

С. В. ЖЕБКА, аспірант;

ORCID: 0009-0007-4620-9888

М. В. КУКЛІНСЬКИЙ канд. техн. наук, доцент,

ORCID: 0000-0002-2028-9206

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

АДАПТОВАНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ DLT-ПЛАТФОРМ НА ОСНОВІ СТАНДАРТУ ISO/IEC 25010

У статті запропоновано розширену модель оцінювання якості платформ технології розподіленого реєстру DLT-QM, побудовану на основі стандарту ISO/IEC 25010 з урахуванням специфіки децентралізованих систем та blockchain-систем. Необхідність розроблення такої моделі обумовлена стрімким розвитком цифрових технологій, широким впровадженням DLT-платформ у фінансовому секторі, державному управлінні, логістиці, IoT-середовищах та корпоративних інформаційних системах, а також відсутністю універсального підходу до комплексного оцінювання їх якості. У роботі проведено аналіз придатності характеристик ISO/IEC 25010 до оцінювання архітектури програмних систем на основі DLT та визначено набір DLT-специфічних характеристик, що враховують особливості механізмів консенсусу, рівень децентралізації, фінальність транзакцій, модель довіри, аудитор придатність, міжмережеву сумісність та баланс on-chain/off-chain взаємодії. Для кожної характеристики запропоновано формалізовані математичні метрики, що дозволяють здійснювати багатокритеріальне оцінювання DLT-платформ у межах задач програмної інженерії та оптимізації вибору технологічної архітектури. Інтегральний показник якості QDLT визначається як зважена комбінація класичних характеристик ISO/IEC 25010 та DLT-специфічної компоненти, що забезпечує адаптацію моделі до різних прикладних сценаріїв. Верифікацію моделі виконано на платформах Hyperledger Fabric, Ethereum, Corda та Polygon. Отримані результати підтверджують наявність структурних компромісів між децентралізацією, продуктивністю, безпекою та сумісністю в сучасних розподілених системах. Також розроблено методологію сценарно-орієнтованого застосування моделі, яка включає процедуру визначення вагових коефіцієнтів для різних сфер використання DLT-технологій, зокрема фінансових консорціумів, систем електронного урядування та IoT supply chain. Практична цінність дослідження полягає у створенні формалізованого інструментарію підтримки прийняття рішень при виборі DLT-платформи для побудови сучасного програмного забезпечення та цифрових сервісів.

Ключові слова: блокчейн, технологія розподіленого реєстру, DLT-платформи, децентралізована система, розподілена система, інформаційні технології, цифрова технологія, програмне забезпечення.

Вступ

Розвиток технологій розподіленого реєстру (Distributed Ledger Technology, DLT) відкриває нові можливості для побудови децентралізованих систем у фінансовому секторі, державному управлінні, логістиці та ін. Ринок DLT-рішень демонструє значну архітектурну варіативність: від публічних мереж з відкритою участю (Ethereum, Polygon) до консорціумних систем з керованим доступом (Hyperledger Fabric) та приватних корпоративних рішень (Corda). За оцінками Gartner, до 2027 року понад 30 % підприємств впровадять DLT-технології в критичних бізнес-процесах [17], що загострює потребу в обґрунтованому виборі платформи.

Попри значний практичний інтерес, питання системного оцінювання якості DLT-платформ залишається недостатньо дослідженим. Існуючий стандарт ISO/IEC 25010 [6] формує загальну основу оцінювання якості програмного забезпечення, однак не враховує специфічних

атрибутів DLT-архітектур: децентралізованого консенсусу, моделі довіри та балансу обробки даних у мережі та поза нею. Без формалізованого інструментарію порівняння вибір DLT-платформи здійснюється переважно евристично, що підвищує ризики при прийнятті архітектурних рішень.

У запропонованому дослідженні розроблено адаптовану модель DLT-QM, що усуває зазначені прогалини через розширення ISO/IEC 25010 додатковими DLT-специфічними характеристиками. Практична значущість роботи полягає у наданні інструментарію вибору DLT-платформи за кількісними критеріями, відповідно до конкретного прикладного сценарію.

