

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и автоматического управления

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С
НЕНАДЕЖНЫМИ ПРИБОРАМИ И ЗАДЕРЖКОЙ
ИНФОРМАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 271 группы
направления 09.04.01 — Информатика и вычислительная техника
факультета КНиИТ
Оксина Артема Александровича

Научный руководитель

к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

Заведующий кафедрой

к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

Саратов 2026

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Современные информационные, вычислительные и телекоммуникационные системы характеризуются высокой сложностью структуры, большим количеством взаимосвязанных узлов и непрерывным обменом потоками данных. Эффективность функционирования подобных сетей массового обслуживания напрямую зависит от качества распределения потоков между узлами сети, а также от устойчивости систем обслуживания к перегрузкам и отказам оборудования.

Классические методы анализа сетей массового обслуживания, основанные на теории Джексона и методах оптимизации маршрутных матриц, как правило, предполагают фиксированные параметры надежности систем обслуживания. Однако в реальных распределенных системах интенсивности отказов приборов обслуживания существенно зависят от текущей загрузки узлов сети. Увеличение интенсивности потоков приводит к росту нагрузки на оборудование, что повышает вероятность возникновения отказов и ухудшает устойчивость функционирования сети в целом.

Кроме того, поддержание высокой надежности систем обслуживания требует дополнительных затрат, связанных с восстановлением оборудования, резервированием ресурсов и увеличением интенсивности ремонтных работ. В условиях ограниченных эксплуатационных ресурсов возникает необходимость поиска компромисса между производительностью сети, надежностью функционирования и стоимостью восстановления систем обслуживания.

В связи с этим актуальной задачей является разработка методов анализа и оптимизации сетей массового обслуживания, учитывающих взаимосвязь между маршрутизацией потоков, загрузкой узлов сети, интенсивностями отказов и стоимостью восстановления оборудования.

Объектом исследования является открытая экспоненциальная сеть массового обслуживания с ненадежными приборами.

Предметом исследования являются методы адаптивной оптимизации маршрутных матриц с учетом отказов и стоимости восстановления систем обслуживания.

В работе предлагается модифицированный подход к построению маршрутных матриц, в котором интенсивности отказов и восстановления зависят от текущей загрузки систем обслуживания, а в целевую функцию оптимизации

ции дополнительно вводится критерий стоимости восстановления приборов. Такой подход позволяет исследовать компромисс между производительностью сети, надежностью функционирования и эксплуатационными затратами.

Цель бакалаврской работы — разработать и исследовать метод анализа сети массового обслуживания с ненадежными приборами и задержкой информации

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. Проанализировать существующие методы исследования сетей массового обслуживания;
2. Разработать модифицированный критерий оптимальности маршрутной матрицы;
3. Разработать алгоритм адаптивной оптимизации маршрутной матрицы;
4. Учесть стоимость восстановления приборов в процессе маршрутизации потоков;
5. Разработать программную реализацию рассматриваемого метода;
6. Изучить алгоритм обучения с подкреплением;
7. Провести вычислительные эксперименты и анализ полученных результатов.

Методологические основы исследования сети массового обслуживания с ненадежными приборами и задержкой информации представлены в работах И. Е. Тананко, Ю. И. Митрофанова, Е. С. Рогачко, Н. П. Фокина.

Практическая значимость бакалаврской работы. Разработанный метод может быть применен для анализа и оптимизации реальных распределенных систем, в которых надежность оборудования и стоимость его обслуживания существенно влияют на эффективность функционирования сети.

Структура и объем работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка использованных источников и приложения с кодом программы. Общий объем работы — 76 страниц, из них 60 страницы — основное содержание, включая 14 рисунков, список использованных источников информации — 27 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Теория систем массового обслуживания» по-

священ рассмотрению основных понятий теории систем массового обслуживания и математических моделей СМО типа $M/M/k$.

В подразделе 1.1 приведено описание систем массового обслуживания, рассмотрены принципы функционирования СМО, особенности потоков заявок и процессов обслуживания, а также роль марковских случайных процессов при анализе систем обслуживания.

Подраздел 1.2 посвящен математической модели системы массового обслуживания типа $M/M/k$. В нем рассмотрены условия существования стационарного режима, приведены основные вероятностные характеристики системы, а также формулы для вычисления среднего числа заявок, времени пребывания требований в системе и других показателей эффективности функционирования СМО.

