

На правах рукописи

ПЕРЕПЕЛКИН Дмитрий Александрович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
АДАПТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ
В КОРПОРАТИВНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ**

Специальность 05.13.13. «Телекоммуникационные системы
и компьютерные сети»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2009

Работа выполнена на кафедре систем автоматизированного проектирования вычислительных средств ГОУВПО “Рязанский государственный радиотехнический университет”.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шибанов Александр Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Локтюхин Виктор Николаевич

кандидат технических наук
Гриць Валерий Матвеевич

Ведущая организация: **Государственный научно-исследовательский институт информационных технологий и телекоммуникаций (ГНИИ ИТТ) «Информика», г. Москва**

Защита состоится **16 декабря 2009 г. в 12 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 в ГОУВПО “Рязанский государственный радиотехнический университет” по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО “РГРТУ”.

Автореферат разослан «12» ноября 2009 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, Рязанский государственный радиотехнический университет.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

Телков И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время происходит бурный рост корпоративных вычислительных сетей. Необходимость обеспечения качественного обслуживания современного трафика, передаваемого через IP-сети, обуславливает высокие требования к эффективности передачи пакетов данных от отправителя к получателю. Важнейшим условием повышения конкурентоспособности предприятий в условиях рынка является внедрение новых современных информационных и сетевых технологий, различных методов ускорения маршрутизации, поддержки требуемого качества обслуживания, передачи голосового и видео трафика, повышения уровня безопасности сети и т.д. Особую важность имеет эффективная маршрутизация сообщений в условиях отказов отдельных элементов сети, всплесков трафика и локальных перегрузок.

Загрузка и пропускная способность линий связи корпоративной сети динамически меняются, что, в свою очередь, может приводить к относительно частой рассылке служебной информации об изменении маршрутов. Традиционно применяемый в корпоративных вычислительных сетях метод статической маршрутизации оказывается неэффективным. Изменения характеристик каналов связи, модификация структуры сети, включение в нее новых узлов и линий связи приводят к полному пересчету таблиц маршрутизации. Разработка новых, более эффективных алгоритмов поиска кратчайших путей позволяет повысить быстродействие корпоративных вычислительных сетей. Под ускоренной маршрутизацией понимается метод поиска оптимальных маршрутов для передачи пакетов данных от узла-отправителя к узлу-получателю в условиях динамически изменяющейся структуры сети и характеристик линий связи, позволяющий сократить трудоемкость построения таблиц маршрутизации путем частичного изменения дерева кратчайших путей за счет использования дополнительной информации о конфигурации сети.

Проблемами совершенствования методов и алгоритмов маршрутизации в вычислительных сетях занимались такие ученые, как Д. Бертсекас, Д. Гарсиа-Диас, П. Гупта, А.Б. Гольдштейн, Б.С. Гольдштейн, Д. Кантор, О.Я. Кравец, Д.В. Куракин, И.П. Норенков, А. Филипс, С. Флойд и другие. Задачу нахождения кратчайших путей в транспортной системе рассматривали в своих трудах ученые Л. Беллман, Г. Габов, С. Гудман, Е. Дейкстра, В.А. Евстигнеев, В.Н. Касьянов, Р. Сэдживик, Р. Тарьян, С. Флойд, Л. Форд, Д. Фулкерсон. Подробное описание методов поиска кратчайших путей можно найти в работах Т. Кормена, Ч. Лейзерсона и Р. Ривеста.

В современных вычислительных сетях имеет место прямая зависимость производительности сети от производительности обрабатывающих межсетевой трафик маршрутизаторов. Из-за высокой загруженности маршрутизаторов получить действительно оптимальный маршрут передачи данных довольно сложно. Большинство вычислительных сетей использует при выборе маршрута передачи критерий максимальной пропускной способности канала передачи дан-

ных. Отечественные и зарубежные вычислительные сети не используют алгоритмов маршрутизации, которые дополнительно рассчитывают информацию о возможных частичных изменениях структуры корпоративной сети. В то же время выбор маршрута, учитывающий динамику сети, может улучшить пропускную способность каналов, среднюю задержку передачи и ее вариацию.

На основании всего сказанного можно сделать вывод об актуальности выбранной темы диссертационной работы.

Цель диссертационной работы состоит в разработке методов и алгоритмов адаптивной маршрутизации для повышения эффективности функционирования корпоративных вычислительных сетей при частичных изменениях структуры сети, возникающих из-за изменения нагрузки и реальной пропускной способности каналов связи и коммутационного оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

1) выполнить анализ целей и задач маршрутизации в вычислительных сетях с пакетной обработкой информации. Провести исследование существующих адаптивных алгоритмов и протоколов маршрутизации, применяемых в корпоративных вычислительных сетях, чтобы выявить достоинства, недостатки и область их применения;

2) разработать графоаналитическую модель процесса передачи пакетов данных в корпоративных вычислительных сетях в виде задачи поиска дерева кратчайших путей на графе, с использованием метрик линий связи с учетом его частичных изменений, возникающих из-за вариации нагрузки и пропускной способности каналов связи и коммутационного оборудования;

3) разработать метод определения оптимальных маршрутов в корпоративных вычислительных сетях с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах, который позволит уменьшить трудоемкость построения таблиц маршрутизации;

4) разработать метод определения оптимальных маршрутов в корпоративных вычислительных сетях с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных перестановках маршрутов, который позволит уменьшить трудоемкость построения таблиц маршрутизации;

5) разработать адаптивный алгоритм поиска оптимальных маршрутов с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах;

6) разработать адаптивный алгоритм поиска оптимальных маршрутов с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных перестановках маршрутов;

7) разработать методики применения алгоритмов поиска оптимальных маршрутов с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах для протоколов OSPF и IGRP.

