам ліквідності отримувати прибуток для певного діапазону цін.

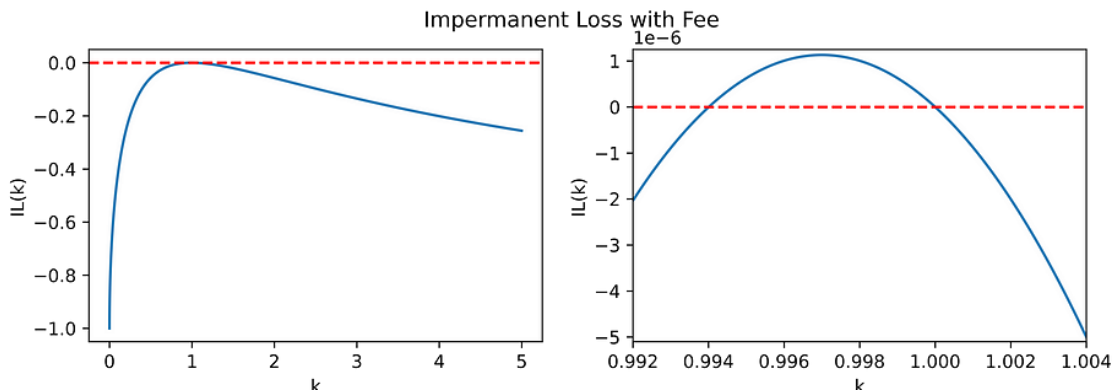


Рис. 2.3. Імперманентні втрати з урахуванням комісії (Uniswap V2)

Вище ми розглядали лише випадок зниження відносної ціни. Тепер можемо розрахувати діапазон значень k , за яких постачальники ліквідності отримуватимуть прибуток.

Випадок зниження ціни:

$$IL(k, \rho) = \frac{\sqrt{k}(2 - \rho) - \rho k}{(1 + k)(1 - \rho)} - 1 \geq 0;$$

$$1 - \rho \leq \sqrt{k} \leq 1; (1 - \rho)^2 \leq k \leq 1;$$

$$x_1 + (1 - \rho)\Delta x = \frac{L}{\sqrt{Pk}}; x_1 = \frac{L}{\sqrt{P}};$$

$$1 \leq 1 + (1 - \rho) \frac{\Delta x}{x_1} = \frac{1}{\sqrt{k}} \leq \frac{1}{1 - \rho};$$

$$\frac{\Delta x}{x_1} \leq \frac{\rho}{(1 - \rho)^2}.$$

Випадок зростання ціни:

$$IL(k, \rho) = \frac{\sqrt{k}(2 - \rho) - \rho}{(1 + k)(1 - \rho)} - 1 \geq 0;$$

$$1 \leq \sqrt{k} \leq \frac{1}{1 - \rho}; 1 \leq k \leq \frac{1}{(1 - \rho)^2};$$

$$y_1 + (1 - \rho)\Delta y = L\sqrt{Pk}; y_1 = L\sqrt{P};$$

$$1 \leq 1 + (1 - \rho) \frac{\Delta y}{y_1} = \sqrt{k} \leq \frac{1}{1 - \rho};$$

$$\frac{\Delta y}{y_1} \leq \frac{\rho}{(1 - \rho)^2}.$$

Коли комісія ρ є досить малою, загальний діапазон k , враховуючи обидва випадки (зростання і зниження ціни), становить приблизно 4ρ (по 2ρ для кожного випадку). Тобто, діапазон прибутку охоплює проміжок $k \in [1 - 2\rho; 1 + 2\rho]$, $k = 1$ – початкова ціна (рис 2.4).

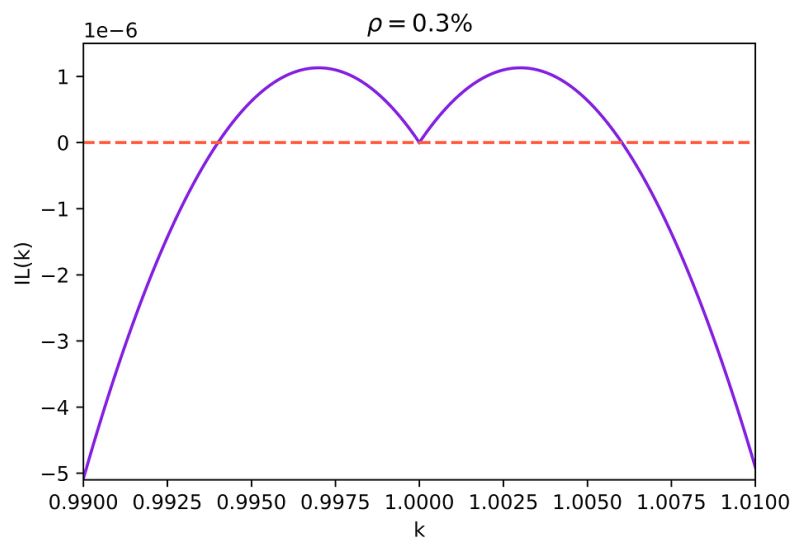


Рис. 2.4 Імперманентні втрати при зростанні/зниженні цін

Принцип роботи моделі:

1. Автоматичне ціноутворення. Коли користувач здійснює торгівлю, змінюється баланс активів у пулі. Наприклад, якщо користувач обмінює токен А на токен В, кількість токена А (x) зменшується, а кількість токена В (y) збільшується. Згідно з формулою, щоб k залишалася постійною, зміна одного з параметрів призводить до зміни іншого. Це дозволяє автоматично коригувати ціну токена в залежності від балансу в пулі.
2. Цінова стійкість. Завдяки цій моделі при збільшенні попиту на один з активів (наприклад, токен А) ціна на нього автоматично зростає, оскільки зменшується його кількість в пулі. Це стимулює інших учасників додавати ліквідність у форму токена, щоб отримати винагороду від комісій за торгівлю.

3. Ліквідність та ризики. Модель постійного продукту має недоліки, зокрема проблему імперманентних втрат. Коли ціни активів коливаються, провайдери ліквідності можуть втратити частину вартості своїх активів у порівнянні з традиційним зберіганням їх поза пулом.
4. Безперервність функції. Модель постійного продукту забезпечує безперервну функцію ціноутворення, що робить торгівлю більш ефективною і передбачуваною. Це означає, що користувачі завжди можуть здійснити обмін, не чекаючи на підтвердження від маркет-мейкерів або централізованих платформ.

Uniswap сприяє появі нових фінансових продуктів, забезпечуючи інновації у децентралізованих рішеннях. Прозорість і безпека смарт-контрактів підвищують довіру користувачів до платформи, а її популярність допомагає розширити концепцію DeFi серед широкої аудиторії. Таким чином, Uniswap стала основою для нових можливостей у фінансовій екосистемі.

2.2. Balancer

Balancer – це децентралізована біржа (DEX) і автоматичний маркет-мейкер, що працює на базі Ethereum. Запущена в 2020 році, Balancer пропонує інноваційний підхід до забезпечення ліквідності, дозволяючи користувачам створювати пули з кількома активами з різними вагами [2]. Однією з основних характеристик Balancer є можливість створювати пули ліквідності з різними пропорціями активів, наприклад, 80/20, 70/30 або 10/40/50. Це дозволяє провайдерам ліквідності налаштовувати свої інвестиції відповідно до ризиків та доходів. Balancer підтримує до 8 різних токенів в одному пулі, що забезпечує додаткову гнучкість.

Платформа має функцію автоматичного ребалансування, що дозволяє підтримувати задані пропорції активів у пулі, зменшуючи ризики, пов'язані з волатильністю цін. Користувачі, які надають ліквідність, можуть заробляти комісійні збори з кожної угоди в пулі, а також отримувати токени BAL, які використовуються для управління платформою. Також Balancer пропонує

інтеграцію з іншими DeFi-протоколами, що дозволяє створювати складні фінансові рішення та покращує загальний досвід користувачів. Ця платформа надає ефективний інструмент для торгівлі та управління ліквідністю у децентралізованій фінансовій екосистемі.