Постановка задачі

Задачу дослідження сформульовано таким чином:

1. Проаналізувати придатність характеристик ISO/IEC 25010 до оцінювання DLT-платформ.
2. Визначити множину DLT-специфічних характеристик якості, що відображають природу розподіленого реєстру.
3. Розробити ієрархічну модель якості з формалізованими метриками для кожної характеристики.
4. Верифікувати модель на репрезентативному наборі платформ.
5. Розробити методологію сценарно-орієнтованого застосування моделі.

Обмеження роботи: оцінювання базується на відкритих технічних специфікаціях і результатах опублікованих бенчмаркінгових досліджень; суб'єктивні оцінки (анкетування розробників) виходять за рамки поточного дослідження. Значення метрик, отримані для чотирьох платформ, слід розглядати як ілюстративні; для продуктивного застосування моделі потрібне верифіковане вимірювання на конкретних розгортаннях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Технології розподіленого реєстру (DLT) активно досліджуються у контексті безпеки, децентралізації та масштабованості інформаційних систем. Базові принципи функціонування блокчейн-мереж описані у роботі Wright [8], а загальний огляд технології та її властивостей наведено у дослідженні Yaga et al. [9]. Особливості блокчейн-протоколів і механізмів консенсусу розглядаються у роботі Bashir [2], тоді як George [3] аналізує архітектуру платформи Hyperledger Fabric та її практичне застосування.

Значна увага приділяється використанню смарт-контрактів і забезпеченню безпеки DLT-систем. Bartoletti [1] досліджує проблеми реалізації та перевірки смарт-контрактів, а Singh, Goyal та Dixit [6] демонструють їх застосування у децентралізованих системах голосування. Питання захисту даних у хмарних середовищах на основі блокчейну розглядаються у роботі Kasthuri [5], а проблеми масштабованості блокчейн-платформ — у дослідженні Zhou et al. [10].

Методологічні аспекти оцінювання якості програмних систем висвітлено у працях Hamilton, Nash та Pooch [4] і Walkinshaw [7]. Водночас аналіз наукових джерел показує, що питання комплексного оцінювання якості DLT-платформ на основі стандарту ISO/IEC 25010 залишаються недостатньо дослідженими. Це підтверджує актуальність розроблення адаптованої моделі оцінювання якості DLT-платформ з урахуванням специфіки технологій розподіленого реєстру.

Мета дослідження

Метою роботи є розробка формалізованої ієрархічної моделі оцінювання якості DLT-платформ DLT-QM, що розширює ISO/IEC 25010 DLT-специфічними характеристиками з формалізованими математичними метриками, а також методології її застосування для підтримки прийняття рішень при виборі платформи в конкретних прикладних сценаріях.

Результати дослідження

Аналіз застосовності ISO/IEC 25010 до DLT-платформ

Стандарт ISO/IEC 25010 [6] визначає вісім базових характеристик якості програмного забезпечення. Ми провели систематичний аналіз придатності кожної з них до оцінювання DLT-платформ. Встановлено, що шість характеристик є прямо застосовними – з уточненою інтерпретацією для розподіленого контексту: функціональна придатність (здатність виконувати операції з реєстром), ефективність виконання (пропускна здатність, затримка підтвердження), сумісність (взаємодія між вузлами і мережами), надійність (стійкість до відмов вузлів), захищеність (криптографічний захист і контроль доступу), зручність супроводу (оновлення протоколу, управління конфігурацією).

Водночас ISO/IEC 25010 не охоплює три властивості, принципово важливі для DLT: децентралізація, специфіка механізмів консенсусу, баланс між обробкою транзакцій у мережі (on-chain) та поза нею (off-chain).

