

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ВАНТАЖНИХ
ПЕРЕВЕЗЕНЬ З НЕСТАБІЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ: DAG-РЕЄСТР ЯК
ІНСТРУМЕНТ ВІДКЛАДЕНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ**

Велегура Є. А.¹ [ORCID], Горячкін В. М.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглядається актуальна проблема забезпечення консистентності та незмінності логістичних даних в умовах переривчастого зв'язку, що є характерним для вантажних перевезень. Досліджено обмеження класичних блокчейн-протоколів у контексті теореми CAP при роботі в динамічних транспортних мережах. Обґрунтовано перехід від лінійних структур реєстру до направлених ациклічних графів (DAG), що дозволяє паралельно записувати події різними вузлами системи. Запропоновано архітектурне рішення, що включає двошарову CRDT-модель синхронізації стану та дворівневий адаптивний gossip-протокол з proximity-комунікацією між транспортними засобами. Такий підхід покликаний забезпечити кінцеву узгодженість системи без втрати доступності даних при розділенні мережі.

Ключові слова: DAG-DLT, вантажні перевезення, консистентність даних, переривчастий зв'язок, CRDT, gossip-протокол, кінцева узгодженість, стійкість до розділення.

Вступ

Сучасні системи вантажних перевезень (TMS-системи) дедалі більше залежать від безперервного обміну даними між учасниками логістичного ланцюга: транспортними засобами, диспетчерськими центрами, складами та митними пунктами [1, 2]. Проте специфіка вантажних перевезень пов'язана з частими розривами зв'язку через проходження тунелів, віддалених ділянок доріг, зон з обмеженим покриттям. У ці моменти TMS-система перетворюється на роз'єдану сукупність вузлів, де дані накопичуються локально, а їх наступна передача відбувається за принципом «зберегти та переслати» (store-and-forward).

Класичні підходи до блокчейну розраховані на стабільне з'єднання між усіма учасниками, тому в умовах переривчастого зв'язку вони демонструють

низьку ефективність [3]. Проблема полягає в тому, що після відновлення з'єднання класичні лінійні блокчейн-протоколи вимагають глобального консенсусу для визначення єдиного порядку транзакцій, що призводить до конфліктів між гілками, втрати частини записів або значних затримок синхронізації. Традиційні методи реплікації баз даних, у свою чергу, не забезпечують криптографічної незмінності записів та їх аудитоспроможності.

Аналіз системних обмежень та теорема CAP

Будь-яка мережа транспортних засобів є розподіленою системою, що підпорядковується теоремі CAP [4]. Згідно з цією теоремою розподілена система зберігання даних не може одночасно забезпечити більше двох із трьох властивостей: узгодженість (Consistency), доступність (Availability) та стійкість до розділення (Partition tolerance).

Традиційні блокчейн-протоколи (Bitcoin, Ethereum) потребують регулярного зв'язку з більшістю вузлів для забезпечення прогресу консенсусу. При тривалому розділенні мережі ізольовані вузли або припиняють запис (у BFT-протоколах), або продовжують формувати локальні гілки, які згодом можуть бути відкинуті під час реорганізації ланцюга (у протоколах Nakamoto-типу) [5].

Архітектурні підходи до забезпечення стійкості реєстру в умовах переривчастого зв'язку

Розв'язання проблеми забезпечення стійкості реєстру досягається через відмову від традиційної лінійної моделі блокчейну на користь архітектури спрямованого ациклічного графа (DAG). Завдяки тому, що кожна нова транзакція посилається хешами на декілька попередніх, досягається можливість паралельного асинхронного фіксування даних різними вузлами без глобального консенсусу [5, 6]. При цьому кожен транспортний засіб формує та підтримує власну локальну гілку графа — автономний логістичний ланцюг.