Balancer розширює концепцію 2-токенових пулів Uniswap V2 до мультиактивних пулів [1]. Вартість кожного типу активу (V_i) в пулі має інваріантну вагу (ω_i), сума яких дорівнює 1:

$$V_1:V_2:\dots:V_t:\dots:V_n = \omega_1:\omega_2:\dots:\omega_t:\dots:\omega_n;$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_t + \dots + \omega_n = 1.$$

Інваріант пулу:

$$B_1^{\omega_1} B_2^{\omega_2} \dots B_n^{\omega_n} = \text{constant}, \text{ де } B_t - \text{баланс кожного активу};$$

$$V_n = P_t^n B_n; P_t^t = 1; P_t^n = \frac{\frac{B_t}{\omega_t}}{\frac{B_n}{\omega_n}}.$$

На основі інваріанта можна вивести торгові формули з різними вхідними даними (торгівля між активом o та активом i). У цій системі позначень актив o завжди є активом, який отримується (купується), а актив i – вноситься. A і B позначають кількість токенів, що вносяться або отримуються, і поточну кількість токенів у резерві відповідно. Тоді матимемо

– кількість активу, що отримується:

$$A_0 = B_0 \left(1 - \left(\frac{B_i}{B_i + A_i} \right)^{\frac{\omega_i}{\omega_0}} \right);$$

– кількість активу, що потрібно внести:

$$A_i = B_i \left(\left(\frac{B_0}{B_0 - A_0} \right)^{\frac{\omega_0}{\omega_i}} - 1 \right);$$

– внесок для заданої ціни:

$$A_i = B_i \left(\left(\frac{P_i^{0'}}{P_i^0} \right)^{\frac{\omega_0}{\omega_0 + \omega_i}} - 1 \right);$$

– отримання для заданої ціни:

$$A_0 = B_0 \left(1 - \left(\frac{P_i^0}{P_i^{0'}} \right)^{\frac{\omega_i}{\omega_0 + \omega_i}} \right).$$

Balancer реалізує алгоритм Smart Order Router (SOR). Загальна ідея цього алгоритму полягає в тому, щоб розділити замовлення на декілька невеликих частин для торгівлі в різних пулах Balancer з метою досягнення кращого результату обміну. Припустимо, ми хочемо здійснити торгівлю в пулі № 1 та № 2. Якщо загальна сума N , якою хочемо торгувати, нижча за A , ми будемо торгувати лише в пулі № 1, оскільки ціна в цьому пулі завжди краща, ніж ціна в пул № 2. Якщо загальна сума перевищує A , ми будемо торгувати частиною в пулі № 1, а частиною – в пулі № 2. Сума активів обміняних у кожному пулі вирівнює ціну в обох пулах, $B + C = N$ (рис 2.5) [1].

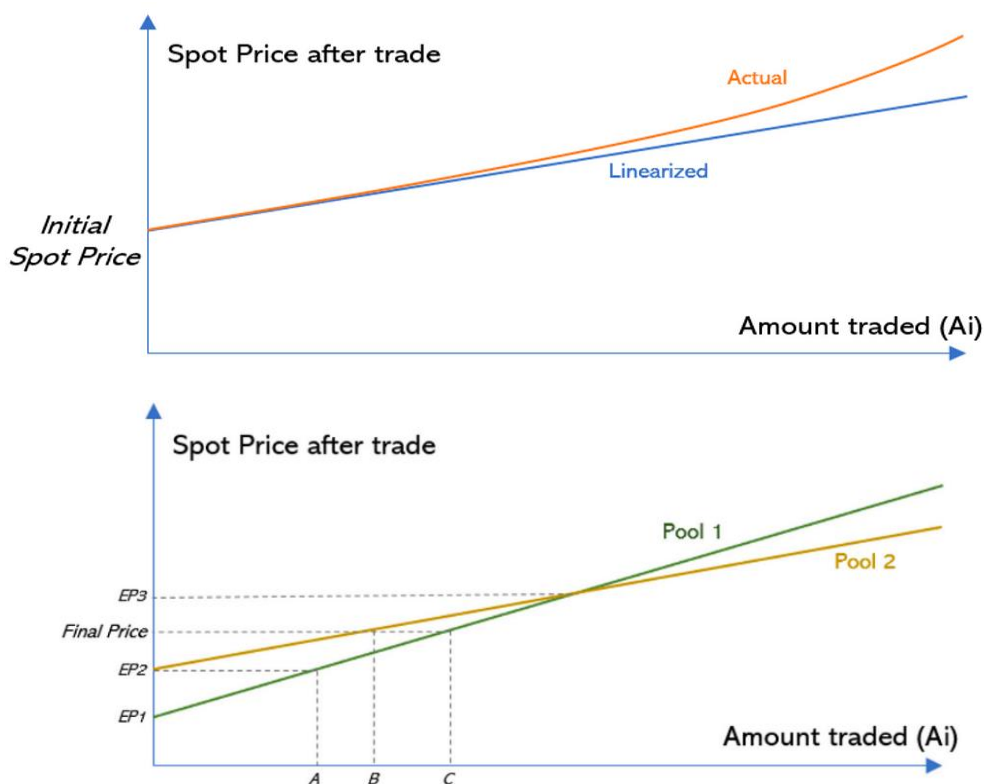


Рис. 2.5. Графік спотових цін в різних пулах

Функція ціни, залежно від обсягу торгівлі, зазвичай є нелінійною. Balancer спрощує функцію ціни до лінійної. Якщо існує n пулів, оптимальну стратегію можна визначити наступним чином:

$$\begin{aligned}
 P_1(x_1) &= k_1x_1 + b_1, \dots, P_n(x_n) = k_nx_n + b_n; \\
 P_1, \dots, P_n &= P; \\
 x_i &= \frac{P - b_i}{k_i}; \\
 \sum_{i=1}^n x_i &= N = \sum_{i=1}^n \frac{P - b_i}{k_i} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \right) P - \left(\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{k_i} \right); \\
 P &= \frac{N + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{k_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}}; \quad x_i = \frac{N + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{k_i} - \frac{b_i}{k_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}}.
 \end{aligned}$$

Якщо існує така функція ціни, що під час обміну всіх токенів у відповідному пулі ціна не може дорівнювати початковим значенням усіх інших цінових функцій до обміну, тоді тривіальною, оптимальною стратегією буде заміна всіх токенів у цьому пулі. Однак, перш ніж виконувати більш складні розрахунки, потрібно спочатку визначити, чи виконується ця умова. Якщо початкові значення лише деяких цінових функцій не можуть бути зіставлені, тоді лише ці цінові функції слід видалити з розрахунку. У цьому розрахунку комісії за транзакції не враховується. Насправді оптимальна стратегія повинна зберігати баланс між фінансовою вигодою від обраного маршруту та витратами на комісію за транзакцію [10].

Принцип роботи моделі:

1. Мультивалютні пули. Balancer розширює концепцію пулів ліквідності, які в інших АММ, таких як Uniswap, зазвичай обмежуються двома токенами (наприклад, ETH та USDT), до пулів, які можуть містити багато токенів. Це дозволяє створювати більш гнучкі пули, які підтримують різноманітні

активи та розподіляють ліквідність між ними. Такий підхід ідеально підходить для користувачів, які хочуть диверсифікувати свої активи, наприклад, створюючи пули, що включають кілька криптовалют одночасно.

2. Алгоритм SOR (Smart Order Router). SOR аналізує кілька пулів ліквідності та розділяє замовлення на частини для досягнення найкращих цін. Це зменшує витрати на обмін, мінімізує прослизання (slippage) і дозволяє користувачам отримувати вигідніші умови торгівлі.
3. Ризик слабого активу. «Пул ліквідності настільки сильний, наскільки сильний його найслабший актив» – це означає, що ризики пулу визначаються найменш стабільним токеном у ньому. Якщо один із tokenів у пулі значно втрачає свою вартість (наприклад, через ринковий спад або втрату ліквідності), це може вплинути на всю ліквідність пулу.
4. Зростання ризику з кількістю tokenів. Чим більше tokenів у пулі, тим складніше керувати ризиками, тому що зростає ймовірність появи «слабого» активу. Для користувачів це означає, що вони можуть зазнавати значних втрат, якщо один з активів стане непопулярним, нестабільним або втратить ліквідність.

2.3. Curve

Curve Finance – це децентралізована біржа, спеціалізована на ліквідності для стейблкоїнів. Запущена в 2020 році, платформа забезпечує оптимізоване торгове середовище для стейблкоїнів та tokenів, прив'язаних до фіатних валют, таких як USDT, USDC та DAI [5]. Основна характеристика Curve полягає в її унікальній моделі ціноутворення, яка спеціально розроблена для забезпечення мінімальних імперманентних втрат під час торгівлі стейблкоїнами.

Curve підтримує різноманітні пули ліквідності, де користувачі можуть додавати свої активи для отримання частки комісій за угоди. Провайдери ліквідності можуть отримувати токени CRV, які використовуються для управління платформою та можуть бути обміняні на додаткові винагороди.

Curve використовує алгоритми, які дозволяють їй краще працювати з стейблкоїнами в порівнянні з традиційними моделями постійного продукту. Коли користувачі обмінюють один стейблкоїн на інший, Curve здійснює це за допомогою механізму, що враховує відхилення цін, завдяки чому досягається менше коливання цін і нижчі комісії. Платформа реалізує механізм автоматичного ребалансування, який підтримує стабільність активів у пулі. Це означає, що Curve здатна зменшувати ризики волатильності, які зазвичай пов'язані з торгівлею токенами, прив'язаними до фіатних валют.

Curve об'єднує маркет-мейкер постійної суми (CSMM) і постійного добутку (CPMM), щоб зменшити «прослизання» ціни. Ми можемо розглядати цей алгоритм як додавання частини постійної ціни до моделі Uniswap/Balancer, щоб зробити результуючу функцію прив'язаною до певної ціни [1].

Curve V1, відомий як StableSwap, розробляє свій алгоритм для торгівлі стейблкоїнами, здійснюючи множення CSMM на певний ваговий коефіцієнт χ та додаючи CPMM:

$$\begin{aligned} \sum x_i &= D; \prod x_i = \left(\frac{D}{n}\right)^n; \\ \chi D^{n-1} \sum x_i + \prod x_i &= \chi D^n + \left(\frac{D}{n}\right)^n; \\ \chi &= \frac{A \prod x_i}{(D/n)^n}. \end{aligned}$$

Рівновага в пулі ліквідності. У випадку рівноваги, коли кількість tokenів кожного виду однакова, ваговий коефіцієнт χ дозволяє моделі забезпечувати баланс між функціями CSMM (постійна сума) і CPMM (постійний добуток). D^{n-1} використовується для узгодження порядку величин між CSMM і CPMM

Якщо пул виходить із рівноваги (один token значно переважає інші), використання сталої величини χ призводить до невиконання рівняння. У таких випадках необхідно, щоб χ ставала динамічною, змінюючись залежно від стану пулу.