Методы исследования. Разработка и исследование проводились на основе теории графов, теории алгоритмов, теории матриц, а также компьютерного моделирования.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что впервые разработаны методы и алгоритмы адаптивной маршрутизации при условии частичного изменения структуры корпоративной вычислительной сети, которые позволяют получить меньшую трудоемкость [$O(N)$, где N – число узлов в сети] построения таблиц маршрутизации по сравнению с известными алгоритмами.

Практическая значимость. Разработанные в диссертационной работе алгоритмы поиска оптимальных маршрутов предназначены для применения в корпоративных вычислительных сетях и реализованы в виде программ, загружаемых в маршрутизаторы.

Алгоритм адаптивной маршрутизации позволяет уменьшить размерность задачи нахождения оптимальных маршрутов и сократить трудоемкость решения задачи поиска кратчайших путей с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах. Алгоритм парных перестановок маршрутов предназначен для поиска кратчайших путей с учетом частичных изменений структуры сети, который целесообразно применять в сравнительно больших корпоративных вычислительных сетях с относительно редкими изменениями значения метрик каналов связи при необходимости получения актуального дерева кратчайших путей за время, линейно зависящее от количества вершин графа.

В рамках диссертации разработан программный комплекс «Имитационное моделирование процессов маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях», реализующий разработанные алгоритмы поиска кратчайших путей. Данный программный комплекс предназначен для выполнения следующих функций:

- 1) создание и визуальное редактирование графовых моделей корпоративных вычислительных сетей;
- 2) поиск кратчайших путей на графе с использованием алгоритма адаптивной маршрутизации и алгоритма парных перестановок маршрутов;
- 3) проведение экспериментов по изменению весов ребер графа, по добавлению и удалению вершин и ребер графа с построением дерева кратчайших путей;
- 4) оценка трудоемкости разработанных алгоритмов.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается математическими обоснованиями и доказательствами, корректным использованием теоретических выводов, компьютерным моделированием, а также сравнением полученных результатов с рассчитанными параметрами.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- XII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании», НИТ-2007. 19 – 21 апреля 2007 г., г. Рязань;
- всероссийской научно-технической конференции «Информационные и телекоммуникационные технологии. Подготовка специалистов для инфокоммуникационной среды» 21 – 23 апреля 2009 г., г. Рязань.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 2 в изданиях, входящих в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в телекоммуникационной компании «Энлинк Трэйд», г. Рязань, где используются в составе комплекса диагностики и управления состоянием сети «NADT2», а также внедрены в учебный процесс ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, приложения, изложенных на 148 с. Список использованной литературы содержит 105 наименований. Текст диссертации содержит 19 таблиц и 30 рисунков.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Математическая модель процесса передачи пакетов данных в корпоративных вычислительных сетях, основанная на построении дерева кратчайших путей в графе, с использованием метрик линий связи, которая может быть использована при реализации различных алгоритмов маршрутизации.

2. Метод определения оптимальных маршрутов в корпоративных вычислительных сетях с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах, который позволяет уменьшить трудоемкость построения таблиц маршрутизации.

3. Метод определения оптимальных маршрутов в корпоративных вычислительных сетях с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных перестановках маршрутов, который позволяет уменьшить трудоемкость построения таблиц маршрутизации.

4. Алгоритм поиска оптимальных маршрутов с учетом частичных изменений структуры корпоративной сети на основе дополнительной информации о возможных парных переходах, который позволяет получить меньшую трудоемкость поиска оптимальных маршрутов [$O(N)$, где N – число узлов в сети], по сравнению с известными алгоритмами поиска.

5. Алгоритм парных перестановок маршрутов с учетом частичных изменений структуры сети на основе дополнительной информации о возможных

парных перестановках, имеющий меньшую трудоемкость поиска оптимальных маршрутов [$O(N)$, где N – число узлов в сети], по сравнению с известными алгоритмами поиска.

6. Методики применения адаптивных алгоритмов поиска оптимальных маршрутов с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах для протоколов OSPF и IGRP, позволяющие уменьшить трудоемкость поиска оптимальных маршрутов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбора темы диссертации, формулируются цель исследований, научная новизна и практическая ценность основных результатов.

В первой главе «Основные принципы маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях» формулируются цели и задачи маршрутизации в вычислительных сетях с пакетной передачей информации.

Проведен анализ алгоритмов маршрутизации по способу определения кратчайших маршрутов. Выделены одношаговый и многошаговый подходы к нахождению оптимальных путей передачи данных. Проведена классификация методов маршрутизации. В зависимости от применяемого алгоритма и способа рассылки топологической информации известные методы маршрутизации разделены на следующие группы: простая маршрутизация, статическая маршрутизация, квазистатическая маршрутизация, локальная адаптивная маршрутизация, централизованная адаптивная маршрутизация, гибридная адаптивная маршрутизация, распределенная адаптивная маршрутизация, иерархическая маршрутизация. Для методов каждой группы указаны способы сбора и распределения информации о достижимости узлов сети, способы вычисления маршрутной информации и степень адаптируемости методов к изменениям топологии сети и пропускных способностей линий связи.

Приведено описание известных протоколов маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях, таких как OSPF, RIP, IGRP, EIGRP, EGP, BGP, NLSP, IS-IS.