Второй раздел «Теория сетей массового обслуживания» посвящен рассмотрению структуры и характеристик сетей массового обслуживания, а также описанию модели сети с ненадежными приборами и задержкой информации.

В подразделе 2.1 приведено описание сетей массового обслуживания, рассмотрены основные типы СМО, особенности их функционирования и области применения. Также описаны свойства открытых и замкнутых сетей массового обслуживания.

Подраздел 2.2 посвящен основным характеристикам сетей массового обслуживания. В нем рассмотрены маршрутные матрицы, вероятности переходов между узлами сети, условия существования стационарного режима, а также вероятностные характеристики состояний сети и методы вычисления интенсивностей потоков требований.

В подразделе 2.3 приведено описание модели открытой сети массового обслуживания с ненадежными приборами и задержкой информации. Рассмотрены процессы отказов и восстановления приборов обслуживания, особенности адаптивного изменения маршрутной матрицы, а также влияние задержек наблюдения и принятия решений на функционирование сети обслуживания.

Третий раздел «Метод анализа открытых сетей массового обслуживания с ненадежными приборами и задержкой информации» посвящен разработке метода анализа открытой сети массового обслуживания

с ненадежными приборами, а также построению метода оптимального управления маршрутными матрицами с учетом задержек информации.

В подразделе 3.1 сформулирована постановка задачи анализа открытой сети массового обслуживания, состоящей из систем типа М/М/2 с одним надежным и одним ненадежным прибором обслуживания. Рассмотрены параметры потоков требований, интенсивности отказов и восстановления приборов, а также введены параметры задержек информации τ и Δ , описывающие задержку принятия решений и задержку обновления информации о состоянии сети.

В подразделе 3.2 приведено решение задачи оптимального управления маршрутными матрицами сети обслуживания. Рассмотрены выражения для среднего времени пребывания требований в системах М/М/1 и М/М/2:

$$u = \frac{1}{\mu - \lambda},$$

$$u = \frac{4\mu}{4\mu^2 - \lambda^2}.$$

На основе данных выражений получены формулы для определения интенсивностей входящих потоков:

$$\lambda^{(1)} = \mu - \frac{1}{U},$$

$$\lambda^{(2)} = \sqrt{4\mu \left(\mu - \frac{1}{U} \right)}.$$

Для построения оптимальной маршрутной матрицы использован метод синтеза маршрутных матриц, основанный на минимизации функции:

$$V(\Theta) = \sum_{i=0}^L \left(\omega_i - \sum_{j=0}^L \omega_j \theta_{ji} \right)^2.$$

В подразделе также описан итерационный метод оптимизации маршрутной матрицы с использованием матриц направлений и последовательного формирования множества возмущенных маршрутных матриц.

Подраздел 3.3 посвящен анализу ненадежной системы и сети обслуживания. В нем рассмотрены марковские процессы, описывающие изменение

состояний приборов обслуживания и параметров управления потоками требований. Построена система линейных уравнений для определения стационарных вероятностей состояний системы с учетом задержек информации.

Получены выражения для вероятностей состояний работоспособности приборов:

$$P(n_i = 2) = \pi_i(2, 2) + \pi_i(1, 2),$$

$$P(n_i = 1) = \pi_i(2, 1) + \pi_i(1, 1).$$

Также рассмотрено вычисление стационарных вероятностей состояний сети:

$$\pi(a, n) = \pi_1(a_1, n_1) \cdot \dots \cdot \pi_L(a_L, n_L),$$

и среднего времени пребывания требований в сети:

$$U_d = \sum_{(a,n)} \pi(a, n) W(a, n).$$

Полученные вероятностно-временные характеристики позволяют анализировать влияние отказов приборов и задержек информации на эффективность функционирования сети массового обслуживания и обеспечивают возможность построения оптимальных маршрутных матриц для различных состояний сети.

Четвертый раздел «Метод анализа открытых сетей массового обслуживания с учетом адаптации к отказам узлов» посвящен разработке адаптивного метода анализа сети массового обслуживания, учитывающего зависимость интенсивностей отказов и восстановления приборов от текущей загрузки систем обслуживания, а также учет стоимости восстановления оборудования при оптимизации маршрутной матрицы.

