

УДК 004.94:004.7:621.39

DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.1/27>

**Міхав В.В.**

<https://orcid.org/0000-0003-4816-4680>

Приватна установа «Університет науки, підприємництва та технологій»

**Мелешко Є.В.**

<https://orcid.org/0000-0001-8791-0063>

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Якименко М.С.**

<https://orcid.org/0000-0003-3290-6088>

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Босько В.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-4933-9676>

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Березюк І.А.**

<https://orcid.org/0000-0003-1903-8204>

Центральноукраїнський національний технічний університет

## МОДЕЛІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ Q&A СИСТЕМ В PEER-TO-PEER КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

У статті виконано дослідження та порівняльний аналіз моделей децентралізованих Q&A систем, що функціонують у P2P комп'ютерних мережах. Актуальність дослідження зумовлена обмеженнями централізованих платформ питань-відповідей – залежністю від єдиного оператора та його політик модерації й ранжування, ризиками цензури або втрати доступу до накопичених знань, а також слабкою переносимістю даних і репутації користувачів між сервісами. Метою статті є узагальнення наявних підходів до побудови децентралізованого Q&A та визначення їхніх переваг, недоліків і мережових компромісів у контексті забезпечення якості колективного відбору відповідей. У роботі запропоновано узагальнену класифікацію децентралізованих Q&A-рішень за архітектурними ознаками та механізмами побудови й проаналізовано репрезентативні моделі та прототипи, описані в наукових публікаціях. Показано, що значна частина підходів базується на соціальному пошуку на базі P2P-мереж та децентралізованій маршрутизації запитів до потенційних експертів, де кероване поширення питання дає змогу знижувати мережовий трафік і скорочувати час отримання релевантних відповідей. Інший поширений напрям пов'язаний із гібридними рішеннями типу «blockchain + P2P-сховище», у яких логіка довіри та правил взаємодії (голосування, репутація, облік внеску, аудит подій) формалізується смарт-контрактами, тоді як контент розміщується у розподіленому середовищі, що підвищує перевірюваність дій і прозорість процедур. Особливу увагу приділено мережовим компромісам, характерним для P2P-середовища, зокрема, впливу динаміки учасників P2P-мережі на доступність експертів і контенту, витратам трафіку під час поширення запитів і затримкам узгодження статей, а також координаційним витратам та аспектам приватності у гібридних blockchain-схемах. За результатами огляду сформовано порівняльну таблицю моделей за критеріями придатності до реалізації задач Q&A систем та узагальнено висновки щодо умов ефективного проектування децентралізованих систем питань-відповідей у P2P комп'ютерних мережах.

**Ключові слова:** Q&A, системи запитань-відповідей, децентралізовані системи, комп'ютерні мережі, P2P-мережі, пошук експертів, маршрутизація запитів, репутація, довіра, blockchain, колективний відбір відповідей, колективний розум.



**Постановка проблеми.** Сучасні системи запитань-відповідей Q&A типу Stack Overflow або Reddit забезпечують накопичення знань і колективний відбір корисних відповідей завдяки механізмам голосування, репутації та модерації. Однак у переважній більшості такі сервіси реалізуються в централізованій архітектурі, що породжує низку обмежень: наявність єдиної точки відмови та контролю, залежність доступності знань від працездатності центральної інфраструктури, а також централізоване управління політиками ранжування й модерації. У результаті виникають ризики недоступності даних, обмеження щодо приватності, а також вразливість до маніпулятивного впливу на видимість контенту та експертів. Важливість цих недоліків залежить від тематики системи Q&A, зокрема, якщо в технічних системах пошуку відповідей маніпуляція громадською думкою не має особливого сенсу, то в соціальних науках та новинах маніпулятивні впливи й просування суб'єктивних точок зору – часті сценарії. Додатково, зі зростанням обсягів контенту та кількості учасників загострюється проблема маршрутизації питань до релевантних експертів і їх автоматизованого підбору – значна частка запитань може залишатися без якісної відповіді або отримувати відповіді із затримкою через невідповідність між тематикою запиту та компетенціями й активністю потенційних експертів. У науковій літературі ці задачі формалізуються як *expert finding* та *expert search* – пошук експертів за тематикою запиту [1], а також *question routing* – спрямування питання до групи користувачів, здатних і готових надати корисні відповіді [2]. У цьому контексті перехід до децентралізованих P2P-мереж для Q&A розглядається як спосіб зменшити залежність від єдиного центру, підвищити відмовостійкість і забезпечити доступність знань у середовищах із нестабільною інфраструктурою. Технічною основою такої децентралізації виступають P2P-оверлеї та механізми розподіленого пошуку, зокрема, DHT-таблиці, які забезпечують ефективний пошук контенту без центрального серверу, що ілюструється класичними рішеннями, наприклад, протоколом Chord [3]. Водночас перенесення Q&A у P2P-мережу породжує нову науково-практичну суперечність – потрібно зберегти властивості «колективного інтелекту», зокрема, якість відбору відповідей і експертів, за відсутності централізованого контролю, глобальних логів та єдиної репутаційної системи. У децентралізованому середовищі ускладнюється довіра до профілів користувачів і зростає ризик Sybil-

