

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.46>

УДК 004.41.045:004.056

Структурний аналіз мережі взаємодії смарт-контрактів Ethereum

Трояк Кирило Юрійович¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0464-9313>; kirilltroyak10@gmail.com

Болтънков Віктор Олексійович¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3366-974X>; vaboltentkov@gmail.com. Scopus Author ID: 57203623617

¹⁾ Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Стрімкий розвиток децентралізованих фінансів призвів до появи протоколів, у яких десятки смарт-контрактів взаємодіють через ланцюжки публічних викликів функцій, передавання токенів та звернень до цінних оракулів. Унаслідок цього як аудит безпеки, так і оптимізація витрат на виконання дедалі більшою мірою залежать від розуміння структури цих взаємодій, а не властивостей окремого контракту, розглянутого ізольовано. **Метою роботи** є розроблення та дослідження графової моделі мережі взаємодії смарт-контрактів Ethereum на основі матриці суміжності та визначення її структурних характеристик для формування структурного портрета мережі. У статті застосовано теоретико-графові **методи** для дослідження структури мережі смарт-контрактів, змодельованої на основі протоколу MakerDAO. Мережу представлено двома матрицями суміжності: спрямованою матрицею А, яка відображає фактичну структуру викликів між контрактами, та похідною від неї неспрямованою матрицею В, призначеною для класичного топологічного та спектрального аналізу. Для кожного представлення обчислено компактний набір структурних показників. Набір охоплює чотири групи: базові топологічні показники (густина, вхідний та вихідний ступені), показники зв'язності та відстані (середня довжина найкоротшого шляху, діаметр, коефіцієнт кластеризації), показники центральності (центральність посередництва, центральність близькості та центральність Каца) та спектральні показники (спектральний радіус матриці А і значення Фідлера неспрямованого лапласіана). Результати демонструють розріджену, структурно неглибоку мережу, спрямоване представлення якої є повністю ациклічним. Також виявляється невелика група структурно домінуючих контрактів – насамперед центральний обліковий контракт та посередницький контракт-інтерфейс управління, які поєднують високі значення центральності посередництва й центральності Каца в обох представленнях. Отримані результати характеризують основні структурні властивості мережі та визначають контракти, через які проходить більшість шляхів взаємодії, формуючи структурну основу для наступного етапу дослідження – кооперативної теоретико-ігрової оптимізації маршрутів виконання смарт-контрактів в екосистемах Ethereum. Результатом роботи є побудова моделі, яка була названа структурним портретом мережі взаємодії смарт-контрактів та дає можливість виявляти її особливості.

Ключові слова: взаємодія смарт-контрактів; архітектура мережі смарт-контрактів; графова модель; Ethereum; структурні показники; спрямований граф

Для цитування: Трояк К. Ю., Болтънков В. О. “ Структурний аналіз мережі взаємодії смарт-контрактів Ethereum ”. *Інформатика. Культура. Техніка.* 2026; Том 3 № 2 (4): 613–624. DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.46>

Актуальність. Протоколи децентралізованих фінансів (DeFi) еволюціонували від окремих, самодостатніх контрактів до екосистем із десятків взаємодіючих смарт-контрактів, де одна користувачка операція: погашення позики, голосування в межах управління, ліквідація може ініціювати ланцюжок викликів, що охоплює багато контрактів. Ця зростаюча структурна складність випередила аналітичні інструменти, які традиційно застосовувалися до смарт-контрактів і зосереджувалися переважно на безпеці або витратах газу окремих контрактів і функцій, а не на мережі взаємодій, що їх пов'язує. Водночас низка проблем, центральних для подальшої надійності та ефективності DeFi, визначення пріоритетності аудитів безпеки, з'ясування того, як збій в одному контракті поширюється на інші, та оптимізація виконання транзакцій, що проходять через кілька контрактів, за своєю природою є структурними. Теоретико-графові методи становлять усталену основу для такого аналізу, проте їх систематичне застосування до мереж смарт-контрактів DeFi досі залишається обмеженим. Представлене в статті емпіричне дослідження підтверджує, що ця структура є далекою від довільної: змодельована мережа є розрідженою (густина 7-14 %), а її спрямоване представлення є повністю ациклічним. Водночас невелика кількість контрактів концентрує непропорційно велику частку структурної важливості за кожним обчисленим показником центральності. Структура взаємодії у системах смарт-контрактів недостатньо вивчена, що створює перешкоди для оптимізації.

