

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII AL REPUBLICII  
MOLDOVA**

**Universitatea Tehnică a Moldovei  
Facultatea Calculatoare Informatică și Microelectronică  
Departamentul Ingineria Software și Automatică**

**Admis la susținere  
Șef departament:  
Fiodorov Ion, conf. univ., dr.**

---

”\_” \_\_\_\_\_ 2025

# **Analiza trilemei blockchain-ului**

**Teză de master**

<b>Student:</b>	<b>Macheev Nichita, gr. TI-231M</b>
<b>Conducător:</b>	<b>Cernei Irina, asis. univ.</b>
<b>Consultant:</b>	<b>Cojocaru Svetlana, lect. univ.</b>

**Chișinău, 2025**

## ADNOTARE

Tema acestei lucrări de diplomă este analiza trilemei blockchain-ului. Scopul acestei lucrări este de a investiga soluțiile existente pentru depășirea trilemei blockchain-ului, precum și realizarea unei analize comparative a acestor soluții pentru a identifica cele mai promițătoare tehnologii și domeniile lor de aplicare.

În primul capitol al lucrării de diplomă a fost prezentată o analiză detaliată a trilemei blockchain-ului, precum și a tehnologiei blockchain în sine. Acest capitol examinează tehnologiile existente care încearcă să rezolve această problemă, cum ar fi sharding-ul, sidechain-urile, protocoalele de nivel doi și algoritmi de consens. De asemenea, a fost efectuată o evaluare a avantajelor și dezavantajelor acestora.

În al doilea capitol al lucrării de diplomă, au fost descrise și comparate caracteristicile principale ale tehnologiilor blockchain moderne. De asemenea, se acordă atenție identificării domeniilor în care soluțiile blockchain pot fi aplicate cel mai eficient. În plus, vor fi propuse soluții parțiale pentru trilemă pe baza blockchain-ului Ethereum, ca o soluție de nivel doi, cu accent pe abordările de compromis care pot îmbunătăți echilibrul între securitate, scalabilitate și descentralizare.

**Cuvinte cheie:** blockchain, trilema blockchain-ului, scalabilitate, securitate, descentralizare, sharding, sidechain-uri, protocoale de nivel doi, algoritmi de consens.

## ABSTRACT

The topic of this thesis is the analysis of the blockchain trilemma. The purpose of this work is to investigate existing solutions aimed at overcoming the blockchain trilemma, as well as to conduct a comparative analysis of these solutions in order to identify the most promising technologies and their areas of application.

In the first chapter of the thesis, a detailed analysis of the blockchain trilemma and blockchain technology as such was presented. This chapter examines existing technologies that attempt to solve this problem, such as sharding, sidechains, second-layer protocols, and consensus algorithms. An assessment of their advantages and disadvantages was also conducted.

In the second chapter of the thesis, the main characteristics of modern blockchain technologies were described and compared. Attention is also paid to identifying areas where blockchain solutions can be most effectively applied. In addition, partial solutions to the trilemma based on Ethereum blockchain as a second-layer solution will be proposed, with a focus on compromise approaches that can improve the balance between security, scalability, and decentralization.

**Keywords:** blockchain, blockchain trilemma, scalability, security, decentralization, sharding, sidechains, second-layer protocols, consensus algorithms.

## АННОТАЦИЯ

Темой данной дипломной работы является анализ трилеммы блокчейна. Целью данной работы является исследование существующих решений, направленных на преодоление трилеммы блокчейна, а также проведение сравнительного анализа этих решений с целью выявления наиболее перспективных технологий и их областей применения.

В первой главе дипломной работы был представлен детальный анализ трилеммы блокчейна, а также технологии блокчейна, как таковой. В этой главе рассмотрены существующие технологии, пытающиеся решить данную проблему, такие как шардинг, сайдчейны, протоколы второго уровня и консенсусные алгоритмы. Была проведена оценка их преимуществ и недостатков.

Во второй главе дипломной работы были разобраны, описаны основные характеристики и сравнены современные блокчейн технологии. Также, внимание будет уделено выявлению областей, где блокчейн решения могут быть наиболее эффективно применены. Кроме этого, будут предложены пути частичного решения трилеммы на базе блокчейна Ethereum как решение второго уровня, с акцентом на компромиссные подходы, способные улучшить баланс между безопасностью, масштабируемостью и децентрализацией.