поведінки – створення множини підконтрольних профілів, що здійснюють скоординовані дії та атаки ін'єкцією профілів на систему «колективного розуму» [4]. Тому необхідним стає розробка і впровадження розподілених механізмів довіри й репутації, зокрема, класу алгоритмів типу EigenTrust, які обчислюють глобальні показники довіри у P2P-мережі [5], а також механізмів узгодження стану системи (оцінки, репутаційні події, версії контенту) в умовах децентралізації, для цього релевантними є підходи eventual consistency та CRDT [6]. Отже задача дослідження та розробки моделей децентралізованих Q&A-систем у P2P комп'ютерних мережах, які забезпечують пошук релевантних експертів, рекомендацію експертів на основі колаборативної фільтрації, контентних та поведінкових сигналів, а також стійкості до маніпуляцій і Sybil-атак та узгодження стану колективного відбору в децентралізованому режимі, є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Емпіричні дослідження спільнот сфокусованих на Q&A системах показують, що цінність таких систем формується через колективну активність, репутаційні механізми та накопичення знань, але централізоване управління цими механізмами створює структурну залежність від платформи як інституції [7].

З технологічного погляду, базовим підґрунтям децентралізованих Q&A є результати досліджень у сфері P2P-оверлеїв та розподіленого пошуку. Структуровані оверлеї на основі засобів DHT пропонують формальні гарантії масштабності для операцій пошуку та маршрутизації без центрального індексу. У цьому контексті протокол Chord задає один із канонічних варіантів організації простору ключів та маршрутизації з логарифмічною складністю, що робить його придатним як «транспортний шар» для виявлення вузлів-носіїв контенту або індексів за темами й тегами [3]. Протокол Kademlia, у свою чергу, формалізує засоби DHT на XOR-метриці та демонструє високу практичну придатність до сценаріїв зі змінною кількістю вузлів P2P-мережі і частковою їх недоступністю, що критично для Q&A-мереж у реальних умовах [8]. Таким чином, у літературі сформовано класичний інструментарій для побудови маршрутизації запитів, однак питання семантичного пошуку, ранжування та оцінювання якості відповідей виходять за межі функцій DHT і потребують надбудов.

Окремий напрям досліджень стосується децентралізованого зберігання та доставки контенту.

Протокол IPFS реалізує контент-адресований P2P-шар з версіонуванням, де цілісність та ідентифікація об'єктів забезпечуються хеш-адресацією, а реплікація між вузлами здійснюється без необхідності центрального сховища [9]. Водночас у протокольних екосистемах, орієнтованих на локальні журнали та реплікацію, зокрема, Secure Scuttlebutt, закладено альтернативну модель «джерела істини», де кожен учасник веде підписаний append-only журнал, а синхронізація відбувається P2P-шляхом за принципом соціально-обумовленої реплікації [10]. Для Q&A це відкриває можливість локального накопичення історії внеску та підписаних фактів взаємодій (питання, відповіді, оцінки), однак ускладнює глобальний пошук і узгоджене ранжування без додаткових механізмів індексації.

Паралельно у сфері децентралізованих соціальних протоколів важливим є федеративний підхід, де децентралізація досягається не чистою P2P-мережею, а мережею незалежних серверів. ActivityPub стандартизує обмін об'єктами та подіями між учасниками, забезпечуючи інтероперабельність і часткову автономність доменів [11]. Для Q&A федералізація є компромісом, з одного боку, вона знижує монополізацію й дозволяє локальну модерацію; з іншого – залишає «локальні центри» та ризик фрагментації контенту й репутації між учасниками мережі.