Проведен анализ существующих алгоритмов поиска кратчайших путей из заданной вершины графа, в частности алгоритмов поиска в ширину, Дейкстры, Беллмана-Форда, Габова. Для всех алгоритмов приведены краткое описание, особенности реализации и оценки трудоемкости выполнения. Приведена математическая постановка задачи поиска оптимальных маршрутов при использовании алгоритмов Беллмана-Форда и Дейкстры на примере вычислительной сети в виде неориентированного взвешенного графа. Показано, что применение этих алгоритмов в условиях частичного изменения структуры корпоративной вычислительной сети является неэффективным из-за высокой трудоемкости поиска оптимальных маршрутов и необходимости полного пересчета таблиц маршрутизации. Поэтому необходимо разработать новые методы и алгоритмы адаптивной маршрутизации, которые позволят уменьшить трудоемкость по-

строения таблиц маршрутизации до величины порядка $O(N)$, где N – число узлов в сети.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе «Разработка методов и алгоритмов ускоренной адаптивной маршрутизации» рассматривается задача поиска оптимальных маршрутов при частичных изменениях структуры корпоративной вычислительной сети и представлены алгоритмы, позволяющие уменьшить трудоемкость определения кратчайших путей, а также алгоритм парных перестановок маршрутов.

Вычислительная сеть представлена в виде неориентированного взвешенного связного графа $G = (V, E, W)$, где V – множество вершин, $\|V\| = N$, E – множество ребер, $\|E\| = M$, W – множество весов ребер. Пусть на графе G в некоторый момент времени уже решена задача поиска кратчайших путей до всех вершин множества $V_s = V \setminus v_s$ из начальной вершины v_s , т. е. построено дерево кратчайших путей с корнем в вершине v_s . На рис. 1 жирными линиями обозначено построенное дерево кратчайших путей.

Обозначим это дерево как T_g . Рассмотрим множество ребер E графа G . По признаку вхождения ребер в дерево T_g можно разделить исходное множество E на два подмножества: $E_t \in T_g$ и $E_r \notin T_g$, $E_t \cup E_r = E$.

Множество ребер дерева E_T – множество ребер дерева T_g для графа G . Для заданного графа G , согласно свойству дерева, мощность множества E_T будет равняться мощности множества V минус единица $\|E_T\| = \|V\| - 1$.

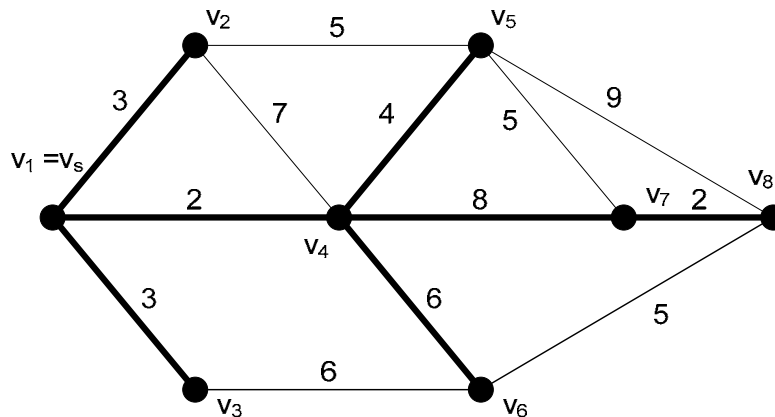


Рис. 1. Графовая модель вычислительной сети

Множество ребер замены для дерева E_R – множество ребер графа G , не вошедших в дерево T_g . При соответствующих условиях некоторое ребро $e_{i,j} \in E_R$, инцидентное вершинам v_i и v_j , может перейти во множество ребер дерева E_T , заменив собой некоторое ребро $e_{k,p} \in E_T$. При этом инцидентность ребра $e_{k,p}$ вершине v_i или v_j является обязательным условием. В свою очередь, ребро $e_{i,j}$ перейдет во множество E_R .

Будем называть такие переходы **парными переходами** и обозначать $e_{i,j}$ – $e_{k,p}$.

Маршрутная степень вершины $ms(v_i)$ – число неповторяющихся ребер $e_{i,j} \in E$, инцидентных вершине v_i , через каждое из которых можно построить простой путь между вершинами v_i и v_s .

Теорема 1. Для любого ребра $e_{i,j} \in E_T$, инцидентного некоторым вершинам v_i и v_j , маршрутные степени которых больше единицы, при заданной конфигурации графа, неизменных весах других ребер существует такое значение веса $w_{i,j}^t$, что при $w_{i,j} > w_{i,j}^t$ ребро $e_{i,j}$ становится ребром замены и переходит во множество E_R .

Величину $w_{i,j}^t$ будем называть **точкой вхождения в дерево** для ребра $e_{i,j}$.

Отношение парного перехода r_i – отношение соответствия элемента $e_{i,j}$ множества E_T элементу $e_{k,p}$ множества E_R такое, что при увеличении веса ребра $e_{i,j}$ так, что $w_{i,j} > w_{i,j}^t$, имеет место парный переход $e_{i,j} - e_{k,p}$.

Теорема 2. Для любого ребра $e_{k,p} \in E_R$, находящегося в отношении парного перехода с некоторым ребром $e_{i,j} \in E_T$ с заданной точкой вхождения в дерево $w_{i,j}^t$ существует такое значение веса $w_{k,p}^t$, что при $w_{k,p} < w_{k,p}^t$ ребро $e_{k,p}$ становится веткой дерева T_g и переходит во множество E_T .