**Ключевые слова:** блокчейн, трилемма блокчейна, масштабируемость, безопасность, децентрализация, шардинг, сайдчейны, протоколы второго уровня, консенсусные алгоритмы.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ.....	8
1.1 Актуальность выбранной темы.....	8
1.2 Общая характеристика блокчейн технологии.....	10
1.3 Методы взаимодействия с блокчейном.....	13
1.4 Сравнительный анализ алгоритмов консенсуса.....	17
1.5 Понятие трилеммы блокчейна.....	18
1.6 Масштабируемость, децентрализация и безопасность, взаимосвязь.....	21
1.7 Технологии решения проблемы.....	23
1.8 Преимущества и недостатки решений.....	26
2 ПРАКТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ИЗ ТРИЛЕМ.....	27
2.1 Применение блокчейн технологий.....	30
2.2 Выбор одной из трилемм блокчейна.....	32
2.3 Сравнение решений проблемы масштабируемости блокчейна.....	33
2.4 Анализ ОР и ZK роллапов.....	35
2.5 Предложенное решение трилеммы блокчейна с помощью сервиса.....	38
2.6 Оценка эффективности предложенного решения.....	41
2.7 Перспективы и возможные улучшения.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	43
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	47

## **ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы технология блокчейн стала одной из самых обсуждаемых тем в сфере информационных технологий. Она привлекает внимание не только специалистов по разработке программного обеспечения и инженеров, но и представителей бизнеса, государственных структур и научных кругов. Блокчейн предоставляет новые возможности для децентрализованных систем и имеет потенциал для коренных изменений в таких областях, как финансы, логистика, медицина, управление данными и многие другие. Однако, несмотря на все свои преимущества, технология блокчейн сталкивается с серьезными проблемами, одной из которых является так называемая трилемма блокчейна.

Трилемма блокчейна описывает сложность одновременного достижения трёх ключевых целей: децентрализации, безопасности и масштабируемости. В большинстве случаев, решение на основе блокчейна может эффективно удовлетворять только два из этих аспектов, при этом жертвуя третьим. Например, системы, обеспечивающие высокую децентрализацию и безопасность, зачастую сталкиваются с проблемами масштабируемости, что ограничивает их производительность и возможности массового использования. Наоборот, блокчейны с высокой масштабируемостью могут снижать уровень децентрализации, что ставит под угрозу их устойчивость к атакам и централизованному контролю.

Изучение трилеммы блокчейна представляет собой важное направление, так как эффективное решение этой проблемы может стать ключевым шагом на пути к повсеместному внедрению блокчейн технологий. В данной дипломной работе будут подробно рассмотрены существующие методы и подходы, направленные на решение трилеммы блокчейна. Будет проведён анализ технологий, таких как шардинг, сайдчейны, протоколы второго уровня и различные алгоритмы консенсуса, с целью оценки их эффективности и применения в реальных условиях.