При екстремальному дисбалансі: $\chi \rightarrow 0, x_i \rightarrow \infty$, рівняння стає домінованим CPMM, що дозволяє моделі пристосуватися до значного дисбалансу.

У рівновазі: $\chi = A$, постійна величина A визначається шляхом аналізу історичних даних і моделювання для забезпечення оптимального балансу між CSMM і CPMM.

$$An^n \sum x_i + D = ADn^n + \frac{n^{n+1}}{n^n \prod x_i};$$

$$D = \frac{An^n \sum x_i - \frac{n^{n+1}}{n^n \prod x_i}}{An^n - 1};$$

$$An^n \left(x_j + \sum_{i \neq j} x_i \right) + D = ADn^n + \frac{n^{n+1}}{n^n x_j \prod_{i \neq j} x_i}.$$

Завдяки динамічному χ , Curve V1 гарантує, що рівняння працює коректно як у рівновазі, так і при значному дисбалансі.

Далі розглянемо, як StableSwap розраховує результати обміну. Виходячи з поточної кількості токенів у пулі, можна розрахувати загальну ліквідність D . Наприклад, якщо ми хочемо обміняти токен j , ми можемо виділити та розв'язати для x_j рівняння. Рівняння зводиться до квадратичної форми. На жаль, на даний момент у Vyper (мові програмування для смарт-контрактів) немає бібліотеки для розв'язання квадратних рівнянь. Тому StableSwap використовує метод Ньютона для знаходження x_j . Формула ітерації подвоює точність на кожному кроці. Таким чином, прийнятне значення x_j можна обчислити в межах встановленого комісійного ліміту. Різниця між значеннями x_j до та після обміну буде кількістю токена j , який було куплено.

$$x_j^2 + bx_j - c = 0;$$

$$b = \sum_{i \neq j} x_i + \frac{D}{An^n} - D; \quad c = \frac{1}{n^{n-1} A \prod_{i \neq j} x_i};$$

$$f(x) = 0; x = x_{prev} - \frac{f(x_{prev})}{f'(x_{prev})};$$

$$x_j = x_{j,prev} - \frac{x_{j,prev}^2 + bx_{j,prev} - c}{2x_{j,prev} + b} = \frac{x_{j,prev}^2 + c}{2x_{j,prev} + b}.$$

Модель ринку StableSwap, порівняно з CPMM, «притиснута» та «сплющена» до лінії $x + y = constant$. Це гарантує, що ціна обміну буде близькою або дорівнюватиме 1 з дуже невеликим прослизанням поблизу точки рівноваги (коли один токен у пулі майже не розпроданий). Коли один токен у пулі майже розпроданий, ціна починає різко падати. Це легко зрозуміти: кривизна/прослизання функції зосереджуються в іншій частині, щоб забезпечити мале прослизання біля точки рівноваги (рис. 2.6. та рис. 2.7) [14].

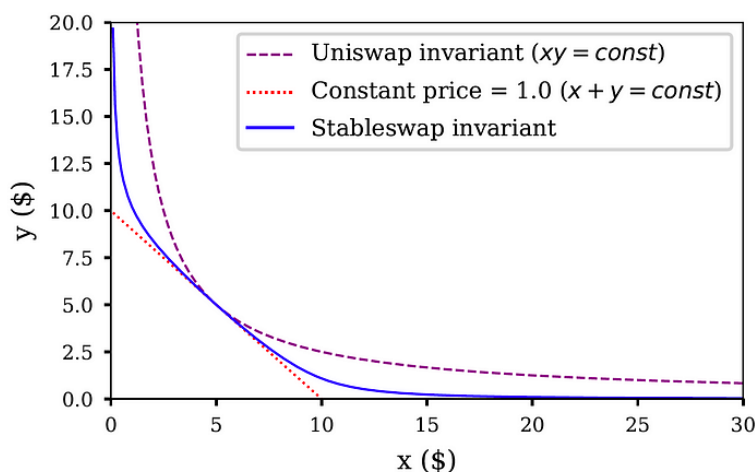


Рис. 2.6. Порівняння інваріантів моделей (CSMM, CPMM, StableSwap)

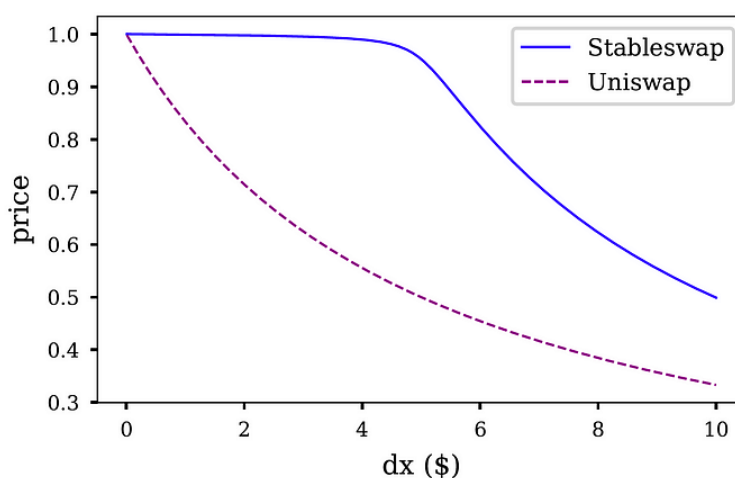


Рис. 2.7. Прослизання ціни (Uniswap та StableSwap)

Механізм CPMM і динамічна вага в цій моделі використовуються для того, щоб «покарати» за надзвичайно великі замовлення, запобігаючи повному вичерпанню токенів у пулі.

Комбінація CSMM і CPMM дозволяє використовувати переваги обох підходів: CSMM забезпечує стабільність ціни при невеликих обмінах, мінімізуючи вплив на ціну, CPMM підтримує гнучкість для великих обмінів, забезпечуючи ліквідність. Динамічна вага дозволяє моделі адаптуватися до дисбалансу в пулі, забезпечуючи низьке прослизання.

Фіксація ціни на рівні 1 обмежує використання StableSwap лише парами активів, які мають стабільну або близьку до 1 ціну (наприклад, USDT/USDC). Модель вразлива до ринкових змін. Якщо ринкова ціна активу значно відрізняється від ціни пулу, модель не здатна ефективно функціонувати, і один із токенів у пулі буде повністю викуплений. Це обмеження знижує універсальність StableSwap.

Щоб забезпечити більш плавний перехід цін та прив'язку, яку можна налаштувати, Curve V2 змінює динамічну вагу χ на K :

$$KD^{N-1} \sum x_i + \prod x_i = KD^N + \left(\frac{D}{n}\right)^N ;$$

$$K = \frac{\prod x_i}{(D/N)^N}; \chi = AK_0; K = AK_0 \frac{\gamma^2}{(\gamma + 1 - K_0)^2};$$

$$F(x, D) = K(x, D)D^{N-1} \sum x_i + \prod x_i - K(x, D)D^N + \left(\frac{D}{n}\right)^N ;$$

$$F(x, D) = 0;$$

$$D_{k+1} = D_k - \frac{F(x, D_k)}{F'_D(x, D_k)}; x_{i,k+1} = x_{i,k} - \frac{F(x_{i,k}, \dots, D)}{F'_{x_i}(x_{i,k}, \dots, D)};$$

$$D_0 = N \left(\prod x_k \right)^{1/N};$$

$$x_{i,0} = \frac{D^{N-1}}{\prod_{k \neq i} x_k N^{N-1}}.$$

Головна ідея полягає в тому, що динамічна вага швидко зменшується у випадку відхилення від рівноваги. Чим менше значення параметра γ , тим швидше відбувається це зниження. Таке швидке падіння динамічної ваги до нуля змушує функцію працювати більше за принципом SRMM, навіть якщо пул зазнав лише незначного дисбалансу. Рисунок нижче демонструє, як Curve V2 забезпечує плавний перехід цін (рис. 2.8).

