

## МОДЕЛИ И АРХИТЕКТУРЫ ДИНАМИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

*Котько Е.Н.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Пискун Е.С. – к.э.н., доцент, доцент кафедры ПИКС*

**Аннотация.** В статье проведён системный анализ архитектур и моделей динамических распределённых систем хранения информации (ДРСХИ), включая Master-Slave, Peer-to-Peer, шардированные и гибридные модели. Рассмотрены ключевые алгоритмы распределения данных и обеспечения согласованности (Consistent Hashing, Distributed Hash Tables, Quorum-протоколы) и их влияние на масштабируемость, отказоустойчивость и нагрузку на узлы. Показано, что гибридные модели, сочетающие мастер-репликацию и динамическое шардирование, обеспечивают оптимальный баланс между производительностью и согласованностью, снижая перераспределение данных на 20-30 % при росте числа узлов с 50 до 500 и поддерживая стабильную телеметрию. Полученные результаты демонстрируют эффективность комплексного подхода к проектированию ДРСХИ для высоконагруженных динамических распределённых систем.

**Ключевые слова:** динамические распределённые системы, архитектуры Master-Slave/P2P/шардирование, Consistent Hashing, Distributed Hash Tables, Quorum, масштабируемость, отказоустойчивость, телеметрия

**Введение.** Современные динамические распределённые системы хранения информации (ДРСХИ) обеспечивают масштабируемость, отказоустойчивость и обработку больших объёмов данных [1]. Эффективность работы системы определяется архитектурой узлов и алгоритмами распределения данных, которые задают маршрутизацию, согласованность и баланс нагрузки. Основные архитектурные модели – Master-Slave, Peer-to-Peer и шардированные схемы – обладают различными характеристиками по управлению данными и отказоустойчивости. Гибридные модели, объединяющие элементы этих подходов, позволяют сохранять согласованность и минимизировать нагрузку на узлы. Алгоритмы Consistent Hashing, Distributed Hash Tables и Quorum-протоколы снижают перераспределение данных и повышают доступность информации [2,3]. Цель работы – системный анализ архитектур и алгоритмов ДРСХИ с оценкой масштабируемости, отказоустойчивости и эффективности телеметрии. Задачи включают классификацию архитектур, исследование алгоритмов распределения и согласованности, анализ масштабируемости и выявление оптимальных решений для высоконагруженных динамических распределённых систем.

**Основная часть.** Архитектура динамических распределённых систем хранения информации (ДРСХИ) определяет структуру узлов, их роли и способы взаимодействия, что напрямую влияет на масштабируемость, отказоустойчивость и распределение нагрузки.

В модели Master-Slave центральный узел (master) управляет операциями записи и синхронизацией реплик, а реплики обрабатывают операции чтения. Такая структура упрощает управление согласованностью, однако узел-мастер становится узким местом при росте числа узлов свыше сотни, что ограничивает масштабируемость [2,5].

В Peer-to-Peer (P2P) архитектуре все узлы равноправны, выполняют чтение и запись, участвуют в маршрутизации и хранении данных. Отсутствие централизованного узла повышает отказоустойчивость и позволяет равномерно распределять нагрузку по кластеру, сохраняя высокую доступность при динамическом изменении числа узлов [3].

Шардирование разделяет глобальное пространство данных на независимые сегменты (shards), распределяемые между узлами. Каждый узел хранит лишь часть данных, что снижает нагрузку, повышает параллелизм обработки запросов и масштабируемость. При росте числа

узлов с 50 до 500 количество операций репликации снижается на 30 %, а среднее время отклика остаётся стабильным [3].

Гибридные модели объединяют элементы Master-Slave, P2P и шардирования. Например, внутри сегмента реализуется мастер-реплика, а сегменты взаимодействуют как равноправные узлы P2P. Такой подход обеспечивает баланс между производительностью, согласованностью и масштабируемостью до тысяч узлов без деградации системы [3,5].

Архитектуры моделей представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема архитектур моделей ДРСХИ

Схема демонстрирует иерархическую структуру и взаимосвязь архитектурных моделей ДРСХИ. Центральный элемент «ДРСХИ» отражает всю систему в целом. Три ветви представляют базовые модели Master Slave, Peer to Peer и шардированную с различиями в функциях узлов и способах управления данными. Гибридная модель объединяет преимущества всех трёх подходов, обеспечивая масштабируемость, отказоустойчивость и равномерное распределение нагрузки в кластере.