При встановленні прямого зв'язку між транспортними засобами відбувається автоматичний обмін буферизованими даними за механізмом «зберегти та переслати»: ізольований вузол передає свої логи транспортному засобу, що проїжджає повз, який доставляє їх до мережі при першій нагоді

(proximity gossip, V2V) [7]. Злиття розрізнених гілок DAG здійснюється за допомогою безконфліктних реплікованих типів даних (Conflict-free Replicated Data Types, CRDT), що математично гарантує кінцеву узгодженість (eventual consistency) незалежно від порядку синхронізації вузлів [8].

Така структура дозволяє учасникам логістичного процесу (наприклад, вантажівкам поза зоною покриття) працювати автономно. Після відновлення мережевого доступу розрізнені гілки інтегруються в загальний граф за встановленими протоколами, що підтверджується архітектурним рішенням SwarmDAG [6], а також підходом Vegvisir [5], який забезпечує стійкість до розділення через злиття локальних ланцюгів після відновлення зв'язку.

Слід зазначити, що процес злиття гілок не є тривіальним: при одночасному записі даних про одну й ту саму подію різними вузлами виникає необхідність детермінованого розв'язання порядку. У запропонованій моделі для цього застосовується двошарова CRDT-структура: перший шар (G-Set) забезпечує збереження повного журналу транзакцій через операцію об'єднання множин; другий шар (автомат стану вантажу) агрегує поточний стан кожного вантажу через операцію поелементного максимуму за визначеним частковим порядком станів ($CREATED < IN_TRANSIT < AT_CHECKPOINT < DELIVERED < ACCEPTED$). Математичні властивості цих операцій (комутативність, асоціативність, ідемпотентність) гарантують, що результат злиття є однаковим незалежно від порядку синхронізації вузлів (рис. 1). Слід зазначити, що монотонність цього автомата є свідомим проектним обмеженням: зворотні переходи (повернення, відмова) моделюються як окремі транзакції з новим ідентифікатором вантажної одиниці.

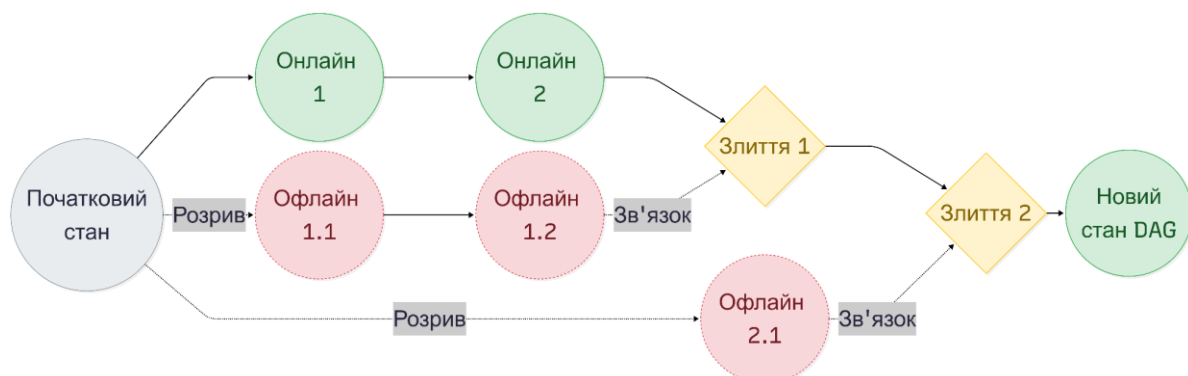


Рисунок 1 – Модель злиття локальних гілок даних у DAG-структурі після відновлення з'єднання

Адаптивний gossip-протокол синхронізації

Для ефективного розповсюдження даних між вузлами мережі застосовується дворівневий адаптивний gossip-протокол. На інфраструктурному рівні кожен вузол періодично ініціює синхронізацію з одним зі своїх постійних сусідів (складами, диспетчерськими центрами). Вибір партнера здійснюється адаптивно: обирається сусід з найбільшим інформаційним віком – тобто той, від якого найдовше не надходили оновлення. На proximity-рівні транспортні засоби, що знаходяться у фізичній близькості (в зоні дії Bluetooth або WiFi Direct), автоматично обмінюються буферизованими даними.