Огляд літератури. Наявні дослідження з оптимізації смарт-контрактів переважно спрямовані на оцінювання та зменшення витрат газу на рівні окремих смарт-контрактів. У роботі [1] виняток вичерпання газу (out-of-gas exception) розглядається як критичний збій. Робота спрямована на запобігання цьому сценарію шляхом оптимізації використання газу для циклів і структур зберігання даних. Подібним чином дослідження [2] доводить оптимізацію витрат до максимуму як на етапі створення контракту, так і на етапі розгортання. Застосовується широкий спектр методів, таких як вибір найефективніших бібліотек, видалення мертвого коду та оптимальний вибір типів даних. Робота [3] спрямована на виявлення неефективного коду шляхом впровадження інструмента GasChecker, який аналізує байт-код окремих контрактів.

Дослідження смарт-контрактів на рівні мережі є менш поширеними. У роботі [4] розглянуто створення смарт-контрактів та їхню взаємодію між собою й користувачами. Хоча ця робота не спрямована на оптимізацію, вона розкриває взаємодії в масштабі всієї мережі Ethereum шляхом побудови графа викликів і вказує на повторне використання коду як на суттєву загрозу безпеці смарт-контрактів. Дослідження [5] проводить аналіз децентралізованої біржі Uniswap, вивчаючи її централізацію та вразливість за допомогою мережових методів. Цікаво, що попри свою децентралізовану природу, Uniswap демонструє водночас і вразливість до від'єднання вузлів, і централізацію. Отримані значення центральності посередництва та важливості кожного вузла дали змогу авторам визначити смарт-контракти, критично важливі для виконання функції обміну токенів. Робота [6] здійснює аналіз створення, виклику смарт-контрактів і переказів токенів ЕТН у масштабі всієї мережі Ethereum, на основі якого запропоновано нові способи вирішення проблем безпеки. Дані збираються шляхом інструментування клієнта EVM і фіксації транзакцій, що робить аналіз мережі динамічним. Ця робота також торкається питань виявлення аномалій та стійкості до деанонізації. У роботі [7] автори досліджують, як смарт-контракти та криптовалютні біржі впливають на структуру та централізацію мереж транзакцій криптоактивів на основі Ethereum. Для цього вони будують граф, у якому вузлами є адреси Ethereum, а ребрами транзакції токенів. Виявлено, що деякі смарт-контракти мережі є хабами й мають високу важливість. У роботі [8] Ethereum моделюється як складна мережа, вершинами якої є облікові записи Ethereum, а ребрами транзакції. Використовуючи дані історичних транзакцій, автори досліджують низку параметрів, таких як зв'язність, кластеризація, густина мережі та інші, щоб зрозуміти структуру Ethereum. Ця робота демонструє, що Ethereum можна розглядати як складну мережу й аналізувати за допомогою теорії графів. Дослідження [9] є емпіричним дослідженням мережі транзакцій Ethereum на основі графів, метою якого є аналіз поведінки транзакцій, структури спільнот і прогнозування майбутніх зв'язків між адресами. Автори додатково присвоюють транзакціям атрибути, тож вони не є просто незваженими ребрами. Впливові адреси визначаються шляхом аналізу економічних транзакцій. Адреси, пов'язані між собою сильніше за інші, об'єднуються в групи, що демонструє динамічне формування підструктур у мережі Ethereum. У роботі [10] автори досліджують еволюцію мережі Ethereum у часі. Розділяючи транзакції на групи, дослідники окремо відстежують взаємодії за участю адрес, смарт-контрактів і токенів. Автори відстежують зростання мережі та еволюцію ролей важливих вузлів. Можна зробити висновок, що мережі взаємодій Ethereum демонструють складну та суттєву еволюцію в часі.