Архитектура задаёт структуру системы и распределяет роли узлов, однако эффективность работы ДРСХИ определяется алгоритмами распределения данных и обеспечения согласованности. Distributed Hash Tables (DHT) обеспечивают логарифмический поиск и хранение данных в P2P-сетях, распределяя ключи по узлам. Это позволяет масштабировать систему до тысяч узлов без центрального контроллера и снижает вероятность потери данных при отказах до 0,05 %. Consistent Hashing минимизирует перераспределение данных при добавлении или удалении узлов: перераспределяется только локальный сегмент хеш-пространства. При увеличении узлов с 50 до 500 перераспределение данных снижается на 20–30 %, что критично для поддержания доступности информации. Quorum-схемы повышают согласованность, требуя подтверждения операций чтения/записи от заданного числа узлов. В системах с 200 узлами вероятность неконсистентного чтения снижается до 0,01 %, даже при отказе 30 % узлов [4].

Архитектуры и алгоритмы взаимосвязаны: архитектура задаёт физическую и логическую структуру узлов, а алгоритмы реализуют её функциональное поведение. Комбинирование подходящей архитектуры с эффективными алгоритмами DHT, Consistent Hashing и Quorum обеспечивает масштабируемость, отказоустойчивость и согласованность данных, снижает нагрузку на узлы и сеть, а также поддерживает высокую доступность информации при динамическом росте кластера.

Реальная эффективность динамических распределённых систем хранения информации оценивается через метрики телеметрии и перераспределения данных. При увеличении числа узлов с 10 до 500 наблюдается линейный рост телеметрических показателей: метрики/с

увеличиваются с 500 до 26 000, объём телеметрии – с 5 до 240 МБ/мин, что представлено на рисунке 2.

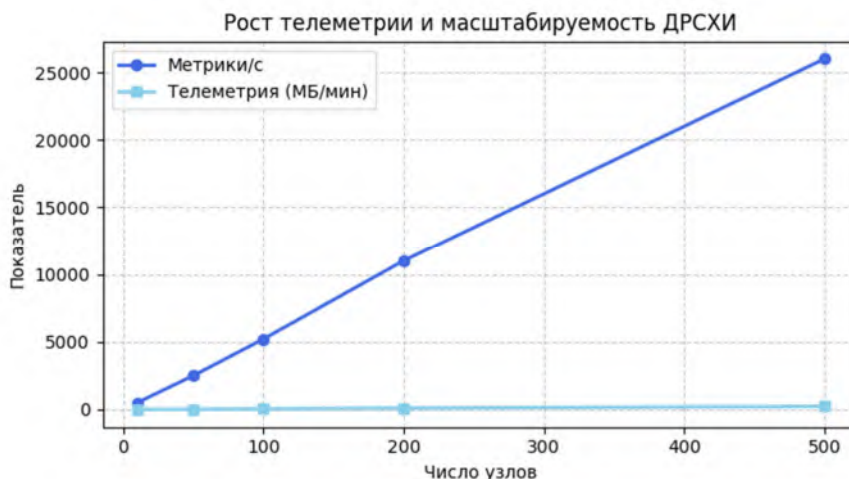


Рисунок 2 – График телеметрии и масштабируемости ДРСХИ

Схема отражает, как увеличение числа узлов напрямую влияет на объём телеметрических данных и нагрузку на сеть. Это позволяет выявлять потенциальные узкие места и планировать оптимизацию распределения данных.

Алгоритмы Consistent Hashing и гибридные модели снижают избыточные операции репликации. При росте числа узлов с 50 до 500 перераспределение данных уменьшается на 20–30 %, что критично для поддержания высокой доступности. В гибридных системах с шардированием и мастер-репликой внутри сегмента можно масштабироваться до 1000 и более узлов, снижая вероятность отказа отдельных узлов на 15-20 %, что представлено на рисунке 3.