Теорема 3. Для элементов парного отношения r_i $e_{i,j} \in E_T$ и $e_{k,p} \in E_R$ при известной точке вхождения в дерево $w_{i,j}^t$ и $w_{k,p}^t$ справедливо, что $w_{i,j}^t - w_{i,j} = w_{k,p} - w_{k,p}^t$.

Следствие 1. Если для элементов парного отношения r_i , $e_{i,j} \in E_T$ и $e_{k,p} \in E_R$, соответствующих весов $w_{i,j}$ и $w_{k,p}$ при известной точке вхождения в дерево $w_{k,p}^t$ изменился вес ребра $e_{i,j}$ до значения w_1 , то $w_{k,p}^t = w_{k,p}^t + (w_1 - w_{i,j})$.

Следствие 2. Если для элементов парного отношения r_i , $e_{i,j} \in E_T$ и $e_{k,p} \in E_R$, соответствующих весов $w_{i,j}$ и $w_{k,p}$ при известной точке вхождения в дерево $w_{k,p}^t$ изменился вес ребра $e_{k,p}$ до значения w_2 , то $w_{i,j}^t = w_{i,j}^t + (w_2 - w_{k,p})$.

Теорема 4. Ребра $e_{i,j} \in E_T$ и $e_{k,p} \in E_R$, находящиеся в одном отношении с $r_i \in R$, инцидентны одной и той же вершине v_i при условии, что v_i является листом дерева кратчайших путей.

Множество ребер замены E_S для дерева – это такое подмножество множества E_R , элементы-ребра которого участвуют, по крайней мере, в одном отношении парного перехода.

Множество непарных ребер E_P – это такое подмножество множества E_R , элементы-ребра которого не участвуют ни в одном отношении из множества R .

В общем случае множество E_P может быть пустым $||E_P|| = 0$. Множество E_S будет пустым только при условии, что исходный связный граф G является деревом и задача поиска кратчайших путей в этом случае лишена смысла.

Теорема 5. Для любого ребра $e_{i,j} \in E_S$, инцидентного некоторым вершинам v_i и v_j , маршрутные степени которых больше двух, при заданной конфигурации графа, неизменных весах других ребер существует такое значение веса $w_{i,j}^s$, что при $w_{i,j} > w_{i,j}^s$ ребро $e_{i,j}$ становится непарным ребром и переходит во множество E_P .

Величину $w_{k,p}^s$ будем называть **точкой вхождения во множество замены** для ребра $e_{k,p}$.

Теорема 6. Для любого ребра $e_{i,j} \in E_S$, инцидентного некоторым вершинам v_i и v_j , маршрутные степени которых больше двух, при заданной конфигурации графа, неизменных весах других ребер существуют такое ребро $e_{k,p} \in E_P$ и такое значение его веса $w_{k,p}^s$, что при $w_{k,p} < w_{k,p}^s$ ребро $e_{k,p}$ становится ребром замены и переходит во множество E_S .

Теорема 7. При добавлении нового ребра $e_{i,j}$ инцидентного вершинам i и j , причем i лежит выше чем j по дереву иерархии, с весом $w_{i,j}$, то без изменения окажутся кратчайшие пути и их оценки для вершин множества $V^{(v_i)}$.

Следствие. При добавлении нового ребра $e_{i,j}$ инцидентного вершинам i и j с весом $w_{i,j}$ при не изменении оценок d_i и d_j дерево не изменится. Если изменяется оценка какой-либо вершины v_i или v_j , то необходимо определить новые кратчайшие пути для множества вершин, не принадлежащих множеству $V^{(v_i)}$.

На рис. 2 жирными линиями обозначено дерево кратчайших путей, которое не требует изменения при добавлении нового ребра $E_{6,7}$.

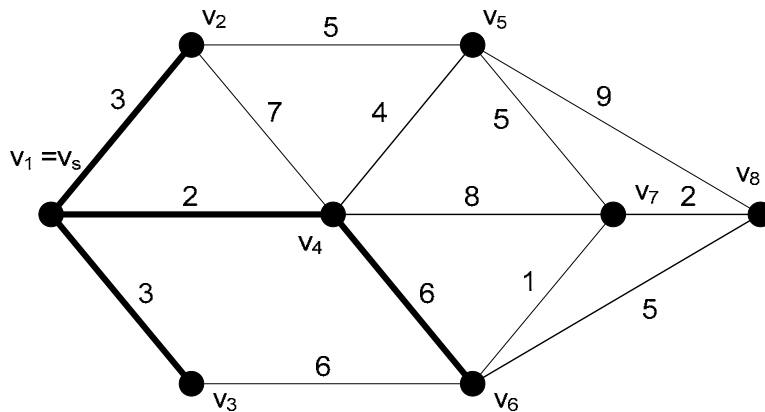


Рис. 2. Добавление ребра $E_{6,7}$

Теорема 8. При удалении некоторой вершины V_i для всех вершин, не инцидентных вершине i (то есть не имеющих ребра $e_{i,k}$), кратчайшие пути и их оценки окажутся без изменений.

Следствие. При удалении некоторой вершины V_i необходимо определить новые кратчайшие пути для множества вершин, инцидентных вершине V_i , имеющих в своем кратчайшем пути ребро $e_{i,k}$.

На рис. 3 жирными линиями обозначено дерево кратчайших путей, которое не требует изменения при удалении вершины V_7 .