Актуальность темы данной работы обусловлена быстрым развитием блокчейн-экосистемы и увеличивающимся интересом к технологиям, которые могут предоставить решения для повышения производительности и надёжности децентрализованных систем. В работе также будут предложены пути частичного решения трилеммы с акцентом на гибридные подходы, которые могут улучшить баланс между масштабируемостью, безопасностью и децентрализацией.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Пользователи блокчейн технологий. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.finam.ru/publications/item/polzovateley-blokcheyn-sistem-k-2024-2026-godam-stanet-bolee-1-mlrd-chelovek-20211020-120344/>
- [2] Рынок блокчейн технологий. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://coinspot.io/technology/issledovanie-rynok-blokchejn-tehnologij-k-2025-godu-prevysit-21-mlrd/>
- [3] Buterin, V. (2017). Ethereum White Paper. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ethereum.org/en/whitepaper/>.
- [4] Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [5] Фреймворк каналов состояния. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://crypto-markets.ru/obshhaya-analitika/12-solutions/>
- [6] Mazières, D. (2016). The Stellar Consensus Protocol: A Federated Model for Internet-level Consensus. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.stellar.org/papers/stellar-consensus-protocol.pdf>.
- [7] Hackett, R., & Vigna, P. (2019). The Truth Machine: The Blockchain and the Future of Everything. [Книга]. ISBN 978-1250304168.
- [8] Antonopoulos, A. M., & Wood, G. (2018). Mastering Ethereum: Building Smart Contracts and DApps. [Книга]. ISBN 978-1491971949.
- [9] Croman, K., et al. (2016). On Scaling Decentralized Blockchains. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.inic3.org/files/Scaling2016.pdf>
- [10] Технология блокчейн простыми словами. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://skynet.ru/blog/tekhnologiya-blokchejn-prostymi-slovami/>
- [11] Основные типы алгоритмов достижения консенсуса [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.thecrypto.app/ru/knowledge/the-main-types-of-consensus-algorithms/>
- [12] Что такое трилемма блокчейна простыми словами. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ixbt.com/live/crypto/cto-takoe-trilemma-blokcheyna.html>
- [13] Технология Rollup [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://forklog.com/cryptorium/cto-takoe-tehnologiya-rollapov-rollups-i-kak-ona-pomogaet-masshtabirovat-ethereum>
- [14] Ethereum Transaction Capacity. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ethereum.org/en/developers/docs/scaling/>

- [15] Visa Performance Highlights. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://usa.visa.com/dam/VCOM/download/corporate/media/visanet-technology/aboutvisafactsheet.pdf>
- [16] Bitcoin Average Number of Transactions per Day. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://blockchain.info/charts/n-transactions>
- [17] Ethereum Daily Transactions Chart. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://etherscan.io/chart/tx>
- [18] Ethereum Average Transaction Fee. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bitinfocharts.com/comparison/ethereum-transactionfees.html>
- [19] Sharding FAQs. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ethereum.org/en/developers/docs/scaling/sharding/>
- [20] Lightning Network. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lightning.network/>
- [21] Layer 2 Scaling Solutions. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ethereum.org/en/developers/docs/layer-2-scaling/>
- [22] Ethereum 2.0 Upgrades. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ethereum.org/en/eth2/>
- [23] Пользователи блокчейн технологий. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.finam.ru/publications/item/polzovatelei-y-blokcheiyn-sistem-k-2024-2026-godam-stanet-bolee-1-mlrd-chelovek-20211020-120344/>
- [24] CoinMarketCap: Global Cryptocurrency Market Charts. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://coinmarketcap.com/charts/>
- [25] Ethereum Whitepaper. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ethereum.org/en/whitepaper/>
- [26] Ethereum Smart Contracts Statistics. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://etherscan.io/chart/contracts>
- [27] Децентрализованные финансы (DeFi). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.investopedia.com/decentralized-finance-defi-5113835>
- [28] DeFi Pulse Metrics. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://defipulse.com/>
- [29] Блокчейн в управлении цепочками поставок. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ibm.com/blockchain/supply-chain>
- [30] TradeLens от IBM и Maersk. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tradelens.com/>
- [31] Блокчейн в образовании: возможности и вызовы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.unesco.org/en/education/blockchain>



- [32] Отчет о размере и доле рынка блокчейн-технологий, 2020–2025 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/blockchain-technology-market-90100890.html>
- [33] Венчурные инвестиции в блокчейн достигли рекордного уровня. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.reuters.com/technology/venture-capital-investment-blockchain-hits-record-high-2021-07-20/>
- [34] Глобальное блокчейн-исследование Deloitte 2020 года. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/topics/understanding-blockchain-potential/global-blockchain-survey.html>
- [35] Lightning Network Documentation. – Режим доступа: <https://lightning.network/>
- [36] ZK Rollups Overview. – Режим доступа: <https://ethereum.org/en/developers/docs/scaling/zk-rollups/>
- [37] Трилемма блокчейна. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/27963/Conf-TehStiint-UTM-StudMastDoct-2024-V1-p290-293.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [38] Architecting software concurrency [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [http://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/10077/ComputerScienceJournal\\_Moldova\\_N1-2011\\_p92-108.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/10077/ComputerScienceJournal_Moldova_N1-2011_p92-108.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [39] Analiza unilizării tehnologiei eye tracking [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/19114/Cernei-Irina-FCIM-TI-2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y>