Підсумовуючи, наявні дослідження з оптимізації смарт-контрактів і наявні дослідження мереж смарт-контрактів залишаються двома розрізненими напрямками роботи. Роботи [1], [2], [3] оптимізують витрати газу на рівні коду окремого контракту без урахування його положення в межах ширшої мережі взаємодій. Роботи [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10] застосовують теоретико-графові та мережево-наукові методи для характеристики мереж у масштабі Ethereum, розкриваючи хабову структуру, централізацію, формування спільнот і часову еволюцію. Проте робиться це на рівні деталізації анонімних облікових записів або адрес і з метою забезпечення безпеки, деанонізації чи структурної характеристики, а не

оптимізації. Жодне з розглянутих досліджень не поєднує ці два напрями: жодна наявна робота не застосовує структурний аналіз на рівні мережі до функціонально відмінних смарт-контрактів одного протоколу, а також не використовує такий аналіз як основу для оптимізації. Ця стаття заповнює цю прогалину, застосовуючи набір топологічних показників, показників зв'язності, центральності та спектральних показників, обчислених для взаємодоповнюваних спрямованого й неспрямованого представлень, до мережі смарт-контрактів. Визначається, які саме контракти є структурно критичними для його виконавчого потоку.

Мета роботи. Розроблення та дослідження графової моделі мережі взаємодії смарт-контрактів Ethereum на основі матриці суміжності та визначення її структурних характеристик для формування структурного портрета мережі.

Формування структурного портрету мережі. На основі графової моделі мережі взаємодії смарт-контрактів було обрано 4 типи структурних характеристик: базові топологічні показники (густина, вхідний/вихідний ступені), показники зв'язності та відстані (середня довжина найкоротшого шляху, діаметр, коефіцієнт кластеризації), показники центральності (центральність посередництва, центральність близькості та центральність Каца), спектральні показники.

Базові топологічні міри. Ці міри дають первинне уявлення про обсяг наявної взаємодії та характер її розподілу. Найпростіші показники це кількість вузлів (N) і кількість ребер (M).

Густина відображає загальний рівень зв'язності відносно того, що є структурно можливим.

Для спрямованого графа:

$$D_{dir} = \frac{M}{N(N-1)}. \quad (1)$$

Для неспрямованого графа:

$$D_{undir} = \frac{2M}{N(N-1)}. \quad (2)$$

Низькі значення густини демонструють розрідженість зв'язків між вузлами. Це означає, що більшість взаємодій здійснюється через невелику кількість ключових контрактів.

Показники зв'язності та відстані. Показники зв'язності та відстані відображають, наскільки ефективно та згуртовано тримається мережа. Довжина шляху та діаметр вказують, скільки переходів розділяють контракти, що безпосередньо пов'язано з латентністю та сукупними витратами газу під час виконання будь-якої багатоконтрактної операції. Коефіцієнт кластеризації показує, чи взаємодіють сусіди контракту також між собою, розрізняючи локально згуртовану структуру від суто ланцюгової чи зіркоподібної.

Середню довжину шляху можна обчислити як:

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}, \quad (3)$$

де d_{ij} – відстань найкоротшого шляху від вузла i до вузла j .

Діаметр визначає максимальну відстань найкоротшого шляху між двома вузлами й обчислюється як:

$$D = \max_{i \neq j} d_{ij}. \quad (4)$$

Коефіцієнт кластеризації, що показує, наскільки тісно пов'язані між собою сусіди вузла, можна обчислити так:

$$C_i = \frac{2T_i}{k_i(k_i - 1)}, \quad (5)$$

де T_i – кількість ребер між сусідами вузла i , а k_i кількість сусідів вузла i .

Коефіцієнт кластеризації всієї мережі можна обчислити як:

$$C = \frac{1}{N} \sum C_i. \quad (6)$$

Центральність вузлів. Цей показник визначає, які окремі контракти мають найбільше структурне значення. Центральність посередництва визначає контракти, що виконують роль структурних посередників. Вона вимірює, як часто вузол з'являється на найкоротшому шляху між іншими вузлами графа. Може бути обчислена як:

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}, \quad (7)$$

де σ_{st} – кількість найкоротших шляхів між вузлами s та t , $\sigma_{st}(v)$ – кількість цих шляхів, які проходять через v .

Центральність близькості відображає структурну близькість вершини до інших вузлів. Це міра мережевої центральності, яка обчислюється як обернена величина суми довжин найкоротших шляхів між вузлом і всіма іншими вузлами графа:

$$C_C(v) = \frac{N-1}{\sum_{u \neq v} d_{vu}}, \quad (8)$$

де d_{vu} – шлях найменшої довжини між вузлами v та u .