Визначення DLT-специфічних характеристик якості

На підставі аналізу технічних специфікацій [1]–[5] та огляду наукової літератури [7]–[14] ми визначили сім DLT-специфічних характеристик якості, що утворюють розширення ISO/IEC 25010. Їх зміст наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

DLT-специфічні характеристики моделі DLT-QM

Позначення	Назва	Визначення
Dd	Децентралізація	Ступінь розподілу управління та обробки між вузлами мережі
Cr	Надійність консенсусу	Ймовірність досягнення консенсусу за умов відмов або зловмисних вузлів
Ft	Фінальність транзакцій	Ступінь незворотності підтверджених транзакцій
A	Аудитопридатність	Здатність до верифікованого відтворення історії транзакцій
Tm	Модель довіри	Рівень децентралізації механізму встановлення довіри між учасниками
Ix	Сумісність DLT	Здатність до взаємодії з іншими DLT-мережами та зовнішніми системами
Woc	Баланс on/off-chain	Ефективність розподілу обробки даних між мережею і зовнішніми рівнями

Формалізація метрик DLT-QM

Для формалізації характеристик DLT-платформ у межах запропонованої моделі визначено систему інтегральних метрик, які описують ключові властивості distributed ledger environment.

Рівень децентралізації D визначається через поєднання показників розподілу ресурсів мережі, кількості незалежних вузлів та географічної диверсифікації інфраструктури:

$$D = \alpha(1 - G) + \beta \frac{N}{N_{ref}} + \gamma G_{geo}, \quad (1) \text{Введіть тут рівняння.}$$

де G – коефіцієнт Джині для розподілу стейку або хешрейту, N – кількість незалежних вузлів мережі; N_{ref} – референтне значення кількості вузлів, G_{geo} – коефіцієнт географічного розподілу, α, β, γ – вагові коефіцієнти, для яких виконується умова:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1. \quad (2)$$

Надійність консенсусного механізму C оцінюється як функція імовірності успішного досягнення консенсусу та ймовірності виникнення fork-подій:

$$C = P_{cons}(1 - P_{fork}), \quad (3)$$

де P_{cons} – імовірність досягнення консенсусу, P_{fork} – імовірність реорганізації blockchain-ланцюга.

Для deterministic consensus protocols показник фінальності транзакцій визначається співвідношенням між фактичним та референтним часом підтвердження:

$$F_d = \frac{1}{1 + \frac{T_{fin}}{T_{ref}}}, \quad (4)$$

де T_{fin} – середній час підтвердження транзакції, T_{ref} – референтний час підтвердження.

Для probabilistic consensus protocols фінальність транзакцій визначається через імовірність відсутності реорганізації після підтвердження k блоків:

$$F_p = 1 - P_{reorg}(k), \quad (5)$$

де $P_{reorg}(k)$ – імовірність реорганізації blockchain після k підтверджень.

Інтегральний показник фінальності визначається як:

$$F = \omega_d F_d + \omega_p F_p, \quad (6)$$

де $\omega_d + \omega_p = 1$.

Показник аудитопритатності Авраховує частку перевірених транзакцій, імовірність несанкціонованої модифікації даних та повноту журналювання подій:

$$A = \frac{N_{aud}}{N_{tot}} (1 - P_{tam}) V_{aud}, \quad (7)$$

де N_{aud} – кількість перевірених транзакцій, N_{tot} – загальна кількість транзакцій, P_{tam} – імовірність компрометації даних, V_{aud} – коефіцієнт повноти аудиту.

Модель довіри T формується як зважене поєднання характеристик відкритих та permissioned blockchain-середовищ:

$$T = (1 - \phi) T_{open} + \phi T_{perm}, \quad (8)$$

де ϕ – частка permissioned-взаємодій у системі.

Рівень міжмережевої сумісності I визначається через інтегральну оцінку параметрів interoperability:

$$I = \sum_{i=1}^m w_i s_i, \quad (9)$$

де s_i – окремі характеристики сумісності, w_i – вагові коефіцієнти.

Баланс on-chain/off-chain взаємодії визначається як:

$$B = \rho C_v + (1 - \rho) V_{off}, \quad (10)$$

де ρ – частка on-chain операцій, C_v – ефективність on-chain верифікації, V_{off} – ефективність off-chain обробки.

Інтегральний показник якості DLT-платформи визначається як:

$$Q = \lambda Q_{ISO} + (1 - \lambda) Q_{DLT}, \quad (11)$$

де Q_{ISO} – оцінка за характеристиками ISO/IEC 25010, Q_{DLT} – оцінка DLT-специфічних характеристик, $\lambda \in [0; 1]$ – коефіцієнт балансування.