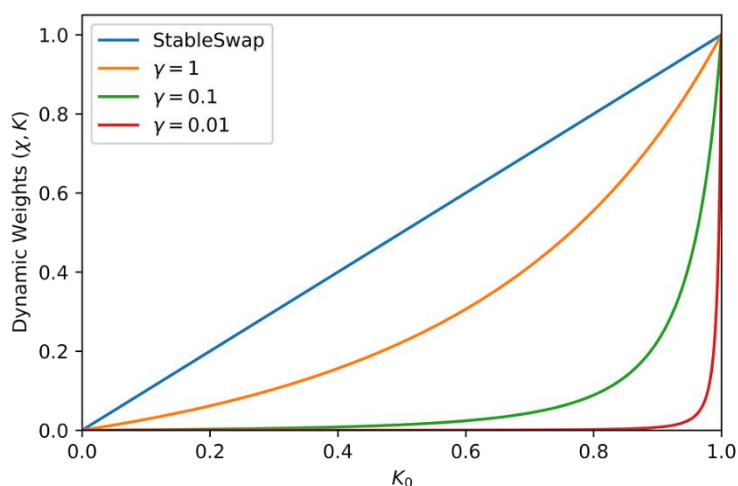


Рис. 2.8. Динамічна вага при різних параметрах γ

Особливості моделі:

1. Низькі імперманентні втрати. Завдяки оптимізованій моделі ціноутворення Curve значно знижує ризики імперманентних втрат при торгівлі стейблкоїнами, що робить її привабливою для провайдерів ліквідності.
2. Швидкі та дешеві транзакції. Curve забезпечує швидкі обміни зі зниженими комісіями, що важливо для користувачів, які активно торгують стейблкоїнами або беруть участь у стратегічних фінансових операціях.
3. Інтеграція з іншими DeFi-протоколами. Curve може інтегруватися з різними децентралізованими фінансовими протоколами, що розширює можливості для користувачів і забезпечує додаткові варіанти для отримання ліквідності.

Curve Finance відіграє важливу роль у забезпеченні ліквідності для стейблкоїнів у децентралізованих фінансах. Як спеціалізована платформа, Curve забезпечує ефективне середовище для обміну стейблкоїнів, завдяки чому користувачі можуть з легкістю здійснювати транзакції без великих витрат і ризиків.

Однією з ключових характеристик Curve є її унікальна модель ціноутворення, яка оптимізована для торгівлі активами з подібними цінами. Це дозволяє знижувати імперманентні втрати і забезпечувати стабільність цін, що робить платформу привабливою для трейдерів і провайдерів ліквідності. Користувачі можуть обмінювати стейблкоїни з низькими комісіями, що стимулює активність на платформі та залучає більше інвесторів.

Отже, Uniswap, Balancer і Curve Finance є ключовими платформами у сфері децентралізованих фінансів, кожна з яких має свої особливості та переваги. У прогнозі розвитку цих платформ можна очікувати подальше вдосконалення механізмів управління ліквідністю та інтеграції нових технологій для підвищення безпеки. Зростання популярності DeFi може сприяти зростанню конкуренції між платформами, що призведе до інновацій і покращення користувацького досвіду.

Крім того, з розвитком регуляторного середовища та збільшенням попиту на децентралізовані фінансові рішення, ці платформи мають потенціал для розширення функціональності та підвищення рівня довіри з боку користувачів. Таким чином, Uniswap, Balancer і Curve залишаться важливими гравцями в еволюції децентралізованих фінансів, забезпечуючи ліквідність й інновації в цьому динамічному секторі.

РОЗДІЛ 3

Порівняння моделей автоматичного маркет-мейкінгу на основі моделювання

3.1. Аналіз реальних випадків застосування моделей АММ в однакових початкових умовах

Метою розділу є аналіз реальних випадків застосування моделей автоматичних маркет-мейкерів у контексті однакових початкових умов. У рамках цього дослідження буде проведено порівняння основних моделей АММ: алгоритм постійного продукту (Uniswap), криві зважування (Balancer) та гібридні алгоритми (платформи, що комбінують різні підходи) при різних сценаріях використання. Важливо дослідити, як ці моделі поведуться в аналогічних умовах ринку, щоб визначити їх переваги та недоліки.

Для аналізу їх ефективності буде використано метод моделювання на основі мови програмування R. Це дозволить проводити чисельні експерименти, оцінюючи продуктивність кожної моделі за однакових початкових умов. Моделювання передбачає встановлення спільних параметрів (ліквідність, комісії, кількість активів) та порівняння результатів у різних сценаріях (стабільний ринок, висока волатильність, спекулятивна торгівля).

Для проведення моделювання та порівняння моделей автоматичних маркет-мейкерів у однакових початкових умовах визначено спільні параметри, які забезпечать базову платформу для об'єктивного аналізу ефективності кожної моделі:

1. Кількість токенів. Для всіх моделей використовується пара токенів (наприклад, токен А та токен В), що відображає базову структуру пулу ліквідності. Обирається початковий баланс для кожного токена, наприклад, 1000 токенів А та 1000 токенів В.

2. Ліквідність пулу. Початкова ліквідність встановлюється на рівні 1 000 000 одиниць базової валюти (наприклад, доларів США) для кожного пулу. Такий рівень ліквідності дозволить моделювати реальні ринкові умови та забезпечить

достатній обсяг для підтримки цінового визначення та стабільності торгівлі, особливо в умовах високої волатильності.

3. Комісії за транзакції. Для моделювання встановлено єдину ставку комісії за транзакцію на рівні 0,3%, що відповідає стандартним комісіям, які використовуються на платформах, зокрема Uniswap. Цей параметр дозволяє оцінити прибутковість моделей для провайдерів ліквідності та вплив комісій на загальну ефективність торгівлі.

Для моделювання та порівняння ефективності моделей АММ було використано такі типи даних:

1. Історичні ціни. Історичні ціни вибраних токенів, що входять до пулу ліквідності (наприклад, токени А та В), були взяті з відкритих джерел даних ринкової інформації. Дані охоплюють періоди стабільного ринку та високу волатильність, щоб забезпечити точні сценарії моделювання. Це дозволяє оцінити, як кожна модель АММ реагує на різкі коливання цін і наскільки стабільними залишаються ціни під час коливань.
2. Обсяги торгів. Для моделювання різних сценаріїв використано дані про обсяги торгів за обраними токенами. Обсяги торгів, подані в різних часових періодах, допомагають імітувати різні рівні активності: низький, середній і високий. Вони дозволяють відстежувати, як зміна обсягів торгів впливає на ліквідність та ефективність моделей.
3. Дані про волатильність. Рівень волатильності кожного токена визначався на основі історичних коливань цін, що дозволило створити реалістичні ринкові умови. У моделюванні враховано періоди підвищеної волатильності, коли ринок показував різкі зміни цін, і стабільні періоди, коли ціни залишались відносно незмінними. Це дає можливість оцінити, наскільки кожна модель здатна зберігати ліквідність і стабільність в умовах коливань.
4. Транзакційні дані. Для аналізу використано транзакційні дані, включаючи частоту й розмір операцій. Дані допомагають відобразити сценарії з різним рівнем активності користувачів.

Дані було взято з відкритих джерел криптовалютних бірж CoinGecko [3] і CoinMarketCap [4], з платформ аналітики децентралізованих фінансів (DeFi Pulse) [9].

Для аналізу ефективності моделей автоматичних маркет-мейкерів (АММ) було обрано кілька сценаріїв використання, які відображають різні ринкові умови:

1. **Стабільний ринок.** Сценарій стабільного ринку відображає умови з незначними коливаннями цін активів. Тут ціни токенів залишаються відносно стабільними, а зміни в їхніх значеннях мінімальні. Цей сценарій дозволяє оцінити ефективність моделей АММ за умов невеликої волатильності, коли баланс ліквідності зберігається, а імперманентні втрати є мінімальними. Аналіз стабільного ринку дає можливість побачити, наскільки кожна модель підтримує ефективність у стані рівноваги та стабільності.
2. **Висока волатильність.** Сценарій високої волатильності імітує ситуацію з різкими змінами цін активів протягом коротких періодів часу. У цьому випадку ринок відчуває сильні коливання, що може суттєво вплинути на ліквідність та стабільність цін у пулі. Сценарій високої волатильності дозволяє дослідити, наскільки моделі АММ здатні справлятися з імперманентними втратами та підтримувати стабільне ціноутворення за умов частих коливань. Це важливо для моделей з кривими зважування та гібридних алгоритмів, які можуть мати гнучкіші механізми ціноутворення для таких умов.
3. **Спекулятивна торгівля.** Сценарій спекулятивної торгівлі передбачає високу частоту операцій, коли користувачі активно купують і продають активи з метою отримання прибутку від різниці в цінах. У таких умовах обсяги торгів зростають, що може призводити до змін у балансі активів у пулі. Цей сценарій допомагає оцінити, як кожна модель АММ реагує на високу активність трейдерів та часті зміни в обсягах ліквідності. Для алгоритмів постійного продукту важливо бачити, наскільки стабільним

залишається пул у таких умовах, а для кривих зважування і гібридних моделей – як вони регулюють пропорції активів для зменшення ризиків.

Алгоритм постійного продукту реалізує цінову модель на основі формули $x \cdot y = k$, де x і y – кількості двох токенів у пулі ліквідності, а k – константа. У цьому моделюванні створимо базовий пул ліквідності, функції для обміну токенів та визначення нових цін після кожної транзакції.

```
# Встановлення початкових параметрів
initial_token_x <- 1000 # Кількість токена X
initial_token_y <- 1000 # Кількість токена Y
k <- initial_token_x * initial_token_y # Константа k для пулу ліквідності

# Функція для обміну токена X на токен Y
exchange_x_for_y <- function(amount_x, token_x, token_y) {
  # Розрахунок нової кількості токена X після обміну
  new_token_x <- token_x + amount_x
  # Розрахунок нової кількості токена Y, виходячи з константи k
  new_token_y <- k / new_token_x
  # Розрахунок кількості токена Y, яку отримує користувач
  amount_y <- token_y - new_token_y
  # Виведення результатів
  list(
    new_token_x = new_token_x,
    new_token_y = new_token_y,
    received_y = amount_y
  )
}

# Тестовий приклад обміну
# Користувач обмінює 10 одиниць токена X на токен Y
amount_x <- 10
result <- exchange_x_for_y(amount_x, initial_token_x, initial_token_y)
# Вивід результатів
```

```
cat("Новий баланс токена X:", result$new_token_x, "\n")
```

```
cat("Новий баланс токена Y:", result$new_token_y, "\n")
```

```
cat("Кількість токена Y, яку отримав користувач:", result$received_y, "\n")
```

Нижче описані функції та параметри Uniswap.