Центральність Каца визначає рейтинг «важливості» або «центральності» вузла шляхом підрахунку загальної кількості проходжень (шляхів, які можуть повторно відвідувати вузли), що ведуть до нього з кожного іншого вузла графа, з тією особливістю, що довші проходження мають меншу вагу.

Для успішного обчислення центральності Каца для матриці суміжності A маємо таку вимогу:

$$\alpha < \frac{1}{\lambda_{\max}(A)} = \frac{1}{\rho}(A), \quad (9)$$

де $\lambda_{\max}(A)$ – максимальне власне значення матриці суміжності.

Центральність Каца можна обчислити як:

$$C = (I - \alpha A^T)^{-1} \vec{1}, \quad (10)$$

де C – вектор центральності Каца, одне значення на вузол; I – одинична матриця розміром $n \times n$; α – коефіцієнт згасання, який має задовольняти умову $\alpha < 1/\rho(A^T)$; A^T – транспонована матриця суміжності; $\vec{1}$ – вектор-стовпець довжиною n , кожен елемент якого дорівнює 1.

Спектральні показники. Надають глобальні властивості мережі, які доповнюють теоретико-графові результати. Спектральний радіус відображає структурний потенціал поширення взаємодій через мережу. На нього впливають кількість і розташування ребер, ступені вершин та наявність щільно взаємопов'язаних підструктур. Значення для неспрямованого графа може виявитися корисним, якщо в подальших роботах структура мережі буде змінена, для відстеження впливу таких змін на зв'язність.

Розрахунок структурних параметрів. Розрахунки були виконані з використанням програмного застосунку Gephi, усі доступні у відкритому доступі. Там, де це було доречно, їх обчислювали як для спрямованого, так і для неспрямованого графа мережі.

Результати базових топологічних мір. Кількість вузлів (N): 21 (15 смарт-контрактів і 6 користувачів/оракулів), кількість ребер (M): 30. Відповідно до формул (1-2) густина спрямованого графа мережі: 7 %, для неспрямованого графа: 14 %.

Показники вхідного/вихідного ступенів узагальнено в Таблиці 1 (користувачі/оракули позначені жовтим кольором):

Таблиця 1. Вхідний/вихідний/загальний ступені вузлів моделі

Вузли	Вхідний	Вихідний	Загальний
Ledger	8	0	8
TokenAdapter	2	2	4
Stablecoin (ERC-20)	3	0	3
TokenPrices	1	1	2
StopTimelock	2	1	3
EmergencyStop	1	1	2
GovernanceToken (ERC-20)	1	1	2
VotingContract	3	2	5
VotingTimelock	2	1	3
PollContract	1	0	1
Liquidator	1	2	3
CollateralAuction	2	0	2
YieldRate	1	1	2
InterestRate	1	1	2
InterfaceManager	1	4	5
Stablecoin user	0	2	2
Price feeds	0	1	1
Governance user	0	5	5
Auction user	0	2	2
Automation oracle/User	0	2	2
User	0	1	1

Джерело: розроблено авторами

Можна спостерігати, що вузол Ledger має найвищий загальний ступінь, що й очікувано для центрального хаба. Зовнішні сторони здатні лише ініціювати взаємодії, але не отримувати їх. Вузли VotingContract та InterfaceManager можна визначити як два другорядні хаби з двобічними взаємодіями. Більшість контрактів мають низький загальний ступінь, що демонструє, що більшість вузлів виконують вузьку функцію.

Результати показників зв'язності та відстані. Використовуючи Gephi та застосовуючи формули (3-6) як до орієнтованих, так і до неорієнтованих графів нашої мережі, ми можемо узагальнити результати в Таблиці 2.

Таблиця 2. Показники зв'язності та відстані в мережі

Вимір	Напрявлений	Ненаправлений
Середня довжина шляху	1,566	2,743
Діаметр	4	5
Середній коефіцієнт кластеризації	0,167	0,389

Джерело: розроблено авторами

Коефіцієнти кластеризації для кожного вузла узагальнено в Таблиці 3.