DLT-специфічна компонента моделі визначається як:

$$Q_{DLT} = \sum_{i=1}^n w_i q_i, \quad (12)$$

де q_i – нормалізовані значення характеристик DLT-платформи, w_i – вагові коефіцієнти критеріїв.

Методологія застосування моделі DLT-QM

У межах запропонованого нами підходу процедуру оцінювання якості DLT-платформи структуровано як шестикроковий алгоритм. Це забезпечує відтворюваність результатів і дозволяє особам, що приймають рішення, адаптувати модель до специфіки конкретного впровадження.

Крок 1. Визначення прикладного сценарію. Аналітик ідентифікує тип задачі (фінансові розрахунки, реєстрація активів, управління ланцюгом постачань тощо) та характеристики середовища: кількість учасників, вимоги до приватності, регуляторні обмеження.

Крок 2. Встановлення вагових коефіцієнтів w_i . Виходячи зі специфіки сценарію, аналітик призначає ваги семи DLT-специфічним характеристикам (табл. 2). Суму ваг нормовано до одиниці. Рекомендовані діапазони для типових сценаріїв наведено нижче.

Крок 3. Вимірювання або оцінка значень q_i . Значення кожного атрибуту визначаються на основі: (а) технічних специфікацій платформи; (б) результатів бенчмаркінгових тестів [15, 16]; (в) аналізу метаданих мережі (Gini-коефіцієнт розподілу стейку, кількість активних вузлів). Всі значення нормовані до відрізка $[0; 1]$, де 1 відповідає найвищій якості.

Крок 4. Розрахунок $QDLT_{spec}$ за формулою (11). Крок 5. Розрахунок інтегрального показника $QDLT$ за формулою (10) із встановленими w_{ISO} та w_{DLT} . Крок 6. Ранжування альтернатив за спаданням $QDLT$. При рівності показників перевага надається платформі з вищим значенням пріоритетної для сценарію характеристики.

Таблицю 3 складено нами на основі аналізу вимог трьох типових сценаріїв. Порівняльна значущість характеристик відображає архітектурні пріоритети кожного контексту застосування (табл. 2).

Таблиця 2

Рекомендовані вагові коефіцієнти для типових сценаріїв

Показник	Фінансовий консорціум	е-Урядування	IoT Supply Chain
Dd	0,10	0,10	0,15
Cr	0,25	0,20	0,20
Ft	0,20	0,25	0,15
A	0,15	0,25	0,15
Tm	0,15	0,10	0,10
Ix	0,10	0,05	0,15
Woc	0,05	0,05	0,10
Σ	1,00	1,00	1,00

Встановлення вагового коефіцієнта $w_{Cr} = 0,25$ як домінуючого параметра для фінансового сценарію зумовлене критичною роллю механізму консенсусу у забезпеченні завершеності та незворотності міжбанківських транзакцій, оскільки порушення узгодженості станів розподіленого реєстру або виникнення fork-подій у платіжних системах може спричинити прямі фінансові збитки, затримки виконання операцій та втрату довіри до інфраструктури розрахунків. Для сценаріїв IoT supply chain, навпаки, пріоритетність показника сумісності $w_{Ix} = 0,15$ визначається необхідністю підтримки взаємодії між великою кількістю гетерогенних пристроїв, сенсорних мереж, периферійних вузлів та зовнішніх інформаційних систем, що функціонують у різномірних програмно-апаратних середовищах і потребують стандартизованого та масштабованого механізму обміну даними.

Аналіз архітектурних компромісів у DLT-системах

Фундаментальне обмеження DLT-платформ полягає у неможливості одночасно максимізувати децентралізацію, продуктивність і безпеку – три основні виміри якості, що перебувають у стані структурного компромісу. Цей феномен є DLT-аналогом теореми CAP [14] і безпосередньо відображається у значеннях Dd, Cr, Ft.

Ethereum демонструє максимальне значення $Dd=0,91$ серед аналізованих платформ, що досягається за рахунок відкритої участі тисяч незалежних вузлів. Водночас фінальність транзакцій $Ft=0,72$ є найнижчою в наборі: в умовах імовірнісного консенсусу PoS гарантована незворотність транзакції потребує очікування кількох десятків блоків. Corda демонструє протилежне: висока фінальність $Ft=0,97$ забезпечується детермінованим нотаріальним протоколом, але децентралізація $Dd=0,34$ є мінімальною – архітектура передбачає відомі учасники та централізованих нотаріусів.