Ключовою проблемою, що систематично фіксується в дослідженнях децентралізованих мереж, є довіра до профілів користувачів та стійкість до маніпуляцій. Класична робота про Sybil-атаки формалізує загрозу множинних підконтрольних профілів як фундаментальний виклик для розподілених систем репутації та голосування [4]. У відповідь на це запропоновано алгоритмічні механізми обчислення довіри, зокрема, EigenTrust, який оцінює глобальні рейтинги на основі локальних взаємодій та репутаційних переходів у P2P-мережі [5]. Для децентралізованих Q&A такі механізми є критичними, оскільки саме «колективні сигнали» (оцінки, репутація, історія корисних відповідей) мають бути захищені від накрутки й скоординованих атак. Додатково, у децентралізованих архітектурах необхідно вирішувати узгодження стану (версійність, редагування, агрегація голосів та оцінок) за відсутності центра. У цьому контексті структури даних CRDT задають формальний апарат для досягнення виконання моделі Eventual consistency без конфліктів на рівні типів даних, що забезпечує придатність до офлайн-сценаріїв та асинхронної реплікації [6].

Власне алгоритмічна складова Q&A систем, підбір експертів, їх рекомендація, маршрутизація питань та оцінювання якості відповіді, добре опрацьована для централізованих середовищ. Оглядові роботи з рекомендації експертів систематизують підходи, що поєднують текстові сигнали, структурні графові ознаки та поведінкові характеристики (активність, інтереси, часовий дрейф), підкреслюючи необхідність врахування не лише компетентності, але й ймовірності відповіді [12]. Окремі огляди зосереджують увагу на динаміці експертності та проблемі розрідженості, що особливо актуально для децентралізованих мереж, де дані неминуче фрагментуються [13, 14]. Таким чином, існує методологічна база для створення методів пошуку експертів та маршрутизації питань, але її перенесення в P2P-мережі вимагає переосмислення джерел даних, механізмів довіри та протоколів обміну.

Отже, аналіз останніх публікацій свідчить, що децентралізовані Q&A системи формується на перетині трьох науково-технічних задач:

- 1) P2P-оверлеї та DHT як основа пошуку та маршрутизації експертів й відповідей [3, 8];
- 2) контент-адресоване зберігання та реплікація журналів як основа доступності даних [9, 10];
- 3) механізми довіри та репутації, стійкості до Sybil-атак та узгодження стану системи, як умови збереження «мудрості натовпу» без центрального арбітра [4-6].

Водночас моделі рекомендації експертів у Q&A системах надають інструменти для підвищення якості відповідей, але потребують інтеграції з мережевим обмеженням та децентралізованими протоколами [12, 13].

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження та систематизація наявних підходів до побудови децентралізованих Q&A систем у P2P комп'ютерних мережах, включно з аналізом архітектурних моделей, протокольних механізмів і засобів забезпечення довіри та репутації користувачів, а також визначення переваг та обмежень таких систем і напрямів подальших досліджень у контексті збереження якості колективного відбору відповідей.

**Виклад основного матеріалу.** Як показав аналіз публікацій, децентралізація Q&A-платформ розглядається як відповідь на проблеми централізованих сервісів, такі як –концентрація влади над правилами модерації й ранжування в одному центрі, залежність від єдиного провайдера інфраструктури, ризику цензури та спостереження, монополізація даних й обмежені можливості

перенесення репутації користувачів між платформами [15]. Тобто існує необхідність переходу від клієнт-серверної моделі Q&A систем до архітектур, де зберігання і поширення даних, перевірка репутації і механізми забезпечення якості відповідей розподілені між учасниками та не залежать від єдиного центру керування [15].

У сучасній літературі доцільно виокремити три основні класи децентралізованих Q&A систем:

1) повністю P2P-підхід, де вузли обмінюються питаннями/відповідями напряму та реплікують дані;

2) гібрид «blockchain + P2P-сховище», де логіка довіри, винагород та правил виноситься в смартконтракти, а контент зберігається в децентралізованому сховищі;

3) федеративні рішення, що розподіляють керування між учасниками (як практичний компроміс), і не є чистими P2P-мережами [15].