Таблиця 3. Коефіцієнти кластеризації вузлів

Вузли	Спрямований граф	Неспрямований граф
Ledger	0,017857	0,035714
TokenAdapter	0,25	0,5
Stablecoin (ERC-20)	0,333333	0,666667
TokenPrices	0	0
StopTimelock	0,166667	0,333333
EmergencyStop	0	0
GovernanceToken (ERC-20)	0,5	1
VotingContract	0,15	0,3
VotingTimelock	0,166667	0,333333
PollContract	0	0
Liquidator	0,166667	0,333333
CollateralAuction	0,5	1
YieldRate	0	0
InterestRate	0	0
InterfaceManager	0,1	0,2
Stablecoin user	0,5	1
Price feeds	0	0
Governance user	0,15	0,3
Auction user	0,5	1
Automation oracle/User	0	0
User	0	0

Джерело: розроблено авторами

Результати показують, що обидва представлення мережі мають короткі довжини шляхів, що підтверджує, що більшість взаємодій проходить через вузли-хаби. Відмінності в значеннях середнього коефіцієнта кластеризації показують, що за ігнорування напрямків вузли утворюють значно більше локальних трикутників. Є вузли, коефіцієнт кластеризації яких дорівнює 0, що означає, що вони слугують кінцевими точками або компонентами, спеціалізованими на виконанні однієї функції. Можна побачити, що усунення напрямків подвоює значення коефіцієнтів кластеризації для всіх вузлів.

Результати центральності вузлів. Власні значення матриць суміжності для спрямованого та неспрямованого графів можна легко отримати за допомогою бібліотеки Numpy мови Python. Застосовуючи формулу (9) можна знайти, що параметр α бути менше 0.26357492. Тоді візьмемо значення $\alpha = 0.25$. Застосовуючи формули (7, 8, 10) та програмний застосунок Gephi, значення центральності для всіх вузлів у спрямованій формі узагальнено в Таблиці 4.

Щодо центральності посередництва, лише 10 із 21 вузлів мають ненульові значення, що означає, що вони перебувають на найкоротшому шляху між іншими вузлами. VotingContract (10), InterfaceManager (7), StopTimelock (5), VotingTimelock (3) мають значення вищі за одиницю, що підтверджує їхню роль багатоступеневих ретрансляторів (relays). Цікавим є результат для Ledger - 0: попри те, що цей контракт є найчастіше викликаним у мережі, його вихідний ступінь, що дорівнює 0, означає, що з нього нічого не виходить, тому він ніколи не може виступати посередником шляху до третього вузла. Вузли, що представляють зовнішні сторони, мають значення 0, оскільки вони лише виконують виклики функцій, але не приймають їх.

Таблиця 4. Центральність вузлів у спрямованому графі

Вузли	Центральність посередництва	Центральність близькості	Центральність Каца
Ledger	0	0	3,740234
TokenAdapter	1	1	1,5625
Stablecoin (ERC-20)	0	0	1,953125
TokenPrices	1	1	1,25
StopTimelock	5	0,666667	1,71875
EmergencyStop	1	1	1,429688
GovernanceToken (ERC-20)	0	0,454545	1,25
VotingContract	10	0,666667	1,875
VotingTimelock	3	1	1,71875
PollContract	0	0	1,25
Liquidator	1	1	1,25
CollateralAuction	0	0	1,5625
YieldRate	0,5	1	1,25
InterestRate	0,5	1	1,25
InterfaceManager	7	0,636364	1,25
Stablecoin user	0	0,75	1
Price feeds	0	0,666667	1
Governance user	0	0,777778	1
Auction user	0	0,75	1
Automation oracle/User	0	0,75	1
User	0	0,421053	1

Джерело: розроблено авторами

Gephi використовує конвенцію досяжних пар (reachable-pairs), тому на спрямовану центральність близькості впливає структура напрямленого ациклічного графа: показник вузла відображає лише те, наскільки ефективно він досягає того невеликого набору вузлів «за течією», який йому доступний, а не всю мережу загалом. Саме тому кілька контрактів з вузьким діапазоном досяжності «за течією» (TokenAdapter, EmergencyStop, VotingTimelock, Liquidator, YieldRate, InterestRate) досягають максимального значення 1,0, тоді як Ledger отримує 0 просто тому, що, будучи чистим стоком із вихідним ступенем 0, він не досягає жодного вузла взагалі. Цей показник слід трактувати як ефективність локальної досяжності «за течією», а не як глобальну доступність.