Проведений аналіз демонструє, що розташування DLT-платформи у просторі компромісу «децентралізація–продуктивність–безпека» визначається насамперед особливостями її базової архітектури, а не параметрами поточного налаштування чи конфігурації мережі. Зокрема, платформи Polygon та Hyperledger Fabric займають проміжні позиції між повністю публічними та контрольованими distributed ledger-системами, реалізуючи різні підходи до досягнення балансу між масштабованістю, швидкістю та рівнем децентралізації. Архітектура Polygon базується на використанні Layer 2 механізмів і делегованого Proof-of-Stake, що дозволяє зменшити затримки підтвердження транзакцій та підвищити пропускну здатність мережі при збереженні достатнього рівня децентралізації. Hyperledger Fabric, своєю чергою, реалізує модель контрольованої децентралізації через систему конфігурованих каналів, механізмів endorsement policy та розмежування ролей учасників мережі, що забезпечує високу продуктивність і керованість у permissioned-середовищах. Отримані результати підтверджують, що запропонована модель DLT-QM адекватно відображає реальні архітектурні відмінності між платформами шляхом використання формалізованих кількісних метрик.

Практичні результати дослідження свідчать про відсутність універсальної DLT-платформи, здатної одночасно забезпечити максимальні значення всіх семи характеристик якості. У зв'язку з цим задача вибору платформи повинна розглядатися як задача багатокритеріальної оптимізації, у межах якої вагові коефіцієнти w_i формуються відповідно до функціональних, організаційних та технологічних вимог конкретного прикладного сценарію використання distributed ledger technology.

Порівняльний аналіз DLT-платформ

Для верифікації моделі ми застосували DLT-QM до чотирьох репрезентативних платформ, що охоплюють основні архітектурні класи: публічна блокчейн (Ethereum), консорціумна DLT (Hyperledger Fabric), приватна enterprise-платформа (Corda) та гібридна Layer 2 мережа (Polygon). Значення метрик отримано на основі технічних специфікацій [1]–[5] та результатів бенчмаркінгу [15, 16] (табл. 3).

Таблиця 3

Значення метрик DLT-QM для чотирьох платформ

Показник	Hyperledger Fabric	Ethereum	Corda	Polygon
Dd	0,62	0,91	0,34	0,78
Cr	0,85	0,74	0,89	0,81
Ft	0,94	0,72	0,97	0,88
A	0,93	0,88	0,91	0,82
Tm	0,45	0,93	0,51	0,76
Ix	0,71	0,86	0,38	0,84
Woc	0,67	0,79	0,82	0,88

Аналіз даних табл. 3 виявляє кілька закономірностей. Corda вирізняється найвищими значеннями Ft (0.97) та Cr (0.89) завдяки детермінованому нотаріальному консенсусу – перевага, характерна для enterprise-платформ з відомими учасниками. Однак показник Ix=0.38 є критично низьким: архітектура Corda не передбачає стандартизованих протоколів взаємодії з іншими DLT-мережами [4], що суттєво обмежує застосовність у сценаріях міжплатформної взаємодії.

Ethereum демонструє найвищу децентралізацію Dd=0.91 та модель довіри Tm=0.93, що є наслідком публічного доступу до мережі та відсутності привілейованих учасників. Водночас фінальність Ft=0.72 є відносно нижчою: після переходу на PoS гарантована фінальність (через механізм checkpoint) потребує приблизно 12–15 хвилин, що є прийнятним не для всіх додатків реального часу.

Polygon та Hyperledger Fabric займають проміжне положення. Polygon демонструє збалансований профіль якості завдяки Layer 2 архітектурі: висока Dd (0.78) поєднується з конкурентними Ft (0.88) та Ix (0.84). Hyperledger Fabric забезпечує найвищу аудитопритатність A=0.93

серед усіх платформ, що є критично важливим для регульованих галузей – фінансів та охорони здоров'я.

Архітектурні профілі платформ наочно відображено на рис. 1.