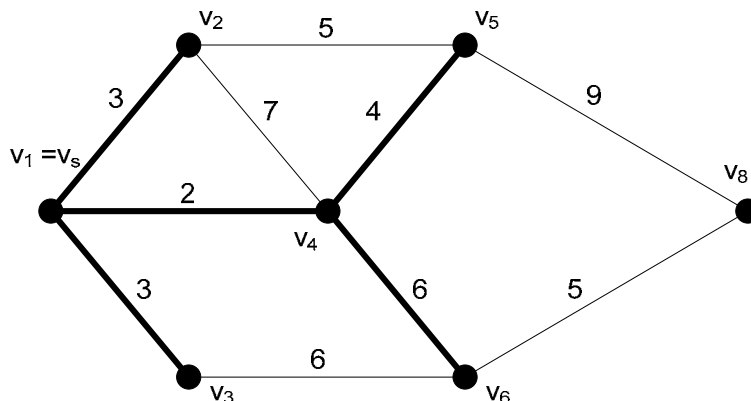


Рис. 3. Удаление вершины V_7

Теорема 9. При добавлении некоторой вершины V_i для всех вершин, не инцидентных вершине i (т.е. не имеющих ребра $e_{i,k}$), кратчайшие пути и их оценки окажутся без изменения.

Следствие 1. При добавлении некоторой вершины V_k , имеющей ребро с вершиной V_i и V_j , если $d_i < d_j$, то дерево кратчайших путей до вершины V_i не изменится.

Следствие 2. При добавлении некоторой вершины V_k , имеющей ребро с вершиной V_i и V_j , если $d_i < d_j$, то необходимо определить новые кратчайшие пути для множества вершин, инцидентных вершине V_k .

На рис. 4 жирными линиями обозначено дерево кратчайших путей, которое не требует изменения при добавлении вершины V_9 .

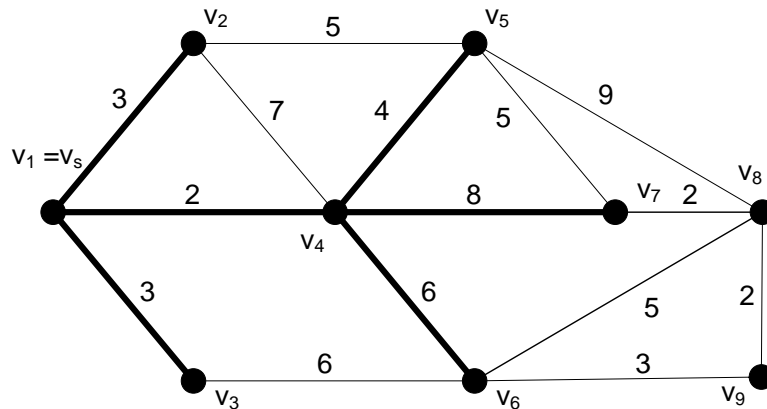


Рис. 4. Добавление вершины V_9

Теорема 10. При удалении некоторого ребра $e_{i,j}$, инцидентного вершинам V_i и V_j , входящего в дерево кратчайших путей, причем $d_i < d_j$, дерево кратчайших путей и их оценки до вершины V_i окажутся без изменения.

Следствие. При удалении некоторого ребра $e_{i,j}$, инцидентного вершинам V_i и V_j , входящего в дерево кратчайших путей, причем $d_i < d_j$, необходимо определить новые кратчайшие пути для множества вершин, инцидентных вершине V_j .

На рис. 5 жирными линиями обозначено дерево кратчайших путей, которое не требует изменения при удалении ребра $E_{4,7}$.

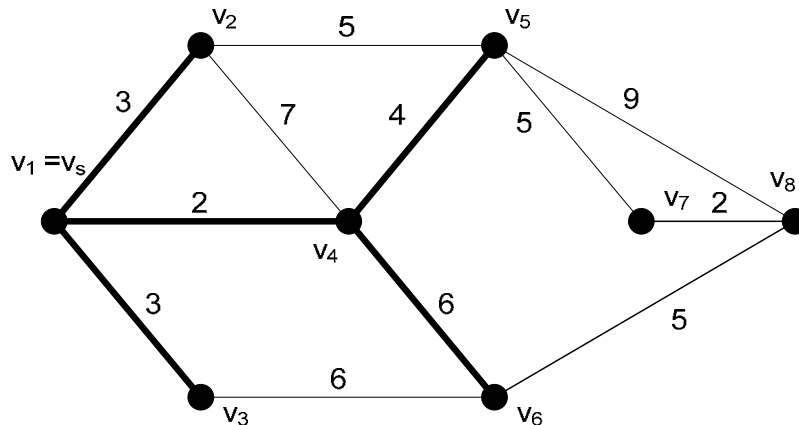


Рис. 5. Удаление ребра $E_{4,7}$

Использование сформулированных выше теорем позволило разработать метод и алгоритм адаптивной маршрутизации с учетом частичных изменений структуры корпоративной сети на основе информации о возможных парных переходах без полного повторного построения дерева кратчайших путей. Приведены доказательства правильности и расчет трудоемкости разработанного алгоритма. Верхняя и нижняя оценки трудоемкости предложенного алгоритма соответственно равны $O(N+M)$ и $O(N)$, что значительно ниже существующих алгоритмов.

Обозначим w_{ij} – вес ребра, соединяющего вершины v_i и v_j ; nw_{ij} – новое значение веса, полученное в результате изменения значения метрики линии связи. Вершина v_j располагается ниже по иерархии дерева кратчайших путей относительно v_i . Обозначим E_T множество ребер, каждый элемент которого входит, по крайней мере, в один кратчайший путь из начальной вершины, E_R – множество остальных ребер. $E_R \cup E_T = E$, $E_R \cap E_T = \emptyset$. Обозначим V_T – множество вершин, до которых найден кратчайший путь из начальной вершины, V_R – множество остальных вершин. $V_R \cup V_T = V$, $V_R \cap V_T = \emptyset$.

