

Семикина Ольга Алексеевна

Магистрант

Направление: Информатика и вычислительная техника

Магистерская программа: Информационные системы

**Математическое моделирование и разработка архитектурных методов
повышения надежности распределенных банковских систем**

Аннотация. Разработана марковская модель каскадных перегрузок в распределенных системах. На основе анализа модели предложен комплекс решений: горизонтальное шардирование, паттерн Bulkhead и Anycast-маршрутизация. Численный эксперимент подтвердил повышение системного коэффициента готовности с 0,9506 до 0,9996.

Ключевые слова: распределенные системы, марковские цепи, каскадный сбой, структурная оптимизация, ячеистая изоляция, шардирование, коэффициент готовности.

Современные финтех-платформы функционируют в условиях непрерывных динамических нагрузок. Классические методы теории надежности, предполагающие независимость отказов элементов, неспособны адекватно описать процессы в крупномасштабных банковских РАС. Локальный сбой одного вычислительного узла мгновенно изменяет маршруты движения платежей и перераспределяет трафик на соседние компоненты, провоцируя лавинообразный каскадный эффект [2]. В условиях жестких требований Банка России к операционной надежности и дефицита импортного оборудования, экстенсивное аппаратное резервирование становится неэффективным. Возникает необходимость в создании математической модели каскадных процессов и выработке на её основе новых архитектурных методов защиты ИТ-инфраструктуры.

1. Марковская модель каскадных процессов в РАС

Для формализации динамики распределенных аварий применена концепция

«нагрузка — несущая способность». Каждый узел графа характеризуется случайной нагрузкой $L_i(t)$ и предельной емкостью C_i . При случайном отказе узла v_{fail} его текущий поток транзакций мгновенно переносится на соседние исправные узлы, что скачкообразно увеличивает условную вероятность их лавинообразного перегруз [1]:

$$P(L_k^{\text{новый}} \geq C_k \vee \text{отказ } v_{fail}) \gg P(L_k^{\text{старый}} \geq C_k)$$

На основе пространственного характера распределения нагрузок функционирование РАС описано как марковский случайный процесс с непрерывным временем. Выделено 4 базовых состояния системы:

- S_0 — Штатное функционирование (полная доступность сервисов).
- S_1 — Локальный сбой (единичный узел отключен, трафик успешно перенаправлен).
- S_2 — Частичная деградация (избыточный трафик вызвал цепную реакцию перегрузок).
- S_3 — Системный коллапс (полный останов процессинга и межбанковских расчетов).

Динамический баланс системы описывается составленной системой дифференциальных уравнений Колмогорова [5]:

$$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda_{01}P_0 + \mu_{10}P_1$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \lambda_{01}P_0 - (\lambda_{12} + \mu_{10})P_1 + \mu_{21}P_2$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \mu_{21})P_2$$

$$\frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2$$

С учетом условия нормировки ($P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1$) для стационарного режима ($\frac{dP}{dt} = 0$) рассчитывается целевая функция — интегральный системный коэффициент готовности РАС [3]:

$$K_r = P_0 + P_1$$

Интенсивность перехода системы в режим деградации λ_{12} напрямую зависит от структуры графа сети. Оценка влияния конкретной связи a_{ik} на общую надежность

осуществляется через вычисление частной производной [4]:

$$\frac{dK_r}{da_{ik}} = \frac{\frac{dK_r}{d\lambda_{12}} * d\lambda_{12}}{da_{ik}}$$

2. Разработка структурно-топологических методов защиты

На основе анализа чувствительности марковской модели разработан комплекс из трех взаимосвязанных инженерно-технических предложений, направленных на снижение параметров λ_{12} и λ_{23} за счет изменения геометрии внутренних связей:

1. Декомпозиция Stateful-слоя баз данных. Единая распределенная СУБД подвергается горизонтальному шардированию по идентификаторам клиентов. При аварии одного физического сервера из строя выходит не вся система, а строго изолированный сегмент, обслуживающий до 5% клиентской базы.

2. Внедрение паттерна ячеистой изоляции (Bulkhead). Микросервисная инфраструктура серверов приложений разбивается на автономные виртуальные технологические ячейки. Избыточная волна нагрузки dL при аварии физически запирается внутри одной ячейки, не вызывая веерного отключения соседних элементов [6, с.154].

3. Развертывание Anycast-маршрутов. Организуется динамическое обходное веерное распределение трафика к наименее нагруженным периферийным узлам в моменты фиксации пиковых нагрузок.

3. Численный эксперимент и оценка эффективности

Для сравнительного анализа исходной (монолитной) и предложенной (ячеистой) топологий РАС проведен численный эксперимент. Зафиксированы базовые параметры: интенсивность первичных сбоев $\lambda_{01} = 0.02 \text{ ч}^{-1}$, среднее время восстановления — от 0.5 до 2 часов.

Из-за наличия узлов-концентраторов (хабов) в исходной архитектуре интенсивность развития каскада составляла $\lambda_{12} = 0.8$, а интенсивность коллапса $\lambda_{23} = 1.5$. Внедрение разработанного комплекса решений и Anycast-рассеивания трафика позволило перевести каскадные процессы в субкритический сценарий, снизив интенсивности переходов до значений $\lambda_{12} = 0.04$ и $\lambda_{23} = 0.1$.

Расчет финальных вероятностей стационарного режима уравнений

Колмогорова показал, что интегральный коэффициент готовности РАС вырос с 0,9506 до 0,9996, практически полностью нивелируя риск наступления системного коллапса инфраструктуры банка [6].

В статье предложен и математически обоснован переход от пассивного аппаратного резервирования к активному управлению топологией банковских распределенных систем. Разработанная непрерывная марковская модель связывает пространственную геометрию связей графа с временными параметрами надежности. Апробация предложенного комплекса решений (шардирование, Bulkhead, Anycast) показала высокую инженерную эффективность, обеспечивая строгое выполнение нормативов Банка России по непрерывности финансовых процессов.

Литература

1. Антонов А.В., Никулин М.С., Никулин А.М., Чепурко В.А. Теория надежности. Статистические модели: учебное пособие. – М.: ИНФРА-М, 2022. 576 с.
2. Дмитрийчук Д.И., Дёмин А.Ю. Проектирование микросервисной архитектуры в промышленной системе мониторинга технических устройств / Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15–17 апреля 2025 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2025. С. 497-500.
3. Золкин А.Л., Мунистер В.Д. Организация, принципы построения и функционирования компьютерных сетей: учебник для вузов. – СПб.: Лань, 2025. 212 с.
4. Фёдоров В.П., Нагоркин М.Н. Прикладные методы теории надежности технических объектов и технологических систем: учебное пособие. – М.; Волгоград: Инфра-Инженерия, 2022. 288 с.
5. Михеев В.С. Математическое моделирование информационных потоков в условиях цифровой трансформации // Экономика и управление. 2026. № 5. С. 659-671.
6. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Построение распределенных систем на базе WebSocket: учебное пособие для вузов. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2026. 216 с.