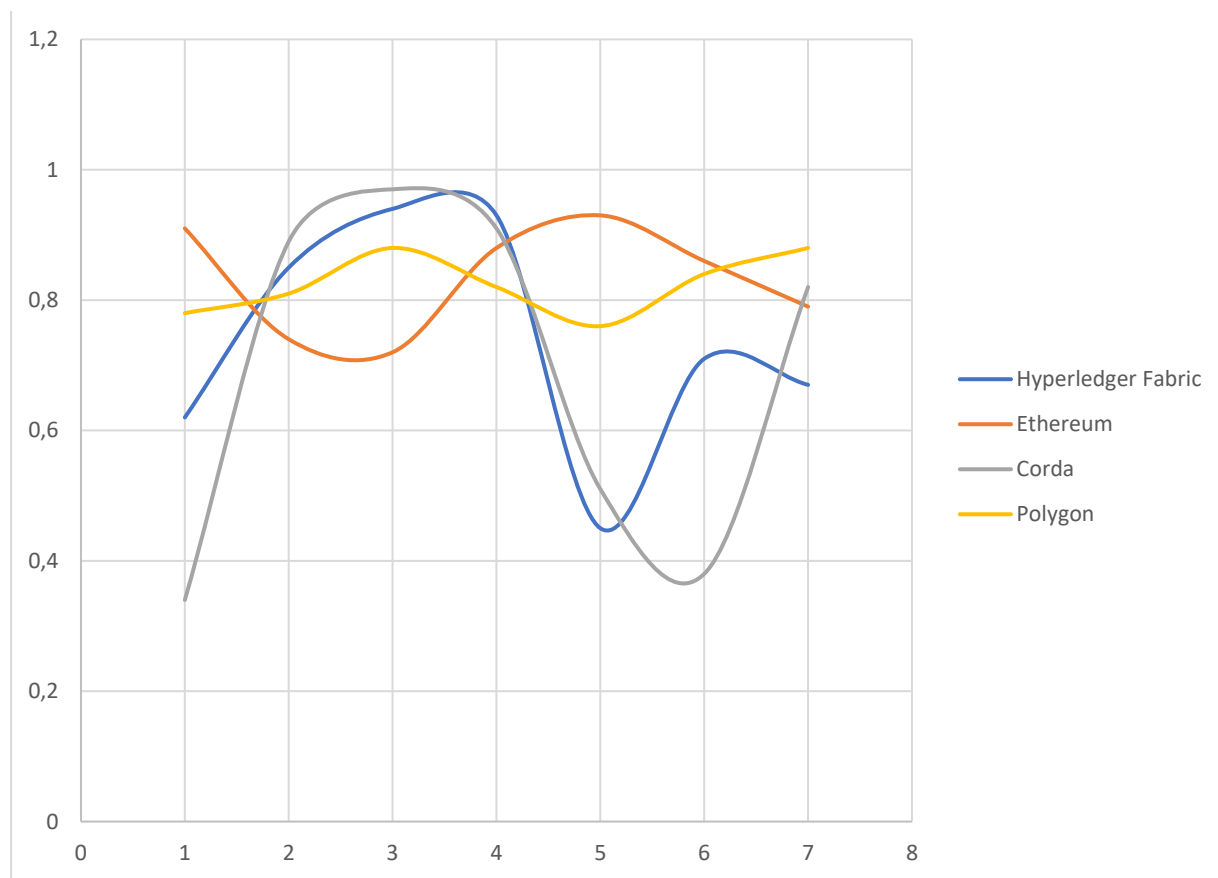


Рис. 1. Архітектурні профілі DLT-платформ за показниками моделі DLT-QM

Практичне застосування: три сценарії

Для демонстрації методології ми застосували модель DLT-QM до трьох типових прикладних сценаріїв, використовуючи вагові коефіцієнти з табл. 2. Для кожного сценарію розраховано QDLT,_{spes} за формулою (11), та визначено рейтинг платформ.