Будем называть V_k –путем R_k совокупность подмножества $V^{(V_k)} \subseteq V$ вершин, через которые проходит кратчайший путь до вершины v_k из исходной вершины v_s , и подмножества $E^{(V_k)} \subseteq E$ ребер, составляющих этот путь.

Назовем V_k –деревом T_k совокупность подмножества $V_T^{(V_k)} \subseteq V$, состоящего из всех вершин, кратчайшие пути до которых из исходной вершины содержат вершину v_k , и подмножества $E_T^{(V_k)} \subseteq E$ ребер, составляющих эти пути после v_k при движении от вершины v_s .

Обозначим множество путей до вершины v_i из исходной вершины v_s через Π_i , где элемент множества $\pi_{i,k} \in \Pi_i$ будет множеством неповторяющихся ребер $e_{i,j} \in E$, образующих вместе путь, соединяющий v_s и v_i . Для всех $\pi_{i,k} \in \Pi_i$ поставим в соответствие некоторое число, равное сумме весов входящих в него ребер, т.е. длину пути $d_{i,k} \in D_i$. На множестве Π_i задан селектор H , возвращающий кратчайший путь из множества Π_i . В том случае, если существует нескольких путей в Π_i с минимальной длиной, то выбирается один из них. Кратчайший путь до вершины v_i будем обозначать $\pi_i = H(\Pi_i)$, оценку длины $\pi_i - d_i$.

Теорема 11. Если $nw_{ij} > w_{ij}$ и $e_{ij} \in E_T$, то изменению могут подвергнуться кратчайшие пути и оценки их длин для вершин $V_T^{(V_j)}$.

Теорема 12. Если $nw_{ij} < w_{ij}$ и $e_{ij} \in E_T$, то без изменения останутся кратчайшие пути для вершин множества $v \in V_T^{(V_j)} \cup V^{(V_i)}$, а для вершин множества $V^{(V_i)}$ неизменными останутся и оценки длин кратчайших путей.

Теорема 13. Если $nw_{ij} > w_{ij}$ и $e_{ij} \notin E_T$, то исходное дерево кратчайших путей и оценки длин путей всех вершин не изменятся.

Теорема 14. Если $nw_{ij} < w_{ij}$ и $e_{ij} \notin E_T$, то без изменения останутся кратчайшие пути и оценки их длин для вершин множества $V^{(V_i)}$.

Теорема 15. Если $nw_{ij} > w_{ij}$, $e_{ij} \in E_T$ и $nw_{ij} > nw_{ij}^t$ (точки вхождения в дерево), то изменению могут подвергнуться кратчайшие пути и оценки их длин для

вершин $V_T^{(V_j)}$ и новые кратчайшие пути к этим вершинам будут проходить через ребра, состоящие в отношении парного перехода к ребрам этих вершин.

Следствие. При увеличении веса ребра, входящего в дерево кратчайших путей для вершин $V_T^{(V_j)}$, маршрутная степень которых больше двух, новые кратчайшие пути будут проходить через ребра, состоящие в отношении парного перехода к ребрам, входящим в исходный граф.

Теорема 16. Если $nw_{i,j} < w_{i,j}$, $e_{i,j} \notin E_T$, и новое значение $nw_{i,j} < nw_{i,j}^t$ (точки вхождения в дерево), то новые кратчайшие пути к вершинам множества $v \in V_T^{(V_j)} \cup V^{(V_i)}$ будут проходить через ребра, состоящие в отношении парного перехода к ребрам этих вершин.

Следствие. При уменьшении веса ребра, не входящего в дерево кратчайших путей для вершин $V_T^{(V_j)} \cup V^{(V_i)}$, маршрутная степень которых больше двух, новые кратчайшие пути будут проходить через ребра, состоящие в отношении парного перехода к ребрам, входящим в исходный граф.

Использование доказанных выше теорем позволяет разработать метод и алгоритм парных перестановок маршрутов, уменьшающий размерность задачи поиска кратчайших путей с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах. Приведены доказательства правильности и расчет трудоемкости разработанного алгоритма, которая составляет $O(N)$ при любом количестве парных перестановок, что значительно ниже трудоемкости существующих алгоритмов.

В третьей главе «Применение разработанных адаптивных алгоритмов маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях» предложены методики применения разработанных адаптивных алгоритмов поиска оптимальных маршрутов с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах для протоколов OSPF и IGRP.

Протокол OSPF (Open Shortest Path First) широко используется в современных корпоративных вычислительных сетях и для построения таблиц маршрутизации применяет алгоритм Дейкстры. Однако трудоемкость этого алгоритма достаточно высокая, порядка $O(N^2)$. Для повышения эффективности использования протокола OSPF предложена методика применения разработанных адаптивных алгоритмов маршрутизации, реализованная в виде программы, которая учитывает изменения структуры корпоративной вычислительной сети и позволяет получить трудоемкость $O(N)$.

Протокол IGRP (Interior Gateway Routing Protocol – протокол внутреннего шлюза) используется в корпоративных вычислительных сетях на базе маршрутизаторов CISCO и для построения таблиц маршрутизации применяет алгоритм Беллмана – Форда. Однако трудоемкость этого алгоритма достаточно высокая, порядка $O(N^3)$. Для повышения эффективности использования протокола IGRP предложена методика применения разработанных адаптивных алгоритмов маршрутизации, реализованная в виде программы, которая учитывает изменения структуры корпоративной вычислительной сети и позволяет получить трудоемкость $O(N)$.

