

## **Практическая реализация децентрализованной IoT-системы на базе IOTA Tangle и IPFS: сравнительный анализ архитектур хранения данных**

**Зинченко А.С<sup>1</sup>**

**Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Ананченко И. В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Университет ИТМО

andrey@zinchenko-s.ru

### **Введение**

Рост числа устройств Интернета вещей ведёт к экспоненциальному увеличению объёмов телеметрии и обостряет проблемы масштабируемости и стоимости централизованных систем хранения данных [1–3]. Блокчейн-технологии и распределённые файловые системы активно исследуются как основа для децентрализованного управления IoT-данными [4–6], однако сравнительный анализ архитектур в единой экспериментальной среде остаётся актуальной задачей. Цель работы — практическая реализация децентрализованной IoT-системы и сравнительный анализ трёх архитектур хранения по задержкам и совокупной стоимости владения (ТСО).

### **Основная часть**

Разработана IoT-система сбора данных на базе Raspberry Pi 5, выступающего в роли edge-шлюза, с передачей данных в распределённое хранилище IPFS (Pinata) и реестр IOTA Tangle для верификации целостности. Веб-интерфейс мониторинга реализован на TypeScript/Node.js с использованием шаблона Publisher–Subscriber (Server-Sent Events) и библиотеки Chart.js для визуализации временных рядов.

В единой инфраструктуре исследованы три архитектуры: централизованная (облачная СУБД и объектное хранилище), гибридная (edge+IPFS) и полностью децентрализованная (IOTA+IPFS). Для каждой рассчитывалась ТСО на горизонте трёх лет с учётом CAPEX и OPEX. Экспериментально получен цикл обработки 8–23 с при интервале опроса 60 с, что приемлемо для нестрогих сценариев мониторинга. Расчёты показали, что централизованная архитектура при масштабе 100 устройств формирует ТСО  $\approx 862247$  руб., гибридная edge+IPFS  $\approx 303392$  руб., децентрализованная IOTA+IPFS  $\approx 335133$  руб., что соответствует снижению на 61–65% относительно базового варианта.

### **Выводы**

Гибридные и децентрализованные архитектуры обеспечивают снижение ТСО без критического ухудшения временных характеристик [1, 3, 5-7]. При небольшом числе устройств и жёстких требованиях к задержкам целесообразны централизованные решения; при росте до сотен и тысяч узлов оправдан переход к гибридной или децентрализованной модели. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании масштабируемых инфокоммуникационных систем.

## Литература

1. Haque E. U. et al. Performance enhancement in blockchain based IoT data sharing using lightweight consensus algorithm //Scientific reports. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 26561.
2. Taheri N., Jamali S., Esmaeili M. Achieving performability and reliability of data storage in the internet of things //International Journal of Engineering and Manufacturing. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 12.
3. Maftai A. A. et al. Massive data storage solution for IoT devices using blockchain technologies //Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 3. – С. 1570.
4. Kim H., Heo G., Doh I. Role-based federated learning exploiting IPFS for privacy enhancement in IoT environment //Computer Networks. – 2025. – Т. 263. – С. 111200.
5. Haque E. U. et al. A scalable blockchain based framework for efficient IoT data management using lightweight consensus //Scientific Reports. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 7841.
6. Ayoade G. et al. Decentralized IoT data management using blockchain and trusted execution environment //2018 IEEE international conference on information reuse and integration (IRI). – IEEE, 2018. – С. 15-22.
7. Wang J. et al. Blockchain-based data storage mechanism for industrial internet of things //Intelligent Automation and Soft Computing. – 2020. – Т. 26. – №. 5. – С. 1157-1172.