Найбільш типово для Q&A систем у публікаціях проговорено саме гібридний стек, оскільки він дозволяє відтворити такі ключові механізми, як репутацію, голосування та обмеження прав користувачів, у формалізованому вигляді та забезпечити криптографічну атрибуцію внеску (підписані питання, відповіді, голоси) [15]. Зокрема, у [15] розглянуто компроміс у проектуванні децентралізованих систем між блокчейном і IPFS – правила якості (зокрема пороги репутації для голосування) збільшують координаційні витрати, а рознесення «контентного шару» і «шару правил» стає визначальним для масштабованості та практичності системи [15].

Практична реалізація цього напряму підтверджується наявністю прототипів і прикладних розробок, де Q&A будується як смартконтрактна система. Так, у роботі про CodeBlockS автори описують платформу спільного обміну знаннями, реалізовану на основі Ethereum-смартконтрактів, позиціонуючи її як механізм підвищення довіри та ефективності доступу до розв'язків задач, що є близьким до домену Q&A [16]. Для цього класу рішень перевагою є прозорість правил внеску й винагород, проте технологічними обмеженнями залишаються транзакційні затримки та вартість, складність приватності і потреба додаткових механізмів протидії спаму й зловживанням, які не вирішуються самим фактом використання блокчейна [15, 16].

Другий важливий напрям – пошук експертів у Q&A, реалізований на базі P2P-мережі. У протоколі Asknext запропоновано агентний підхід до соціального пошуку, який зменшує мережеві

накладні витрати завдяки stop-повідомленням та керуванню поширенням запиту, що прямо адресує проблему масштабованості при децентралізованому Q&A [12]. Подальший розвиток цього напряму представлено алгоритмом Question Waves, де мульткаст-маршрутизація та диференційовані «хвилі» поширення дозволяють швидше отримувати релевантні відповіді через більш пріоритетні зв'язки, зменшуючи потребу в централізованому перерахунку та переранжуванні [13]. Для проектування децентралізованих Q&A систем ці роботи важливі тим, що вони пропонують мережевий механізм підбору джерел відповідей без глобального індексу та з явним аналізом компромісу між охопленням пошуку й трафіком [12, 13].

Виходячи з проведеного дослідження, порівняльну характеристику моделей децентралізованих Q&A систем доцільно виконувати за наступними параметрами: маршрутизація та пошук, зберігання даних, механізми довіри та якості, а також мережеві компроміси (трафік, затримки, стійкість до динаміки вузлів) [12-16]. У табл. 1 наведено порівняльний аналіз децентралізованих моделей Q&A-систем.

Отримані результати дослідження свідчать, що децентралізовані Q&A системи у наукових роботах найчастіше реалізується не як один універсальний протокол, а як поєднання механізму пошуку експертів та механізмів підтримки якості відповідей. Для соціального пошуку у форматі P2P-мережі акцент робиться на ефективній маршрутизації запитів у неструктурованому overlay за локальною інформацією та зв'язками [12, 13]. У blockchain+IPFS-підходах первинним є шар формалізованих правил і перевірюваності дій, що краще відтворює Q&A-процедури (голосування, репутаційні пороги, аудит), але переносить ключові виклики в площину координації та вартості узгодження [15, 16].

**Висновки.** Встановлено, що децентралізовані Q&A системи в наукових публікаціях найчастіше реалізуються як поєднання мережевих механізмів пошуку експертів та механізмів забезпечення якості відповідей. Показано, що гібридний підхід «blockchain + P2P-сховище» (напр., IPFS) є найбільш формалізованим для відтворення Q&A-процедур (голосування, репутаційні пороги, аудит подій), оскільки дає прозорі правила та криптографічно захищену історію дій учасників. Водночас такий підхід породжує необхідність компромісів, пов'язаних з координаційними витратами, затримками та складністю забезпечення приватності. Визначено, що соціальний пошук на основі