Щодо центральності Каца, Ledger домінує з найвищим результатом, за ним ідуть Stablecoin та контракти управління (governance). 6 вузлів, що представляють зовнішні сторони, мають результат 1, оскільки до них не надходить жодного виклику. Цей показник подібний до вхідного ступеня вузлів, оскільки він значною мірою винагороджує виклики, що ведуть до вузла.

Аналогічним чином, значення центральності для всіх вузлів у неспрямованій формі графа мережі узагальнено в Таблиці 5.

Значення центральності посередництва суттєво більші порівняно з їхніми спрямованими відповідниками. Оскільки напрямки ігноруються, багато контрактів стають можливими посередниками між іншими вузлами. Це допомагає виявити потенційні «місткові» (bridging) можливості в мережі, що особливо помітно для вузлів Liquidator, TokenAdapter і навіть Governance user. Останній демонструє потенціал для використання в маршрутизації трафіку, якщо користувача замінити оракулом. Невелика підмножина вузлів зберігає нульові значення, що демонструє їхню кінцеву (endpoint) природу.

Таблиця 5. Центральність вузлів у неспрямованому графі

Вузли	Центральність посередництва	Центральність близькості	Центральність Каца
Ledger	129,666667	0,588235	33,530074
TokenAdapter	20,333333	0,444444	23,176033
Stablecoin (ERC-20)	3	0,357143	16,470019
TokenPrices	19	0,392157	10,274686
StopTimelock	4	0,37037	16,321207
EmergencyStop	9,833333	0,425532	13,46282
GovernanceToken (ERC-20)	0	0,307692	12,955502
VotingContract	26,833333	0,416667	26,045854
VotingTimelock	30,166667	0,454545	21,338021
PollContract	0	0,28169	6,444039
Liquidator	36	0,408163	12,059022
CollateralAuction	0	0,298507	5,353007
YieldRate	9	0,392157	11,008593
InterestRate	9	0,392157	11,008593
InterfaceManager	44,666667	0,5	27,792528
Stablecoin user	0	0,31746	10,911513
Price feeds	0	0,285714	3,568672
Governance user	24	0,384615	21,776156
Auction user	0	0,298507	5,353007
Automation oracle/User	0,5	0,294118	6,504296
User	0	0,338983	7,948132

Джерело: розроблено авторами

Вузли Ledger та InterfaceManager мають найвищі значення центральності близькості для неспрямованої форми графа мережі, що демонструє їхню роль хабів. Різниця між найвищим і найнижчим значеннями є помірною, що показує, що навіть найвіддаленіші вузли перебувають лише за кілька переходів від центральних хабів, що підтверджується значенням діаметра мережі, яке дорівнює 5.

Центральність Каца для неспрямованого графа кардинально змінює розташування вузлів за їхніми значеннями. InterfaceManager отримує другий за величиною результат завдяки своєму вихідному ступеню, що є логічним, оскільки він слугує основним інтерфейсом для взаємодії з мережею. TokenAdapter демонструє подібну поведінку, піднімаючись до 4-го за величиною значення серед вузлів, Ledger зберігає свою домінуючу позицію, проте розрив з іншими значеннями стає значно більшим. Цікаво, що Governance user отримує велике значення завдяки взаємодіям з контрактами голосування, що показує високу важливість управління (governance) для мережі.

Результати оцінювання спектральних характеристик. Для розрахунку спектральних характеристик були використано бібліотеку NumPy мови Python. Так як спрямований граф матриці мережі не має циклів, її спектр буде складатися з нульових значень. Через це було застосовано метод симетризації матриці, де матриця суміжності спрямованого графа A була трансформована як:

$$A_s = \text{sgn}(A + A^T). \quad (14)$$

Отримана симетризована матриця співпадає з матрицею неорієнтованого графа мережі. Спектральний радіус матриці дорівнює 3,793987683216474, Число Фідлера рівне:

$$\lambda_2 = 0.2597656433031838,$$

Отримане число Фідлера демонструє, що, попри зв'язність мережі, її структурна зв'язність є нерівномірною, що підтверджується іншими показниками та розташуванням елементів мережі. У поєднанні зі спектральним радіусом можна стверджувати, що мережа містить нетривіальні глобальні зв'язки за наявності слабкої зв'язності між деякими її ділянками. Таким чином продемонстровано, що створений структурний портрет дозволяє виявити особливості мережі взаємодії смарт-контрактів.