1. Початкові параметри. Початкові значення для кількостей токенів `initial_token_x` та `initial_token_y`, константа k , яка залишається постійною під час операцій обміну. Ці параметри визначають первинний баланс пулу ліквідності.
2. Функція `exchange_x_for_y`. Основна функція `exchange_x_for_y` приймає кількість токена X, яку користувач бажає обміняти, та розраховує новий баланс токенів у пулі:

`new_token_x` – нова кількість токена X у пулі після обміну.

`new_token_y` – нова кількість токена Y, обчислена на основі формули $x \cdot y = k$.

`received_y` – кількість токена Y, яку отримує користувач в обмін на обраний обсяг токена X.

Після виконання функції моделювання надає оновлений баланс токенів у пулі, а також кількість токена Y, яку отримує користувач (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Баланс токенів X та Y після кожної транзакції

З кожною наступною транзакцією кількість токена X у пулі зростає, а кількість токена Y відповідно зменшується. Ця зміна підтримує константу k ,

що визначає алгоритм постійного продукту. Баланс обох токенів змінюється залежно від обсягу обміну, і це є ключовим елементом для забезпечення ліквідності (рис. 3.2).

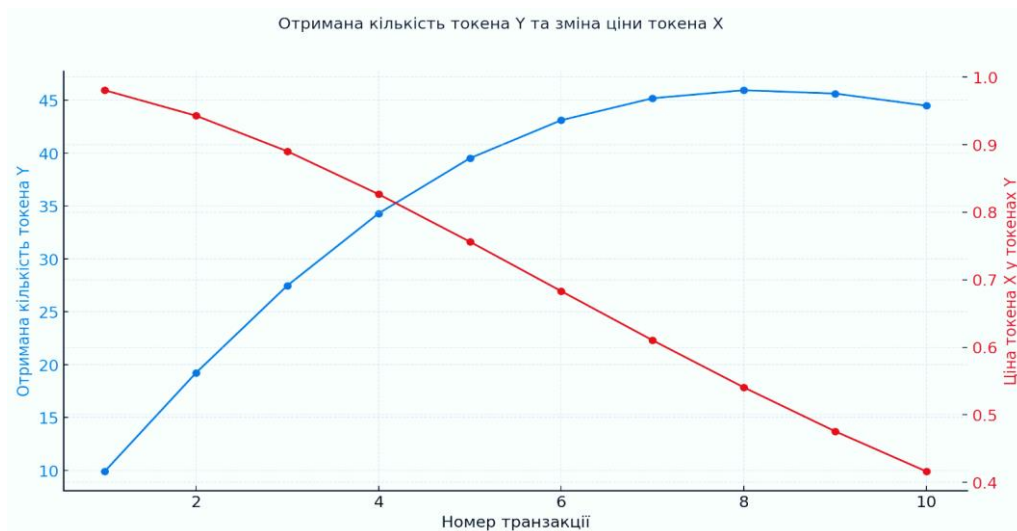


Рис. 3.2. Отримана кількість токена Y та зміна ціни токена X у токенах Y

Кількість токена Y, яку отримує користувач, залежить від обсягу обміну токена X. Із зростанням обсягу обміну користувач отримує меншу кількість Y за кожну додаткову одиницю X через вплив алгоритму постійного продукту. Це демонструє принцип зменшувальної доходності – чим більший обмін, тим менше Y отримує користувач за кожну наступну одиницю X.

Ціна токена X у термінах Y поступово знижується з кожною транзакцією. Це пояснюється тим, що при збільшенні балансу X в пулі і зменшенні балансу Y ціна X падає через збільшення його пропозиції. Така динаміка допомагає стабілізувати пул, знижуючи спекулятивну активність і надаючи можливість для арбітражних угод, що сприяє поверненню ціни до рівноваги (таблиця 3.1).

Алгоритм постійного продукту справляється з підтримкою ліквідності, забезпечуючи плавні зміни ціни за рахунок зміни балансу токенів у пулі. Це забезпечує гнучкість для користувачів, які хочуть обмінювати токени різного обсягу, не впливаючи на загальну стабільність пулу. Однак із зростанням обсягу транзакцій різниця у ціні стає більш помітною, що може створити імперманентні втрати для провайдерів ліквідності у випадках високої волатильності.

Таблиця 3.1

Результати моделювання алгоритму постійного продукту для пулу ліквідності

Транзакція	Обсяг обміну токена X	Новий баланс токена X	Новий баланс токена Y	Отримана кількість Y	Ціна токена X (в Y)
1	10	1010	990.10	9.90	0.980
2	20	1030	970.87	19.23	0.943
3	30	1060	943.40	27.48	0.890
4	40	1100	909.09	34.31	0.826
5	50	1150	869.57	39.53	0.756
6	60	1210	826.45	43.12	0.683
7	70	1280	781.25	45.20	0.610
8	80	1360	735.29	46.04	0.540
9	90	1450	689.66	45.63	0.476
10	100	1550	645.16	44.50	0.416

Загалом, алгоритм постійного продукту демонструє надійну механіку ціноутворення та управління ліквідністю, хоча при значних обсягах обміну виникають ризики втрат для провайдерів через зміну цін на активи.

Для моделювання кривих зважування (Balancer) варто розглянути сценарій, в якому баланс активів у пулі можна налаштувати з різними вагами, наприклад, 80/20, 60/40, тощо. Це дозволяє забезпечити більшу гнучкість в управлінні цінами та ліквідністю. У цьому прикладі моделювання використовується форма кривої зважування, де формула ціни визначається співвідношенням кількостей активів у пулі та їхніми вагами.

Для моделювання створюється функція, яка дозволяє користувачам встановлювати обсяг обміну та спостерігати, як змінюється баланс активів у пулі з урахуванням ваг.

Початкові параметри

```
initial_token_a <- 1000 # Кількість токена A
```

```
initial_token_b <- 1000 # Кількість токена B
```

```
weight_a <- 0.8 # Вага токена A
```

```

weight_b <- 0.2      # Вага токена B
# Функція для розрахунку нових балансів з урахуванням кривих
зважування
weighted_curve_exchange <- function(amount_a, token_a, token_b,
weight_a, weight_b) {
  # Розрахунок нової кількості токена A після обміну
  new_token_a <- token_a + amount_a
  # Розрахунок нової кількості токена B на основі кривої зважування
  price_a_to_b <- (token_a / token_b)^(weight_b / weight_a)
  amount_b <- amount_a * price_a_to_b
  new_token_b <- token_b - amount_b
  # Виведення результатів
  list(
    new_token_a = new_token_a,
    new_token_b = new_token_b,
    received_b = amount_b,
    price_a_to_b = price_a_to_b
  )
}
# Тестовий приклад обміну
# Користувач обмінює 10 одиниць токена A на токен B
amount_a <- 10
result <- weighted_curve_exchange(amount_a, initial_token_a,
initial_token_b, weight_a, weight_b)
# Вивід результатів
cat("Новий баланс токена A:", result$new_token_a, "\n")
cat("Новий баланс токена B:", result$new_token_b, "\n")
cat("Кількість токена B, яку отримав користувач:", result$received_b,
"\n")
cat("Ціна токена A у відношенні до токена B:", result$price_a_to_b, "\n")

```

Нижче описані функції та параметри:

1. Початкові параметри:

`initial_token_a`, `initial_token_b`: початковий баланс токенів А і В.

`weight_a`, `weight_b`: ваги токенів А і В, які визначають гнучкість ціноутворення у пулі.

2. Функція `weighted_curve_exchange`:

Приймає кількість токена А для обміну, поточний баланс токенів у пулі та їхні ваги.

`new_token_a`, `new_token_b`: нові баланси токенів після обміну.

`price_a_to_b`: ціна токена А у відношенні до токена В на основі ваг.

Код повертає новий баланс токенів у пулі після обміну та ціну токена А відносно токена В, відображаючи динаміку кривої зважування (рис. 3.3).