**Порівняльні характеристики моделей децентралізованих Q&A систем  
у P2P комп'ютерних мережах**

№	Модель	Тип децентралізації	Маршрутизація запитів / пошук	Зберігання даних	Довіра/ репутація	Переваги	Недоліки
1	Q&A-приклад у framework Blockchain + IPFS [15]	P2P + blockchain	Залежить від overlay та реплікації; фокус на компромісах дизайну	IPFS (контент) + blockchain (події/правила)	Підписані дії; правила репутації/голосування як частина дизайну	Формалізація правил; аудиторваність подій	Координаційні витрати, затримки, вартість, складність приватності
2	CodeBlockS (knowledge sharing / Q&A) [16]	Blockchain-орієнтована DApp	Пошук /доступ визначається логікою застосунку	Смартконтракти (облік подій) + зовнішні сховища залежно від реалізації	Довіра через смартконтракти; стимулювання внеску	Прозорі правила внеску/ винагород; фіксація подій	Масштабування й вартість транзакцій; приватність; потреба антиспаму
3	Asknext (agent social search) [12]	Соціальний пошук у форматі P2P-мережі	Поширення запиту графом контактів + stop-повідомлення	Децентралізовано у вузлах/ агентах	Якість залежить від вибору маршруту/ зв'язків; рання зупинка пошуку	Зниження кількості повідомлень; масштабованість Q&A системи	Залежність від якості соціального графу; локальність знань
4	Question Waves (соціальний пошук) [13]	Соціальний пошук у форматі P2P-мережі	Мультикаст-маршрутизація; пріоритизація поширення	Децентра-лізовано	Ранжування через «порядок/ швидкість надходження» та пріоритети зв'язків	Швидше отримання більш релевантних відповідей; менша потреба централізованого ранжування	Компроміс трафік/ охоплення; складність формалізації/ підтримки довіри

P2P-мереж (Asknext, Question Waves) є перспективною моделлю маршрутизації запитів у децентралізованих Q&A системах, оскільки дозволяє зменшувати мережевий трафік і пришвидшувати отримання релевантних відповідей за рахунок керованого поширення запиту та використання локальних зв'язків і пріоритетів, зберігаючи працездатність у динамічному середовищі.

Узагальнено, що ключовими критеріями вибору моделі децентралізованого Q&A у P2P-мережах є: масштабованість пошуку та маршрутизації; стійкість до динаміки вузлів децентралізованої мережі; можливість формалізації й перевірки правил якості (голосування, репутація, модерація); витрати узгодження (трафік, затримки, обчислювальні витрати).

Визначено, що для побудови працездатної децентралізованої Q&A системи доцільно поєднувати методи ефективної доставки запитів до експертів із методами формалізованого обліку та перевірки колективних сигналів якості (голосування, репутація, аудиторваність подій).

Напрямок подальших досліджень, що впливає з проведеного дослідження, полягає у розробці інтегрованої моделі децентралізованого Q&A для P2P комп'ютерних мереж, яка зможе забезпечити ефективну маршрутизацію запитів до експертів, стійкість до змін у структурі P2P-мережі та до інформаційних атак, прозорі механізми забезпечення якості відповідей й мотивації учасників, а також прийнятні мережеві витрати та затримки в реальних умовах експлуатації.

#### Список літератури:

1. Balog K., Azzopardi L., de Rijke M. Formal models for expert finding in enterprise corpora // Proceedings of the 29th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR'06). ACM, New York, NY, USA. 2006. P. 43-50. DOI: 10.1145/1148170.1148181.
2. Chang S., Pal A. Routing questions for collaborative answering in community question answering // Advances in Social Networks Analysis and Mining 2013 (ASONAM '13). ACM, New York, NY, USA. 2013. P. 494-501. DOI: 10.1145/2492517.2492559.