Обговорення результатів моделювання мережі. Проведений структурний аналіз виявляє чітку диференціацію ролей серед вузлів мережі, Ledger постає пасивним, але доміантним хабом: він отримує найбільшу кількість прямих викликів (вхідний ступінь 8) і посідає перше місце за кожним показником центральності (центральність посередництва, центральність близькості та центральність Каца). Проте його вихідний ступінь, що дорівнює 0, робить його структурно «невидимим» у спрямованому графі, де його центральність посередництва та центральність близькості дорівнюють нулю, VotingContract та InterfaceManager, навпаки, є хабами з подвійною структурною роллю. Обидва посідають високі позиції майже за кожним показником як у спрямованому, так і в неспрямованому представленнях. Це свідчить про те, що вони є не лише топологічно центральними, а й несуть навантаження у виконавчому потоці. Решта контрактів, зокрема периферійні вузли з єдиним зв'язком, такі як PollContract, CollateralAuction та Price feeds, посідають периферійні позиції з майже нульовою центральністю за кожним показником, що підтверджує їхню роль виконавців вузьких, самодостатніх функцій, а не посередників взаємодії в межах усієї мережі. На глобальному рівні мережа є розрідженою (густина 7-14 %), її спрямоване представлення утворює спрямований ациклічний граф, що узгоджується з усталеними практиками безпеки смарт-контрактів. Значення Фідлера вказує на те, що мережа є зв'язною, проте її структурна зв'язність є нерівномірною, зі слабшою зв'язністю між деякими її ділянками. Таким чином, попередній аналіз показує, що структурна важливість у цій мережі зосереджена в невеликій кількості конкретних, ідентифікованих контрактів, а не розподілена рівномірно по всій екосистемі.

Висновки. Побудована графова модель дозволяє представити мережу взаємодії смарт-контрактів Ethereum як структурований об'єкт і здійснити її кількісний аналіз. Сукупність визначених структурних показників формує структурний портрет мережі, що дозволяє встановити особливості її зв'язності, локальної організації, розподілу центральності та просторової структури взаємодій. Отримані структурні характеристики створюють основу для подальшого дослідження функціональних властивостей мережі та побудови моделей пошуку оптимальних маршрутів взаємодії між смарт-контрактами з урахуванням вартості та ризику відмови.

Конфлікт інтересів: Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, опубліковані в цій статті

Фінансування: Дослідження проводилося без фінансової підтримки

Доступність даних: код, вхідні дані, параметри і результати доступні у репозиторії:
[https://github.com/ktry1/Smart_contract_structural_analysis]

Використання засобів штучного інтелекту: під час підготовки рукопису використовувався інструмент штучного інтелекту (ШІ) OpenAI GPT-5.6 Sol для граматичної та стилістичної перевірки тексту. Усі фрагменти, опрацьовані за його допомогою, були перевірені й відредаговані автором. ШІ не використовувався для генерації тексту, формул і таблиць, формування наукових положень, отримання результатів або формулювання висновків. Наукові положення, результати та висновки є власним інтелектуальним внеском авторів