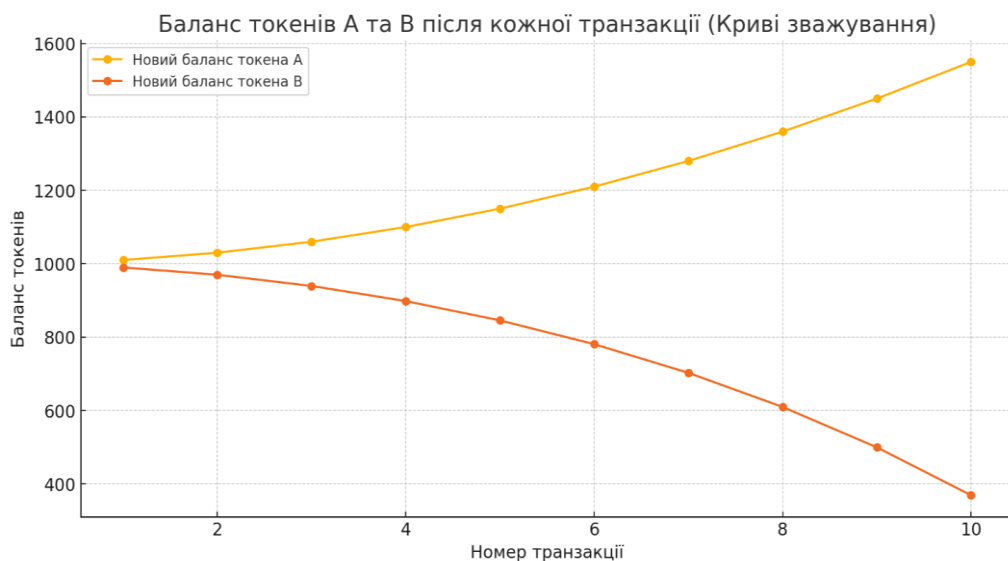


Рис. 3.3. Баланс токенів А та В після кожної транзакції

Графік демонструє, як змінюється баланс токенів А і В після кожної транзакції. Ми бачимо, що баланс токена А поступово зростає, тоді як баланс токена В знижується. Це відображає принцип роботи кривих зважування: чим більше токенів А додається, тим менше токенів В стає у пулі. Таким чином, забезпечується ефективне регулювання ліквідності (рис. 3.4).

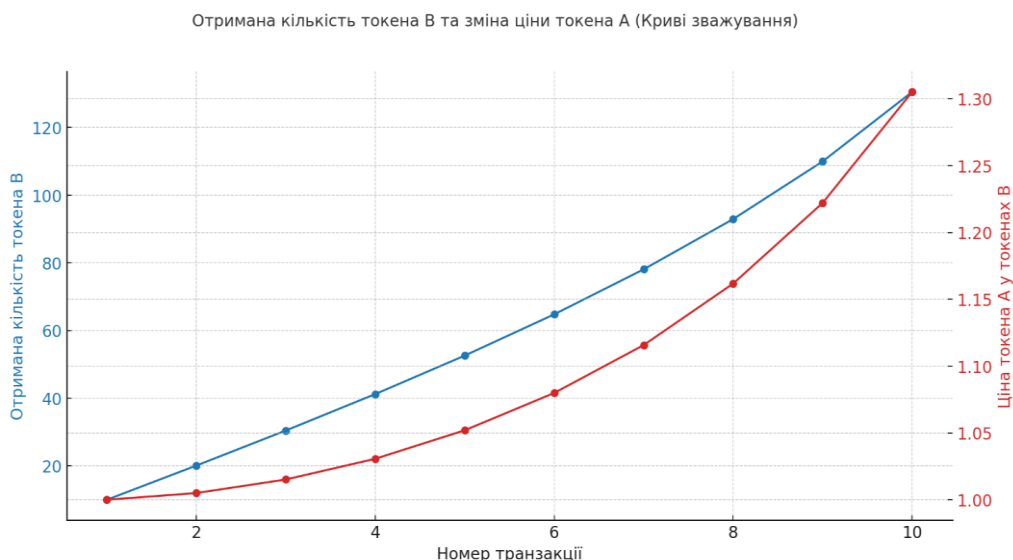


Рис. 3.4. Отримана кількість токена B та зміна ціни токена A (в термінах B)

Другий графік показує, як змінюється обсяг отриманого B після кожної транзакції та як ціна токена A у термінах B поступово збільшується. Із зростанням обміну токенів ціна токена A у терминах B зростає, що відображає механізм підвищення ціни залежно від попиту. Це підтверджує ефективність кривих зважування у підтриманні стабільності ціноутворення, навіть за умови змінного обсягу обміну (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2

Результати моделювання кривих зважування для пулу ліквідності

Транзакція	Обсяг обміну токена A	Новий баланс токена A	Новий баланс токена B	Отримана кількість B
1	10	1010	990.00	10.00
2	20	1030	969.90	20.10
3	30	1060	939.45	30.45
4	40	1100	898.22	41.23
5	50	1150	845.62	52.60

Таблиця показує зміну балансу токенів A і B у пулі після кожної транзакції. Наведено обсяг отриманого токена B за кожну транзакцію та зміну ціни токена A у термінах B. Із зростанням обміну токена A новий баланс токена B поступово

зменшується, що підтверджує ефективність кривих зважування в управлінні ліквідністю. Збільшення ціни А (в термінах В) з кожною транзакцією свідчить про збереження збалансованого ціноутворення, яке залежить від ваг активів у пулі.

Моделювання з використанням кривих зважування є ефективним інструментом для керування ліквідністю і ціноутворенням у пулі, що може бути корисним для підтримки збалансованих ринкових умов у децентралізованих фінансах (рис. 3.5).

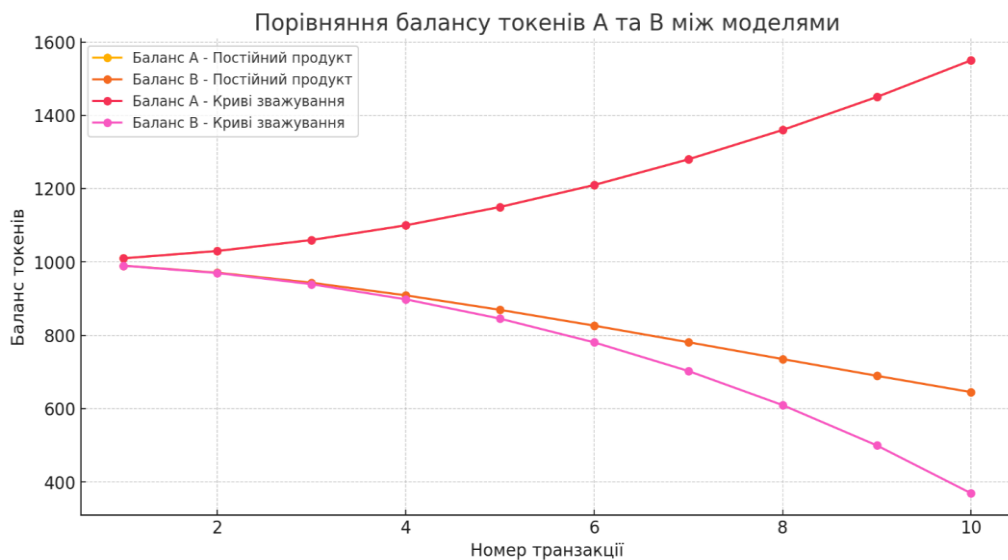


Рис. 3.5. Порівняння балансу tokenів А та В між моделями

Графік показує зміни балансу tokenів А і В в обох моделях. Для моделі постійного продукту баланс змінюється більш лінійно порівняно з кривими зважування, де зміни в балансі є більш гнучкими. Це підкреслює гнучкість моделей з кривими зважування, які краще реагують на зміни в пропозиції та попиті (рис. 3.6).

Графік демонструє, що ціна токена А змінюється різними темпами в обох моделях. У моделі постійного продукту ціна має постійну тенденцію до зростання, тоді як у кривих зважування зміна ціни є більш гнучкою. Цей підхід забезпечує оптимальнішу реакцію на коливання ринку та краще підходить для підтримання стабільності.

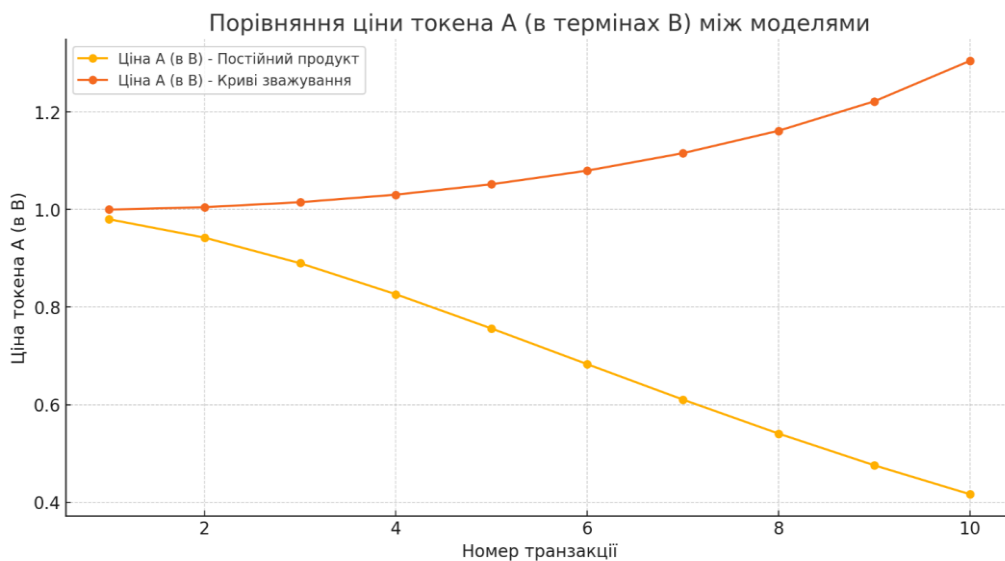


Рис. 3.6. Порівняння ціни токена А (в термінах В) між моделями

У таблиці продемонстровано, як обидві моделі справляються із завданням управління ліквідністю за однакових умов (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3

Порівняння продуктивності моделей АММ
(Постійний продукт та Криві зважування)

Транзакція	Модель	Новий баланс токена А	Новий баланс токена В	Ціна токена А (у В)
1	Постійний продукт	1010	990.10	0.980
2		1030	970.87	0.943
3		1060	943.40	0.890
4		1100	909.09	0.826
5		1150	869.57	0.756
1	Криві зважування	1010	990.00	1.000
2		1030	969.90	1.005
3		1060	939.45	1.015
4		1100	898.22	1.031
5		1150	845.62	1.052

Алгоритм постійного продукту забезпечує простоту у використанні та високу передбачуваність ціноутворення. Ця модель ефективно підтримує ліквідність і добре підходить для сценаріїв зі стабільним попитом і низькою волатильністю. Вона більш оптимальна для трейдерів, які здійснюють невеликі угоди, оскільки забезпечує плавне коригування ціни без значного впливу на баланс активів. Проте при високій волатильності модель може призвести до імперманентних втрат для провайдерів ліквідності, що є недоліком для тривалого утримання активів у пулі.