В подразделе 4.1 рассмотрена адаптивная модель отказов и восстановления приборов обслуживания. В отличие от классических моделей, в которых интенсивности отказов и восстановления считаются фиксированными, в разработанном методе данные параметры зависят от текущей загрузки системы:

$$\psi_i = \frac{\lambda_i}{k_i \mu_i}.$$

Интенсивность отказов определяется выражением:

$$\alpha_i = \alpha_i^{(0)} + \delta\psi_i,$$

где $\alpha_i^{(0)}$ — базовая интенсивность отказов, δ — коэффициент чувствительности отказов к увеличению нагрузки.

Для компенсации роста интенсивности отказов введена адаптивная интенсивность восстановления:

$$\beta_i = \beta_i^{(0)} + \kappa(\alpha_i - \alpha_i^{(0)}),$$

где κ — коэффициент компенсации.

Также рассмотрено выражение для средней доступности прибора:

$$A_i = \frac{\beta_i}{\alpha_i + \beta_i}.$$

В подразделе 4.2 выполнен учет стоимости восстановления приборов обслуживания. Показано, что увеличение интенсивности восстановления требует дополнительных вычислительных и эксплуатационных ресурсов. Для оценки затрат введена функция стоимости восстановления:

$$C_i^{rec} = \rho_i(\beta_i - \beta_i^{(0)}),$$

где ρ_i — коэффициент стоимости восстановления прибора.

В подразделе 4.3 проведен анализ вероятностей состояний сети с учетом адаптивной маршрутизации. Рассмотрено влияние изменения загрузки сети на вероятности состояний работоспособности приборов обслуживания. Построены вероятностные характеристики сети с учетом зависимости интенсивностей отказов и восстановления от текущей маршрутной матрицы.

В подразделе 4.4 разработан модифицированный критерий оптимальности маршрутной матрицы. В отличие от классического критерия, учитывающего только балансировку потоков требований, в новый критерий дополнительно включены:

- штраф за снижение доступности приборов;
- штраф за перегрузку систем обслуживания;

— стоимость восстановления приборов.

Модифицированная функция оптимизации имеет вид:

$$V_{cost}(\Theta) = \sum_{i=1}^L \left(\omega_i - \sum_{j=0}^L \omega_j \theta_{ji} \right)^2 + \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \theta_{ij} \left(1 - \frac{\beta_j}{\alpha_j + \beta_j} \right) + \\ + \sum_{i=1}^L \left(\frac{\lambda_i}{k\mu_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^L \sum_{j=0}^L \theta_{ij} \rho_i (\beta_i - \beta_i^{(0)}),$$

В подразделе 4.5 рассмотрен алгоритм оптимизации маршрутной матрицы с использованием модифицированного критерия оптимальности. Алгоритм основан на итерационном изменении маршрутной матрицы и выборе направления минимизации целевой функции. Для каждого состояния сети вычисляются интенсивности потоков, загрузки систем обслуживания, вероятности отказов и стоимость восстановления приборов.

Подраздел 4.6 посвящен разработке алгоритма итеративной оптимизации маршрутной матрицы с адаптацией к отказам узлов и учетом стоимости восстановления приборов. В процессе работы алгоритма выполняется последовательное перераспределение потоков требований между системами обслуживания с целью достижения компромисса между:

- производительностью сети;
- надежностью функционирования;
- стоимостью восстановления оборудования.

Полученный адаптивный метод позволяет учитывать взаимосвязь между загрузкой систем обслуживания, вероятностью отказов приборов и стоимостью их восстановления, что обеспечивает более реалистичное моделирование функционирования распределенных сетей массового обслуживания.

Пятый раздел «Практическая реализация и тестирование методов анализа сети обслуживания» посвящен проведению вычислительных экспериментов для исследования разработанного метода адаптивной маршрутизации с учетом надежности приборов обслуживания, стоимости восстановления и задержек информации.

В разделе приведено описание исследуемой открытой сети массового обслуживания, заданы параметры потоков требований, интенсивности обслуживания, интенсивности отказов и восстановления приборов, а также рас-

смотрены три подхода к формированию маршрутных матриц: классический метод, адаптивный метод с учетом надежности и предложенный метод с учетом стоимости восстановления приборов.

Для оценки эффективности предложенного подхода выполнен сравнительный анализ маршрутных матриц и интенсивностей потоков для состояний сети

$$a = (1, 1, 1, 1),$$

$$a = (1, 1, 2, 2),$$

$$a = (2, 2, 2, 2).$$

На рисунках, отражающих данные состояния, показано изменение распределения потоков требований между системами обслуживания при переходе от классического метода к адаптивной маршрутизации и далее к методу с учетом стоимости восстановления приборов.