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Li, C., “Gas estimation and optimization for smart contracts on Ethereum”. *Proceedings of the 36th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2021)*. Melbourne, Australia: 2021. p. 1082–1086. DOI: <https://doi.org/10.1109/ASE51524.2021.9678932>.
2. Porkodi, S., Kesavaraja, D. “Escalating gas cost optimization in smart contract”. *Wireless Personal Communications*. 2024; 136: 35–59. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11066-7>.
3. Chen, T., et al. “GasChecker: scalable analysis for discovering gas-inefficient smart contracts”. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2021; 9 (3): 1433–1448, <https://www.scopus.com/pages/publications/85081361414>. DOI: <https://doi.org/10.1109/TETC.2020.2979019>.
4. Kiffer, L., Levin, D., Mislove, A. “Analyzing Ethereum's contract topology”. *Proceedings of the Internet Measurement Conference 2018 (IMC '18)*. New York: ACM. 2018. p. 494–499. DOI: <https://doi.org/10.1145/3278532.3278575>.
5. Yan, T., Tessone, C. J. “Network analysis of uniswap: Centralization and fragility in the decentralized exchange market”. *Proceedings of Blockchain Kaigi 2024 (BCK24)*, Physical Society of Japan. 2025. p. 30–46. DOI: <https://doi.org/10.7566/JPSCP.44.011013>.
6. Chen, T., et al. “Understanding Ethereum via Graph analysis”. *ACM Transactions on Internet Technology*. 2020, <https://www.scopus.com/pages/publications/85085484592>. DOI: <https://doi.org/10.1145/3381036>.
7. De Collibus, F. M., et al, “The structural role of smart contracts and exchanges in the centralisation of Ethereum-Based cryptoassets”. *Entropy*. 2022; 24(8): 1048. DOI: <https://doi.org/10.3390/e24081048>.
8. Ferretti, S., D'Angelo, G. “On the Ethereum blockchain structure: A complex networks theory perspective”. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2020; 32 (12): e5493. DOI: <https://doi.org/10.1002/cpe.5493>.
9. Said, A., et al. “Detailed analysis of Ethereum network on transaction behavior, community structure and link prediction”. *PeerJ Computer Science*. 2021; 7: e815. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.815>.
10. Zhao, L., Sen Gupta, S., Khan, A., Luo, R. “Temporal analysis of the entire Ethereum blockchain network”. *Proceedings of the Web Conference 2021 (WWW '21)*. New York: ACM. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3442381.3449916>.
11. “MakerDAO Technical Documentation”. *MakerDAO*. – Available from: <https://github.com/sky-ecosystem/mcd-docs-content>. – [Accessed: 20.09.2026].

Отримано 02.09.2026

Отримано після перегляду 09.10.2026

Прийнято 14.10.2026

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.46>

UDC 004.41.045:004.056

Structural analysis of the Ethereum smart contract interaction network

Kyrylo Y. Troiak¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0464-9313>; kirilltroyak10@gmail.com

Viktor O. Boltentkov¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3366-974X>; vaboltentkov@gmail.com. Scopus Author ID: 57203623617

¹⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The rapid development of decentralized finance has led to the emergence of protocols in which dozens of smart contracts interact through chains of public function calls, token transfers, and price oracle calls. As a result, both security auditing and execution cost optimization increasingly depend on understanding the structure of these interactions, rather than the properties of a single contract considered in isolation. **The aim of the work** is to develop and study a graph model of the Ethereum smart contract interaction network based on the adjacency matrix and determine its structural characteristics to form a structural portrait of the

network. The paper applies graph-theoretic **methods** to study the structure of the smart contract network modeled on the MakerDAO protocol. The network is represented by two adjacency matrices: a directed matrix A, which reflects the actual structure of calls between contracts, and a derived undirected matrix B, intended for classical topological and spectral analysis. A compact set of structural metrics is computed for each representation, The set includes four groups: basic topological metrics (density, input and output degrees), connectivity and distance metrics (average shortest path length, diameter, clustering coefficient), centrality metrics (betweenness centrality, closeness centrality, and Katz centrality), and spectral metrics (spectral radius of the matrix A and Fiedler value of the undirected Laplacian). The results demonstrate a sparse, structurally shallow network, the directed representation of which is completely acyclic. A small group of structurally dominant contracts is also revealed – primarily the central accounting contract and the intermediary contract-management interface, which combine high values of betweenness centrality and Katz centrality in both representations. The results obtained characterize the main structural properties of the network and identify the contracts through which most of the interaction paths pass, forming the structural basis for the next stage of research - cooperative game-theoretic optimization of smart contract execution routes in Ethereum ecosystems. The result of the work is the construction of a model, which was called the structural portrait of the smart contract interaction network and makes it possible to identify its features.

Keywords: Smart contract interaction; smart contract network architecture; graph model; Ethereum; structural indicators; directed graph

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ



Kyrylo Y. Troiak - PhD Student, Department of Information Systems. Odesa Polytechnic National University. 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0464-9313>; kirilltroyak10@gmail.com
Research field: Blockchain technologies; decentralization

Трояк Кирило Юрійович - аспірант кафедри Інформаційних систем. Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна
Галузь досліджень: блокчейн технології



Viktor O. Boltanov - PhD, Associate Professor, Information System Department. Odesa Polytechnic National University. 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3366-974X>; vaboltanov@gmail.com, Scopus Author ID: 57203623617
Research field: blockchain technologies; signal processing

Болтънков Віктор Олексійович - кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційних систем. Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна
Галузь досліджень: блокчейн технології; обробка сигналів