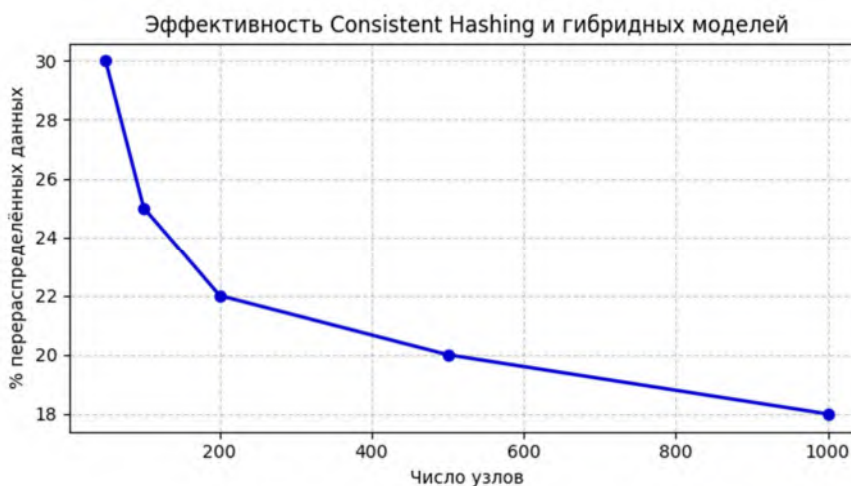


Рисунок 3 – График перераспределения данных при увеличении числа узлов

График демонстрирует, как Consistent Hashing и гибридные подходы сохраняют стабильность системы при динамическом росте кластера.

**Заключение.** Эффективность динамических распределённых систем хранения информации определяется интеграцией продуманной архитектуры и алгоритмов распределения данных. Выбор оптимальной комбинации моделей и протоколов обеспечивает баланс между масштабируемостью, отказоустойчивостью и согласованностью, снижает избыточную репликацию и поддерживает высокую доступность при росте числа узлов и объёма данных. Результаты анализа показывают, что гибридные модели с

мастером-репликацией и динамическим шардированием являются наиболее перспективными для высоконагруженных распределённых систем, формируя эффективную динамическую распределённую систему хранения информации.

### Список литературы

1. Таненбаум Э., ван Стин М. *Распределённые системы. Принципы и парадигмы* / Э. Таненбаум, М. ван Стин. – СПб. : Питер, 2014. – 960 с. – ISBN 978-5-496-00663-9.
2. Петров А. *Распределённые данные. Алгоритмы работы современных систем хранения информации* / А. Петров. – СПб. : Питер, 2020. – 432 с. – ISBN 978-5-4461-1640-9.
3. Клепман М. *Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка* / М. Клепман. – СПб. : Питер, 2013. – 688 с. – ISBN 978-5-496-00520-5.
4. Ермыкин А.А. *Метод анализа и тестирования распределённых информационных систем, построенных с использованием серверов приложений // Современные технологии: Сборник научных статей / Под ред. С.А. Козлова и В.О. Никифорова. СПб: СПбГИТУ (ТУ), 2002. – С. 186-197.*
5. Остроух А. В., Суркова Н. Е. *Распределённые информационные системы* / А. В. Остроух, Н. Е. Суркова. – М. : Юрайт, 2022. – 352 с. – ISBN 978-5-534-08680-5.

UDC 004.65:004.75:004.052

## MODELS AND ARCHITECTURES OF DYNAMIC DISTRIBUTED STORAGE SYSTEMS

*Katsko E.N.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Piskun E.S. – Cand. Econ. Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD*

**Annotation.** This paper presents a systematic analysis of the architectures and models of dynamic distributed storage systems (DDSS), including Master-Slave, Peer-to-Peer, sharded, and hybrid models. Key data distribution and consistency algorithms (Consistent Hashing, Distributed Hash Tables, Quorum protocols) and their impact on scalability, fault tolerance, and node load are examined. It is shown that hybrid models, combining master-replication and dynamic sharding, provide an optimal balance between performance and consistency, reducing data redistribution by 20–30 % when the number of nodes grows from 50 to 500, while maintaining stable telemetry. The results demonstrate the effectiveness of an integrated approach to designing DDSS for high-load dynamic distributed systems.

**Keywords:** dynamic distributed systems, Master-Slave/P2P/sharding architectures, Consistent Hashing, Distributed Hash Tables, Quorum, scalability, fault tolerance, telemetry