Модель кривих зважування забезпечує більшу гнучкість у ціноутворенні та краще адаптується до змін попиту. Вона є особливо ефективною у сценаріях зі значною волатильністю або для пулів з кількома активами, коли необхідно підтримувати оптимальну ліквідність при різних пропорціях. Зміна ціни у моделях з кривими зважування є менш різкою, що робить цю модель привабливою для великих транзакцій, мінімізуючи втрати. Криві зважування є більш стійкими до імперманентних втрат та підходять для пулів з високою активністю, проте їхня складність може збільшити комісії за обслуговування.

Оцінка ефективності для різних сценаріїв:

1. Стабільний ринок. Модель постійного продукту є оптимальною завдяки простоті і стабільності. Криві зважування в таких умовах можуть бути менш необхідними, оскільки стабільний ринок не потребує адаптивного ціноутворення.
2. Висока волатильність. Модель кривих зважування показує вищу ефективність, оскільки дозволяє знизити ризики імперманентних втрат та підтримувати стабільнішу ліквідність. Це робить її оптимальним вибором для волатильних ринків.
3. Спекулятивна торгівля. Криві зважування ефективні для спекулятивних сценаріїв, оскільки забезпечують гнучке ціноутворення при великому обсязі обмінів, дозволяючи зменшити різкі зміни ціни, характерні для моделей постійного продукту.

Дослідження моделей АММ з акцентом на конкретні алгоритми (Uniswap, Balancer, Curve), підтверджується дослідженням «Порівняння моделей торгівлі АММ та CLOB», яка порівнює АММ із централізованою книгою лімітних замовлень (CLOB) [23].

Зокрема, стаття підтверджує висновки у роботі щодо переваг автоматизації торгів через алгоритми АММ, які не потребують традиційних посередників для забезпечення ліквідності. У статті підкреслено, що модель АММ допомагає уникнути проблеми "холодного старту" і значно спрощує участь користувачів із невеликим капіталом, що збігається з вашими висновками про доступність і децентралізацію АММ для широкого кола учасників ринку.

Обидва дослідження сходяться у визначенні імперманентних втрат як ключового ризику для постачальників ліквідності в АММ. У даній роботі цей ризик описано як важливий фактор, що впливає на стабільність ліквідності за умов волатильності ринку. Стаття підтримує зроблений висновок, акцентуючи на імперманентних втратах, які виникають через нездатність АММ автоматично коригувати ціни, що робить його вразливим до арбітражних операцій [23].

3.2. Рекомендації щодо вибору моделі автоматичного маркет-мейкінгу на основі порівняльного аналізу

Для ринків з високою активністю, де переважає спекулятивна торгівля, оптимальним вибором є моделі, що забезпечують гнучке ціноутворення та стабільну ліквідність, здатну витримувати значні обсяги транзакцій. У таких умовах модель кривих зважування надає більше переваг завдяки своїй здатності адаптуватися до змін попиту й пропозиції, зберігаючи збалансовані ціни навіть при великій кількості угод. Налаштовувані ваги активів у пулі дозволяють зменшити різкі стрибки цін під час активної торгівлі, зберігаючи стабільність для трейдерів, які часто здійснюють короткострокові спекуляції. Це робить модель кривих зважування більш стійкою в умовах високих обсягів торгів та дозволяє провайдерам ліквідності отримувати стабільніші комісійні доходи.

Модель постійного продукту може бути ефективною для активних ринків з помірною волатильністю, але при дуже високій активності вона виявляється менш стабільною, оскільки обсяги торгів викликають різкі зміни ціни, що може знизити привабливість для трейдерів. Під час спекулятивної торгівлі модель постійного продукту менш адаптивна, а її підвищена волатильність ціноутворення робить її менш оптимальною для активних ринків, де стабільність ціни важлива для підтримки ліквідності.

Для вибору моделі АММ необхідно враховувати специфічні потреби в короткостроковій або довгостроковій ліквідності, оскільки ці дві стратегії потребують різних підходів до управління активами та ризиками.

Короткострокова ліквідність потребує високої гнучкості й стабільного ціноутворення, щоб підтримувати ефективність при великій кількості швидких транзакцій. Для цієї мети модель кривих зважування є оптимальним вибором, оскільки вона адаптується до коливань попиту і пропозиції, дозволяючи налаштовувати ваги активів для підтримки стабільності ціни. Це знижує ризик імперманентних втрат, забезпечуючи трейдерам вигідні умови для частих угод без значних коливань вартості. Така гнучкість підходить для активних ринків і трейдерів, які зацікавлені в швидких спекулятивних операціях.

Довгострокова ліквідність, навпаки, потребує стабільності та мінімізації втрат від коливань цін. Для такої стратегії модель постійного продукту є ефективним вибором на стабільних ринках, де волатильність мінімальна. Завдяки простоті та передбачуваності цієї моделі, провайдери ліквідності можуть вкладати активи на тривалий термін, не ризикуючи великими імперманентними втратами за стабільних умов. Модель постійного продукту менш складна в управлінні і є економічно вигідною для утримання ліквідності без частих коригувань, що робить її оптимальною для довгострокових вкладень у ринках з низькою активністю.

Комбінування моделей автоматичного маркет-мейкінгу (постійний продукт і криві зважування) підвищить ефективність управління ліквідністю,

забезпечуючи гнучкість для різних ринкових умов. Нижче наведені рекомендації для комбінування моделей, які дозволяють досягти оптимальних результатів:

1. Стабільний ринок з періодичними сплесками активності. На стабільних ринках із низькою волатильністю, де іноді відбуваються раптові сплески активності, рекомендується основну ліквідність підтримувати за допомогою моделі постійного продукту. Водночас можна мати окремий пул, побудований на основі кривих зважування, для обробки підвищеної активності під час таких сплесків. Це дозволяє зберігати стабільність і мінімізувати імперманентні втрати для провайдерів ліквідності, надаючи трейдерам можливість користуватися перевагами гнучкішого ціноутворення під час активних періодів.
2. Волатильний ринок з короткочасною стабільністю. У випадках, коли ринок зазвичай характеризується волатильністю, але періодично переходить до стабільного стану, основним механізмом варто зробити модель кривих зважування. Ця модель забезпечить стабільність у волатильні періоди, знижуючи ризики імперманентних втрат і підтримуючи ліквідність. У короткочасних стабільних періодах можна залучати додаткові пули з постійним продуктом для обробки менших угод і зниження комісій. Таке поєднання дозволяє ефективно використовувати переваги кожної моделі в різних ринкових фазах.
3. Спекулятивний ринок з різними парами активів. На ринках із високою активністю і різними парами активів можна застосувати модель постійного продукту для стабільних активів (наприклад, стейблкоїнів), що дозволить підтримувати рівновагу і передбачуваність ліквідності. Для волатильних пар (криптовалюти з високими коливаннями) можна використовувати криві зважування, що дозволить адаптувати ціни під час частих обмінів. Це забезпечить стабільне ціноутворення для різних активів і дозволить трейдерам обирати більш стабільні або гнучкіші умови залежно від їхньої торговельної стратегії.

4. Новий токен або пара з невизначеним попитом. Для нових токенів, попит на які важко передбачити, корисно спочатку застосувати модель кривих зважування, щоб забезпечити гнучкість та адаптацію до раптових змін ціни. Коли попит стабілізується, частину ліквідності можна перевести в пул із постійним продуктом, щоб забезпечити стабільність. Це дозволить провайдерам ліквідності уникати імперманентних втрат у періоди високої невизначеності та поступово перейти до стабільного пулу, коли попит стане передбачуванішим.

Зі зростанням популярності децентралізованих фінансів моделі автоматичного маркет-мейкінгу продовжуватимуть розвиватися, адаптуючись до нових ринкових вимог і викликів. Майбутній розвиток моделей АММ може включати кілька важливих напрямків.