Кожен обмін даними відбувається через CRDT-merge операцію, що гарантує коректність результату незалежно від кількості проміжних передач. Цифрові підписи створювачів транзакцій та хеші попередніх блоків DAG-структури унеможливають модифікацію даних вузлами-посередниками.

Висновки

На відміну від класичних блокчейн-протоколів, DAG-структури забезпечують безперервну фіксацію даних в ізольованих сегментах завдяки асинхронному паралельному запису подій.

Запропонована архітектура, що поєднує двошарову CRDT-модель синхронізації стану та дворівневий адаптивний gossip-протокол з proximity-комунікацією між транспортними засобами, дозволяє забезпечити кінцеву узгодженість розподіленого реєстру без втрати доступності даних. Математичні властивості CRDT-операцій (комутативність, асоціативність, ідемпотентність) гарантують детерміноване злиття розрізнених гілок DAG незалежно від порядку синхронізації.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. M. B. Mollah et al., "Blockchain for the Internet of Vehicles Towards Intelligent Transportation Systems: A Survey," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 6, pp. 4157–4185, 15 March 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3028368.
2. European Commission, "Regulation (EU) 2020/1056 on electronic freight transport information (eFTI)," Official Journal of the European Union, 2020, url: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32020R1056>.
3. Y. Xiao et al., "A survey of distributed consensus protocols for blockchain networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 2, pp. 1432–1465, 2020, doi: 10.1109/comst.2020.2969706.

4. S. Gilbert and N. Lynch, "Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services," ACM SIGACT News, vol. 33, no. 2, pp. 51–59, 2002, doi: 10.1145/564585.564601.
5. K. Karlsson et al., "Vegvisir: A partition-tolerant blockchain for the internet-of-things," in 2018 IEEE 38th Int. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS), IEEE, 2018, pp. 1150–1158, doi: 10.1109/ICDCS.2018.00114.
6. M. Tran et al., "SwarmDAG: A partition tolerant distributed ledger protocol for swarm robotics," Ledger, vol. 4, pp. 25–31, 2019, doi: 10.5195/ledger.2019.174.
7. Y. Wang et al., "Lifesaving with RescueChain: Energy-Efficient and Partition-Tolerant Blockchain Based Secure Information Sharing for UAV-Aided Disaster Rescue," in IEEE INFOCOM 2021, IEEE, 2021, pp. 1–10, doi: 10.1109/INFOCOM42981.2021.9488719.
8. M. Shapiro et al., "A comprehensive study of convergent and commutative replicated data types," INRIA Research Report, 2011, url: <https://inria.hal.science/inria-00555588v1>.

ENSURING DATA INTEGRITY IN FREIGHT TRANSPORTATION SYSTEMS WITH UNSTABLE CONNECTIVITY: DAG-BASED LEDGER AS A TOOL FOR DEFERRED SYNCHRONIZATION

Yevhenii Velehura , Vadym Horiachkin

Abstract. *The paper addresses the urgent problem of ensuring the consistency and immutability of logistics data under conditions of intermittent connectivity, which is characteristic of freight transportation. The limitations of classical blockchain protocols in the context of the CAP theorem when operating in dynamic transport networks are investigated. The transition from linear ledger structures to directed acyclic graphs (DAG) is justified, which allows parallel recording of events by different system nodes. An architectural solution is proposed, which includes a two-layer CRDT model for state synchronization and a two-level adaptive gossip protocol with proximity communication between vehicles. This approach is intended to ensure the eventual consistency of the system without losing data availability during network partitioning.*

Keywords: *DAG-DLT, freight transportation, data consistency, intermittent connectivity, CRDT, gossip protocol, eventual consistency, partition tolerance.*