Сценарій 1 – Фінансові операції. Задача: міжбанківські розрахунки 5–20 регульованих фінансових установ. Ключові вимоги: висока надійність консенсусу ($w_{Cr}=0,25$), швидка фінальність транзакцій ($w_{Ft}=0,20$), гарантована аудитопритатність ($w_A=0,15$). Результати розрахунку: Polygon – 0,822, Ethereum – 0,817, Hyperledger Fabric – 0,774, Corda – 0,743. Попри найвищі окремі показники Cr та Ft, Corda поступається Polygon через критично низьку сумісність $I_x=0,38$, що ускладнює інтеграцію з SWIFT та іншими фінансовими інфраструктурами.

Сценарій 2 – Реєстр державного майна. Задача: ведення децентралізованого реєстру об'єктів нерухомості в межах державної програми. Ключові вимоги: висока аудитопритатність ($w_A=0,25$), фінальність ($w_{Ft}=0,25$), забезпечення регуляторного комплаєнсу. Результати: Polygon – 0,827, Ethereum – 0,815, Hyperledger Fabric – 0,813, Corda – 0,793. Конкурентність Ethereum та Hyperledger Fabric в цьому сценарії пояснюється їхньою сильною аудитопритатністю (0,88 та 0,93 відповідно) при достатній фінальності.

Сценарій 3 – IoT supply chain. Задача: відстеження переміщення товарів в гетерогенній мережі з тисячами IoT-пристроїв. Ключові вимоги: висока сумісність ($w_{Ix}=0,15$), децентралізація ($w_{Dd}=0,15$), баланс on/off-chain ($w_{Boc}=0,10$). Результати: Ethereum – 0,826, Polygon – 0,824, Hyperledger Fabric – 0,762, Corda – 0,701. У цьому сценарії Ethereum вперше виходить на перше місце завдяки найвищим показникам Dd та Ix. Суттєве відставання Corda (0.701) обу-

мовлено низькою сумісністю та децентралізацією, що є критичними для IoT-мереж з широким колом учасників.

Зведені результати ранжування для всіх трьох сценаріїв наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Ранжування DLT-платформ за трьома сценаріями

Платформа	Сцен. 1 (Фін.)	Сцен. 2 (е-Уряд)	Сцен. 3 (IoT)	Сер. ранг
Hyperledger Fabric	3-тє (0,774)	3-тє (0,813)	3-тє (0,762)	3
Ethereum	2-ге (0,817)	2-ге (0,815)	1-ше (0,826)	2
Corda	4-тє (0,743)	4-тє (0,793)	4-тє (0,701)	4
Polygon	1-ше (0,822)	1-ше (0,827)	2-ге (0,824)	1

Аналіз табл. 4 свідчить, що Polygon є найбільш універсальною платформою – вона посідає перше або друге місце в усіх трьох сценаріях. Corda демонструє стабільно найнижчий рейтинг через системну слабкість сумісності та децентралізації. Ethereum, попри нижчу фінальність, виграє в IoT-сценарії завдяки найвищій децентралізації та міжмережевій сумісності.

Висновки

У даній роботі запропоновано адаптовану модель оцінювання якості DLT-платформ DLT-QM, що розширює стандарт ISO/IEC 25010 сімома DLT-специфічними характеристиками з формалізованими математичними метриками. Ключові результати роботи такі.

По-перше, визначено сім характеристик якості (Dd, Cr, Ft, A, Tm, Ix, Voc), що охоплюють архітектурні аспекти DLT-систем, відсутні у ISO/IEC 25010. Для кожної характеристики розроблено формалізовану метрику (формули 1–9) та інтегральний показник QDLT (формули 10–11).

По-друге, верифікацію моделі проведено на чотирьох репрезентативних платформах (Hyperledger Fabric, Ethereum, Corda, Polygon), що охоплюють основні архітектурні класи DLT. Аналіз підтвердив наявність системних компромісів між децентралізацією, продуктивністю і безпекою, які кількісно відображаються у профілях платформ (рис. 1).

По-третє, розроблено методологію сценарно-орієнтованого застосування моделі та систему рекомендованих вагових коефіцієнтів для трьох типових сценаріїв (табл. 2). Апробація на трьох сценаріях (табл. 4) демонструє, що модель забезпечує обґрунтовані та диференційовані рекомендації залежно від контексту.