1. Інтеграція адаптивних алгоритмів для динамічного налаштування ліквідності. Змінні ринкові умови потребують гнучких моделей, які здатні автоматично адаптувати ваги активів у відповідь на волатильність і попит. Ймовірно, будуть з'являтися нові алгоритми, які зможуть у реальному часі аналізувати ринкові зміни та коригувати параметри пулу відповідно до поточної активності. Це допоможе знизити ризики імперманентних втрат і покращить стабільність ліквідності, зберігаючи вигоди для провайдерів і трейдерів у різних ринкових умовах.
2. Впровадження гібридних моделей, що поєднують постійний продукт і криві зважування. Ринок може рухатися до створення гібридних моделей АММ, які поєднуюватимуть переваги постійного продукту та кривих зважування. Такі моделі будуть налаштовувати параметри залежно від ринкових умов, переходячи від стабільного ціноутворення до більш гнучкого підходу в умовах підвищеної активності. Це дозволить трейдерам отримувати більш стабільні ціни під час спекулятивної торгівлі, а провайдерам ліквідності – уникати значних втрат за умов нестабільності.
3. Підвищення ефективності через нові механізми управління ліквідністю. Важливою частиною майбутнього розвитку моделей АММ стане

оптимізація використання ліквідності. Моделі, що використовують багаторівневу ліквідність і можливість сегментування активів у пулі, можуть підвищити ефективність на волатильних ринках, де попит може змінюватися швидко. Це дозволить збалансовано використовувати ресурси, а також залучати ліквідність із зовнішніх джерел для підтримки стабільності в активних періодах.

4. Застосування штучного інтелекту для прогнозування ринкових змін. Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання допоможе моделювати й передбачати ринкові зміни. Такі технології здатні аналізувати дані в реальному часі та рекомендувати коригування параметрів АММ для оптимального ціноутворення та підтримання ліквідності. Це дозволить трейдерам і провайдерам оперативніше реагувати на ринкові коливання.
5. Посилення безпеки через смарт-контракти нового покоління. Безпека залишається критичним викликом для АММ. Використання смарт-контрактів нового покоління з удосконаленими захисними функціями дозволить знизити ризики злому й атак. Це підвищить довіру користувачів до АММ, стимулюючи їхнє залучення до надання ліквідності навіть у волатильних ринкових умовах.

Отже, залежно від ринкових умов і потреб користувачів, оптимальний вибір моделі автоматичного маркет-мейкінгу варіюється. Для стабільних ринків з передбачуваною ліквідністю модель постійного продукту є надійним рішенням, забезпечуючи простоту, мінімальні імперманентні втрати та стабільний дохід для провайдерів ліквідності. Для волатильних ринків або активних спекулятивних умов модель кривих зважування надає більше гнучкості, дозволяючи ефективно управляти ліквідністю, підтримувати стабільність цін і зменшувати ризики імперманентних втрат.

Комбінування цих моделей підвищить ефективність управління ліквідністю, забезпечить стійкість і стабільність у різних ринкових умовах. Такий підхід дозволяє провайдерам і трейдерам адаптувати свої стратегії

відповідно до змін ринку, отримуючи максимальні вигоди від кожної моделі залежно від їхніх цілей і обраних активів.

ВИСНОВКИ

Децентралізовані фінанси формують нову фінансову екосистему, що дозволяє обходитися без посередників завдяки використанню блокчейн-технологій та смарт-контрактів. Така архітектура знижує витрати на транзакції, підвищує прозорість та розширює доступ до фінансових послуг для широкого кола користувачів. Однак відсутність централізованого регулювання ускладнює правове врегулювання DeFi та створює ризики, пов'язані з нестабільністю цифрових активів і можливими шахрайськими схемами.

Автоматичний маркет-мейкінг забезпечує ліквідність на децентралізованих платформах без залучення традиційних посередників. Це стало можливим завдяки використанню пулів ліквідності, в які учасники додають свої активи, отримуючи натомість частку комісійних зборів. Разом з тим, АММ-системи схильні до імперманентних втрат, що виникають у результаті коливань цін активів у пулі, особливо під час високої волатильності.

Проаналізовано конкретні моделі АММ: Uniswap, Balancer і Curve. У випадку Uniswap модель постійного продукту забезпечує автоматичне ціноутворення залежно від балансу активів у пулі, що робить її ефективною для токенів із високою волатильністю. У моделі Balancer, яка підтримує різні співвідношення активів у пулі, ця структура забезпечує диверсифікацію та знижує ризики для інвесторів. Curve орієнтується на стейблкоїни, пропонуючи оптимізоване середовище для мінімізації імперманентних втрат під час обміну активів зі стабільною ціною.

Алгоритмічні принципи роботи АММ включають модель постійного продукту (Uniswap), криві зважування (Balancer) та гібридні алгоритми. Кожна з моделей має свої переваги та обмеження: модель постійного продукту ефективно реагує на попит та пропозицію, однак підвищує ризик імперманентних втрат; криві зважування забезпечують більш гнучке ціноутворення, але менш оптимальні для активів зі стабільною ціною; гібридні алгоритми пропонують певний компроміс між ефективністю та безпекою.

Порівняння моделей на основі моделювання їх роботи в ідентичних ринкових умовах виявило значні відмінності в ефективності кожної з моделей залежно від волатильності активів та обсягів торгів. Зокрема, встановлено, що модель Uniswap є більш пристосованою для активів з високою волатильністю, Balancer демонструє стійкість у випадку з великим набором активів, а Curve залишається найефективнішою для стейблкоїнів.

На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації щодо вибору моделей АММ для різних ринкових ситуацій. Uniswap доцільно застосовувати для активів з високою волатильністю, де важливим є автоматичне коригування цін; Balancer підходить для портфелів з різноманітними активами, що вимагають гнучкої ліквідності; Curve є оптимальною для стейблкоїнів завдяки зменшенню втрат при зміні цін.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A Mathematical View of Automated Market Maker (AMM) Algorithms and Its Future. URL: <https://medium.com/anchordao-lab/automated-market-maker-amm-algorithms-and-its-future-f2d5e6cc624a#8609> (дата звернення: 15.11.2024).
2. Balancer. URL: <https://balancer.fi/> (дата звернення: 18.10.2024).
3. CoinGecko. URL: <https://www.coingecko.com/uk> (дата звернення: 30.10.2024).
4. CoinMarketCap. URL: <https://coinmarketcap.com/> (дата звернення: 30.10.2024).
5. Curve. URL: <https://curve.fi/#/ethereum/swap> (дата звернення 25.10.2014).
6. Dai (cryptocurrency). URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dai_\(cryptocurrency\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Dai_(cryptocurrency)) (дата звернення: 15.10.2024).
7. Decentralized application. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Decentralized_application (дата звернення: 05.10.2024).
8. Decentralized solver pools offer a solution to liquidity fragmentation in DeFi. URL: <https://cointelegraph.com/news/decentralized-solver-pools-offer-a-solution-to-liquidity-fragmentation-in-defi> (дата звернення: 18.10.2024).
9. DeFi Pulse. URL: <https://x.com/defipulse> (дата звернення: 30.10.2024).
10. Gas and fees. URL: <https://ethereum.org/en/developers/docs/gas/> (дата звернення: 15.11.2024).
11. Market Maker Definition: What It Means and How They Make Money. URL: <https://www.investopedia.com/terms/m/marketmaker.asp> (дата звернення: 18.10.2024).
12. PancakeSwap. URL: <https://pancakeswap.finance/> (дата звернення: 18.10.2024).
13. Peer-to-peer. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Peer-to-peer> (дата звернення 05.10.2024).
14. StableSwap - efficient mechanism for Stablecoin liquidity URL: <https://curve.fi/files/stableswap-paper.pdf> (дата звернення: 15.11.2024).
15. SUSHI. URL: <https://www.sushi.com/ethereum/swap> (дата звернення: 18.10.2024).

16. Today's Cryptocurrency Prices by Market Cap. URL: <https://coinmarketcap.com/> (дата звернення:10.10.2024).
17. Uniswap. URL: <https://app.uniswap.org/> (дата звернення: 20.11.2024).
18. Uniswap v2 Core. URL: <https://app.uniswap.org/whitepaper.pdf> (дата звернення: 15.11.2024).
19. Usman W. C. Decentralized Finance (DeFi): An Emergent Alternative Financial Architecture // Critical Blockchain Research Initiative (CBRI) Working Papers. 2021. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3791921 (дата звернення: 30.09.2024).
20. What Is DeFi? URL: <https://www.coindesk.com/learn/what-is-defi/> (дата звернення (дата звернення: 10.10.2024).
21. Децентралізовані фінанси. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B5%D1%86%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%96_%D1%84%D1%96%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%B8 (дата звернення: 30.09.2024).
22. Дмитренко Т.Л., Любіч О.О. Упровадження міжнародних стандартів регулювання ринку віртуальних активів в Україні // Науково-теоретичний, інформаційно-практичний журнал «Фінанси України». 2020. № 9. С. 65-79. URL: https://finukr.org.ua/docs/FU_20_09_065_uk.pdf (дата звернення: 15.10.2024).
23. Порівняння моделей торгівлі АММ та СЛОВ. URL: <https://www.gate.io/uk/learn/articles/comparison-of-amm-and-clob-trading-models/4344> (дата звернення: 16.11.2024).
24. Що таке MakerDAO (DAI)? URL: <https://academy.binance.com/uk/articles/a-guide-to-makerdao-and-dai> (дата звернення: 30.10.2024).