Проведенное исследование показало, что учет зависимости параметров отказов и восстановления от загрузки приводит к перераспределению потоков и снижению нагрузки на менее устойчивые системы обслуживания. Дополнительное включение стоимостного критерия позволяет ограничивать использование дорогостоящих узлов сети и формировать компромисс между производительностью системы, надежностью функционирования и затратами на поддержание работоспособности приборов.

Отдельно проведен анализ чувствительности разработанного метода к коэффициентам стоимости восстановления ρ_i . На графиках 1 и 2 зависимости интенсивностей потоков и среднего времени пребывания требований от параметра ρ показано, что увеличение стоимости восстановления отдельной системы приводит к постепенному исключению данной системы из маршрутизации требований и перераспределению нагрузки между остальными узлами сети.

В заключительной части раздела выполнено исследование влияния задержек информации на эффективность адаптивного управления. На графиках 3 и 4 зависимости суммарной стоимости восстановления от параметров τ и Δ показано, что увеличение задержек принятия решений и обновления информации приводит к росту эксплуатационных затрат и ухудшению качества адаптивной маршрутизации.

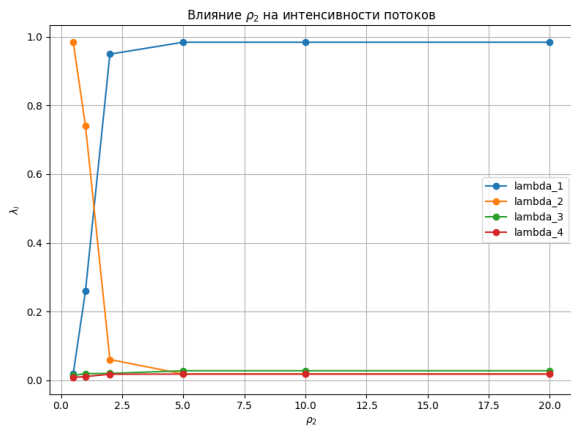


Рисунок 1 – Влияние ρ на интенсивности потоков

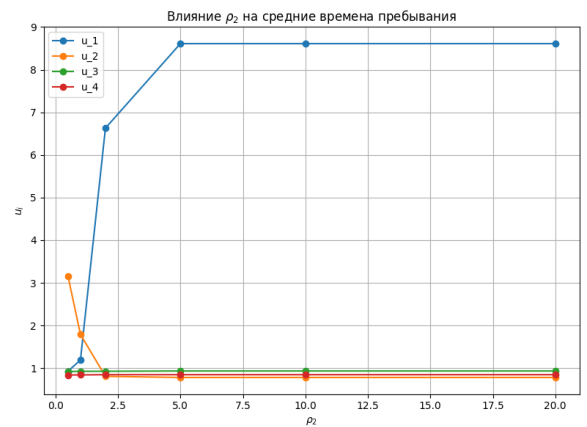


Рисунок 2 – Влияние ρ на интенсивности потоков

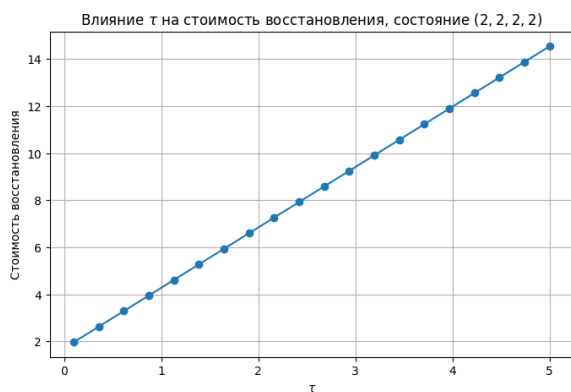


Рисунок 3 – Влияние τ на стоимость обслуживания прибора

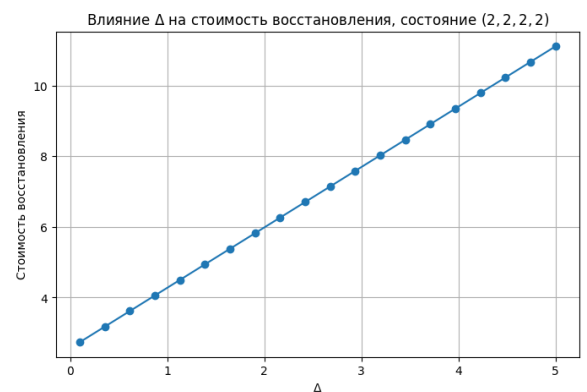


Рисунок 4 – Влияние Δ на стоимость обслуживания прибора

Полученные результаты подтверждают устойчивость разработанного метода и демонстрируют возможность его применения для анализа и оптимизации реальных сетей массового обслуживания с ненадежными приборами.