Перспективи розвитку дослідження: (1) розширення набору платформ за рахунок Solana, Avalanche та enterprise-рішень; (2) автоматизація збору значень метрик через API моніторингу мереж; (3) верифікація рекомендованих вагових коефіцієнтів через анкетування предметних експертів методом Делфі.

Декларація про штучний інтелект

Штучний інтелект при написанні статті не використовувався.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів та підтверджує, що під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

Список використаної літератури

1. Bartoletti, M. (2020). *Smart contracts contracts. Frontiers in Blockchain*, 3. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.00027>
2. Bashir, I. (2022). *Blockchain age protocols. У Blockchain consensus (с. 331–376). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8179-6_8*
3. George, J. T. (2021). *Hyperledger fabric. У Introducing blockchain applications (с. 125–147). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7480-4_6*

4. Hamilton, J. A., Nash, D. A., & Pooch, U. W. (2020). *System modeling*. *У Distributed simulation* (с. 107–146). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003067849-4>
5. Kasthuri, M. (2021). *Blockchain based data security as a service in cloud platform security*. *International Journal on Cloud Computing: Services and Architecture*, 11(6), 1–8. <https://doi.org/10.5121/ijccsa.2021.11601>
6. Singh, D., Goyal, R., & Dixit, A. K. (2022). *Decentralize smart contract voting system **. *У 2022 international conference on cyber resilience (ICCR)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iccr56254.2022.9995815>
7. Walkinshaw, N. (2017). *Software development processes and process improvement*. *У Software quality assurance* (с. 23–49). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64822-4_3
8. Wright, C. S. (2008). *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system*. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3440802>
9. Yaga, D., Mell, P., Roby, N., & Scarfone, K. (2018). *Blockchain technology overview*. *National Institute of Standards and Technology*. <https://doi.org/10.6028/nist.ir.8202>
10. Zhou, Q., Huang, H., Zheng, Z., & Bian, J. (2023). *Overview to blockchain scalability challenges and solutions*. *У Blockchain scalability* (с. 51–80). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1059-5_2

S. Zhebka, M. Kuklinskyi

ADAPTED QUALITY EVALUATION MODEL FOR DLT PLATFORMS BASED ON THE ISO/IEC 25010 STANDARD

The paper proposes an extended quality assessment model for Distributed Ledger Technology platforms, referred to as DLT-QM, developed on the basis of the ISO/IEC 25010 standard while considering the architectural and operational specifics of decentralized and blockchain-based systems. The relevance of the study is determined by the rapid development of digital technologies and the growing adoption of DLT platforms in finance, e-government, logistics, IoT ecosystems, and enterprise information systems, alongside the absence of a unified formalized approach for comprehensive quality assessment of such platforms. The study analyzes the applicability of ISO/IEC 25010 characteristics to DLT-oriented software systems and identifies a set of DLT-specific quality attributes reflecting the unique properties of distributed ledger environments, including decentralization level, consensus reliability, transaction finality, auditability, trust model, interoperability, and on-chain/off-chain balance. For each characteristic, mathematical metrics are formalized to support multicriteria quality assessment and optimization of architectural decisions in software engineering tasks. The integral quality indicator QDLT is defined as a weighted combination of the traditional ISO/IEC 25010 component and a DLT-specific component, enabling the adaptation of the model to various application scenarios. The proposed model is validated using four representative DLT platforms: Hyperledger Fabric, Ethereum, Corda, and Polygon. The obtained results confirm the existence of structural trade-offs between decentralization, performance, security, and interoperability in modern distributed systems. Furthermore, a scenario-oriented application methodology is developed, including a procedure for determining weighting coefficients depending on the application domain, such as financial consortium systems, e-government infrastructures, and IoT supply chain environments. The practical significance of the research lies in the development of a formalized decision-support instrument for selecting DLT platforms in the design and implementation of modern software systems and digital services.

Keywords: blockchain, distributed ledger technology, DLT platforms, decentralized systems, distributed systems, information technologies, digital technologies, software engineering.

Надійшла до редакції: 12.02.2026

Прийнята до друку: 02.04.2026

Опубліковано: 29.06.2026

© 2026 С. В. Жебка, М. В. Куклінський.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>