3. Stoica I., Morris R., Karger D. R., Kaashoek M. F., Balakrishnan H. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications // Proceedings of ACM SIGCOMM 2001. ACM, New York, NY, USA. 2001. P. 149-160. DOI: 10.1145/383059.383071.
4. Douceur J. R. The Sybil Attack // Peer-to-Peer Systems. Lecture Notes in Computer Science. 2002. Vol. 2429. P. 251-260. DOI: 10.1007/3-540-45748-8\_24.
5. Kamvar S. D., Schlosser M. T., Garcia-Molina H. The EigenTrust algorithm for reputation management in P2P networks // Proceedings of the 12th International Conference on World Wide Web (WWW'03). ACM, New York, NY, USA. 2003. P. 640-651. DOI: 10.1145/775152.775242.
6. Shapiro M., Preguiça N., Baquero C., Zawirski M. Conflict-Free Replicated Data Types // Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2011). Lecture Notes in Computer Science. 2011. Vol. 6976. P. 386-400. DOI: 10.1007/978-3-642-24550-3\_29.
7. Anderson A., Huttenlocher D. P., Kleinberg J. M., Leskovec J. Discovering value from community activity on focused question answering sites: a case study of Stack Overflow // Proceedings of the 18th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD '12). ACM, New York, NY, USA. 2012. P. 850-858. DOI: 10.1145/2339530.2339665.
8. Maymounkov P., Mazières D. Kademlia: A Peer-to-Peer Information System Based on the XOR Metric // Peer-to-Peer Systems. Lecture Notes in Computer Science. 2002. Vol. 2429. P. 53-65. DOI: 10.1007/3-540-45748-8\_5.
9. Benet J. IPFS – Content Addressed, Versioned, P2P File System // Networking and Internet Architecture. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1407.3561
10. SSBC. Scuttlebutt Protocol Guide. URL: <https://ssbc.github.io/scuttlebutt-protocol-guide/>
11. W3C Recommendation. ActivityPub. 2018. URL: <https://www.w3.org/TR/2018/REC-activitypub-20180123/>
12. Trias i Mansilla A., de la Rosa i Esteva J. L. Asknext: An agent protocol for social search // Information Sciences. 2012. Vol. 190. P. 144-161. DOI: 10.1016/j.ins.2011.12.012.
13. Trias i Mansilla A., de la Rosa i Esteva J. L. Question Waves: A multicast query routing algorithm for social search. Information Sciences. 2013. Vol. 253. P. 1-25. DOI: 10.1016/j.ins.2013.08.044.
14. Kalnis P., Ng W. S., Ooi B. C., Tan K.-L. Answering similarity queries in peer-to-peer networks // Information Systems. 2006. Vol. 31(1). P. 57-72. DOI: 10.1016/j.is.2004.09.003.
15. Tenorio-Fornés Á., Hassan S., Pavón J. Peer-to-Peer System Design Trade-Offs: A Framework Exploring the Balance between Blockchain and IPFS // Applied Sciences. 2021. Vol. 11(21). Art. 10012. DOI: 10.3390/app112110012.
16. Jain S., Vamsi P. R., Agarwal Y., Goel J. CodeBlockS: Development of Collaborative Knowledge Sharing Application with Blockchain Smart Contract // International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB). 2023. Vol. 15(1). P. 1-19. DOI: 10.5815/ijieeb.2023.01.01.

### **Mikhav V.V., Meleshko Ye.V., Yakymenko M.S., Bosko V.V., Bereziuk I.A. MODELS OF DECENTRALIZED Q&A SYSTEMS IN PEER-TO-PEER COMPUTER NETWORKS**

*The article presents research and a comparative analysis of decentralized Q&A models operating in P2P computer networks. The relevance of this research stems from the limitations of centralized Q&A platforms: dependence on a single operator and its moderation/ranking policies, risks of censorship or loss of access to accumulated knowledge, and low portability of user data and reputation across services. The article aims to summarize existing approaches to decentralized Q&A systems and identify their strengths, weaknesses, and network-related trade-offs affecting answer quality. The paper proposes a generalized classification of decentralized Q&A solutions by architecture and implementation mechanisms, and analyzes representative models and prototypes from the literature. It shows that many approaches rely on P2P social search and decentralized query routing to potential experts; controlled question dissemination can reduce traffic and speed up relevant answers. Another line of research focuses on hybrid “blockchain + P2P storage” solutions: smart contracts formalize trust and interaction rules (voting, reputation, contribution accounting, auditing), while content is stored in a distributed environment to improve verifiability and procedural transparency. Special attention is paid to network-related trade-offs inherent to the P2P environment, including the impact of participant dynamics (churn) on the availability of experts and content, traffic costs during query propagation and delays in state reconciliation, as well as coordination overhead and privacy aspects in hybrid blockchain schemes. Based on the review, a comparative table of models is compiled based on their suitability for Q&A tasks, and conclusions are drawn on conditions for effective decentralized Q&A design in P2P networks.*

**Keywords:** Q&A, question-answering systems, decentralized systems, computer networks, P2P networks, expert finding, query routing, reputation, trust, blockchain, collective answer selection, collective intelligence.

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026