Шестой раздел «Программная реализация модели анализа сети массового обслуживания» посвящен разработке программного комплекса для анализа открытой сети массового обслуживания с ненадежными приборами, адаптивной маршрутизацией и учетом стоимости восстановления приборов обслуживания.

В разделе приведено описание структуры программной реализации, выполненной на языке Python с использованием библиотек NumPy, itertools и matplotlib. Рассмотрены основные программные модули, отвечающие за формирование маршрутных матриц, генерацию состояний сети, вычисление интенсивностей потоков требований и проведение вычислительных экспериментов.

Разработанная программная реализация позволила автоматизировать процесс анализа большого количества состояний сети, провести серию вычислительных экспериментов и подтвердить работоспособность предложенного метода адаптивной маршрутизации для сетей массового обслуживания с ненадежными приборами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы был проведен анализ открытых экспоненциальных сетей массового обслуживания с ненадежными приборами и исследованы методы оптимизации маршрутных матриц в условиях зависимости надежности систем обслуживания от текущей загрузки сети.

Были рассмотрены классические методы анализа сетей массового обслуживания, основанные на модели Джексона и использовании маршрутных матриц для распределения потоков между системами обслуживания. Показано, что традиционные подходы предполагают фиксированные параметры отказов и восстановления приборов, вследствие чего не учитывают влияние перегрузки узлов на надежность функционирования сети.

В работе предложена модификация критерия оптимальности маршрутной матрицы, основанная на учете адаптивных параметров отказов и восстановления. Интенсивности отказов систем обслуживания были представлены как функции текущей загрузки узлов сети, а интенсивности восстановления — как адаптивные параметры, компенсирующие рост отказов при увеличении нагрузки.

Дополнительно в модель был введен критерий стоимости восстановления приборов, позволяющий учитывать эксплуатационные затраты при построении маршрутной матрицы. Предложенный подход позволяет формировать компромисс между производительностью сети, надежностью функционирования и стоимостью поддержания работоспособности систем обслуживания.

В рамках работы была выполнена программная реализация модели на языке Python с использованием библиотек для численных вычислений и визуализации результатов. Реализованная программа позволила проводить вычислительные эксперименты для различных состояний сети и анализировать влияние параметров модели на процесс маршрутизации потоков.

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании и проектировании распределенных вычислительных, телекоммуникационных и производственных систем, в которых надежность оборудования и эксплуатационные затраты оказывают существенное влияние на эффективность функционирования сети.

Отдельные части бакалаврской работы были представлены на студенческой конференции ф-та КНиИТ 20 апреля 2026 г., в частности постановка и общее решение задачи адаптивного управления интенсивности восстановления ненадежных приборов систем сети массового обслуживания.

Основные источники информации:

1. Романенко, В. А. Системы и сети массового обслуживания : Учебное пособие // Самара: Изд-во Самарского университета, 2021. – 68 с.
2. Митрофанов, Ю. И, Фокина, Н. П. Анализ сетей массового обслуживания с динамическим управлением маршрутизацией // Известия Саратов. ун-та. Нов. сер. Серия Математика. Механика. Информатика. Саратов, 2007. Т. 7. № 1. С. 27 – 33.
3. Фокина, Н. П. Моделирование сетей массового обслуживания с управлением маршрутизацией // Теоретические проблемы информатики и ее приложений: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2006. № 7. С. 153 – 159.
4. Тананко, И. Е. Метод оптимизации маршрутных матриц открытых сетей массового обслуживания // Автоматика и вычислительная техника. 2002. № 4. С. 39 – 46.
5. Тананко, И. Е, Фокина, Н. П. Метод анализа ненадежной сети массового обслуживания с управлением маршрутизацией и с задержкой информации об изменении ее структуры // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ–2019): Материалы XVIII Международной конференции имени А. Ф. Терпугова. Томск: Изд-во НТЛ, 2019. С. 271 – 276.