В четвертой главе «Программная реализация разработанных адаптивных алгоритмов маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях» для исследования и сравнительного анализа эффективности выполнения процедур маршрутизации известных и предлагаемых алгоритмов поиска кратчайших путей разработан программный комплекс «Имитационное моделирование процессов маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях». При реализации использовались средства разработки Borland Delphi.

Было проведено исследование разработанных адаптивных алгоритмов. Основное внимание уделялось корректности предлагаемых алгоритмов и размерности решаемой задачи.

Целью исследования было оценить максимальное, минимальное и среднее значение размерности решаемой задачи. Исходный граф, ребро для изменения, удаления, добавления и приращения веса выбирались случайным образом. Для каждого испытания на множестве обработанных изменений выбиралось минимальное, максимальное и среднее значение размерности задачи, выраженное через количество вершин, для которых необходим поиск кратчайшего пути. По этим значениям были построены графики. Для каждого эксперимента были найдены математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение числа изменений. Для адаптивных алгоритмов определялось число фактически выполненных парных переходов. На рис. 6 – 8 представлены результаты моделирования разработанных алгоритмов поиска оптимальных маршрутов.

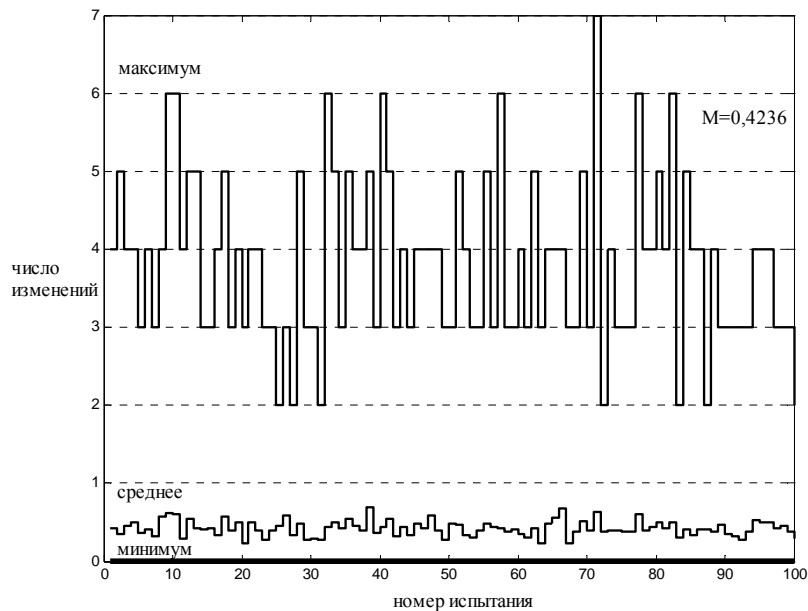


Рис. 6. Число изменений дерева в графе из 10 вершин

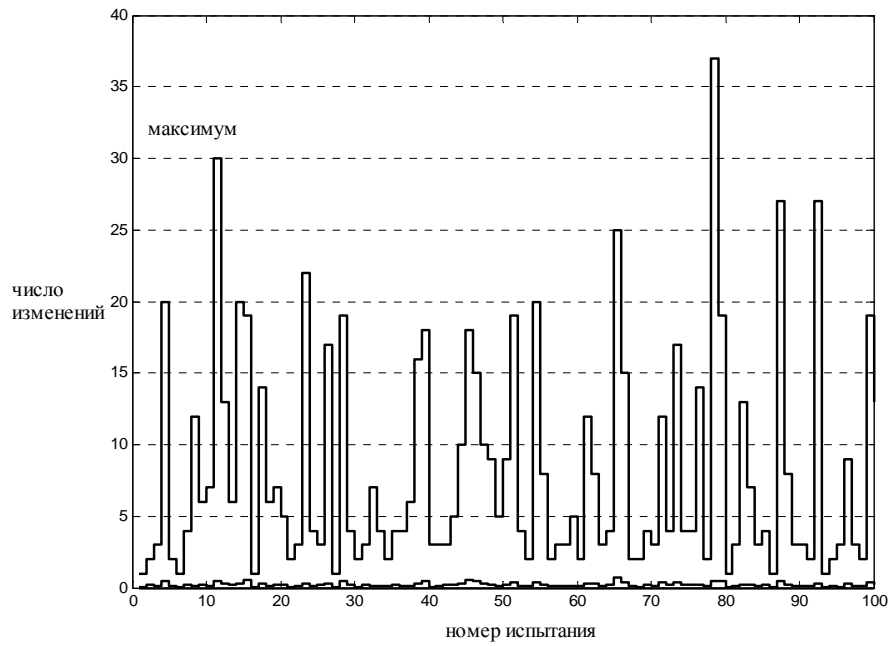


Рис. 7. Число изменений дерева в графе из 100 вершин

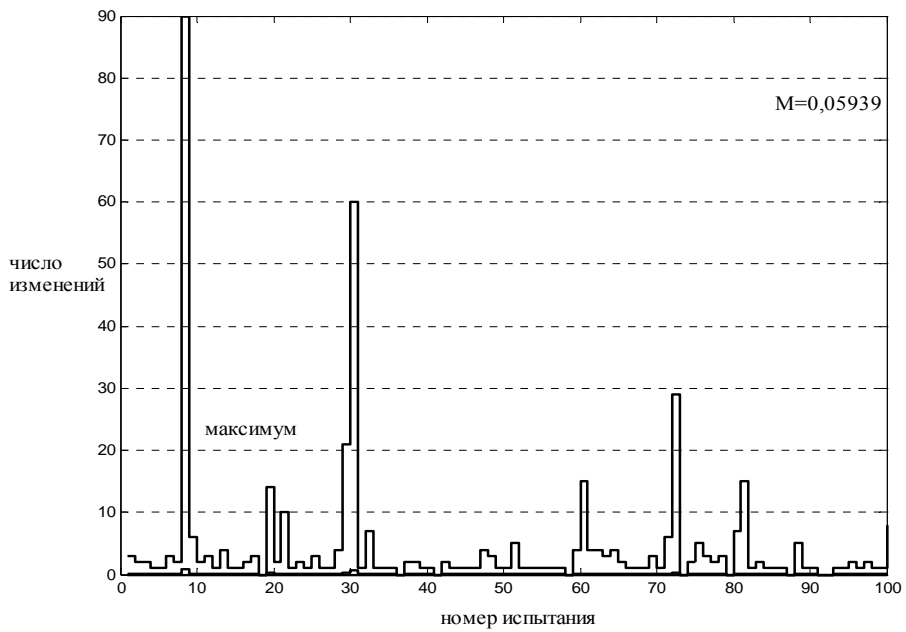


Рис. 8. Число изменений дерева в графе из 500 вершин

В таблице приведены обобщенные статистические характеристики для средней размерности задачи. В представленной таблице через СКО обозначено среднее квадратичное отклонение.

Были проведены исследования графов, состоящих из 10, 100 и 500 вершин. Исследование разработанных алгоритмов адаптивной маршрутизации показало, что математическое ожидание числа изменений не превышает величины $N/2$, а его максимальное значение не превышает N . На основании этого можно сделать вывод, что предложенные адаптивные алгоритмы маршрутизации являются эффективными при поиске оптимальных маршрутов с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах.

Статистические характеристики для средней размерности задачи

Число вершин графа	Минимальное значение	Максимальное значение	Математическое ожидание	СКО
10	0,30	0,8182	0,5047	0,0943
100	0,06	0,7401	0,2185	0,1368
500	0	0,9192	0,0594	0,1173

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В приложении представлены копии актов о внедрении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе были получены следующие результаты:

- проанализированы цели и задачи маршрутизации данных в вычислительных сетях с пакетной обработкой информации. Проведен анализ существующих протоколов адаптивной маршрутизации, в результате чего выявлены достоинства, недостатки и область применения протоколов. Выполнен анализ известных алгоритмов поиска кратчайших путей в графе, применяемых в современных маршрутизаторах. Показано, что трудоемкость современных алгоритмов определения оптимальных маршрутов не менее $O(N^2)$, где N – число маршрутизаторов в сети. На основании проведенного анализа сформулированы задачи разработки методов и алгоритмов определения оптимальных маршрутов с трудоемкостью $\Theta(N)$;

- рассмотрена задача обработки изменения значения метрики линии связи. Введено понятие парного перехода и точки вхождения ребра в дерево кратчайших путей. Сформулированы и доказаны теоремы, определяющие условия срабатывания парных переходов ребер графа. Операция обработки изменения

веса ребра графа представлена как процедура выполнения парных переходов ребер графа;

- проведен анализ процедуры обработки изменения значений метрики линии связи корпоративной вычислительной сети. Выдвинуто предположение о возможности разработки алгоритма меньшей трудоемкости по сравнению с известными применяемыми алгоритмами. Основой подобного алгоритма является использование дополнительной информации о конфигурации кратчайших путей до рассматриваемого изменения;

- решена задача корректировки таблиц маршрутизации с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах. Сформулированы и доказаны теоремы, определяющие условия построения дерева кратчайших путей в условиях динамически изменяющейся структуры корпоративной вычислительной сети;

- на основе доказанных теорем и выводов разработаны метод и алгоритм адаптивной маршрутизации с учетом частичных изменений структуры сети в графе сокращенной размерности. Проведены доказательства правильности и расчет трудоемкости предлагаемого алгоритма. Верхняя и нижняя оценки трудоемкости соответственно равны $\Omega(N+M)$ и $\Theta(N)$, где N – число узлов в сети, а M – число связей между ними;

- решена задача корректировки таблиц маршрутизации с учетом изменения маршрутов при различных модификациях структуры сети. Сформулированы и доказаны теоремы, определяющие условия построения дерева кратчайших путей в условиях динамически изменяющейся структуры корпоративной вычислительной сети;

- на основе доказанных теорем и выводов разработан метод и алгоритм парных перестановок маршрутов с учетом частичных изменений структуры сети. Проведено доказательство правильности разработанного алгоритма и показано, что его трудоемкость оценивается величиной $\Theta(N)$, где N – число узлов в сети;

- разработаны методики применения адаптивных алгоритмов поиска оптимальных маршрутов с учетом частичных изменений структуры сети на основе информации о возможных парных переходах для протоколов OSPF и IGRP, позволяющие уменьшить трудоемкость поиска оптимальных маршрутов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ОСНОВНЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ ДИССЕРТАЦИИ

1. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Разработка алгоритмов адаптивной маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. 2006. № 19. С. 114 – 116.

2. Перепелкин Д.А. Алгоритмы маршрутизации в локальных сетях // Информационные технологии в образовании: межвуз. сб. науч. тр. РГРТУ. 2006. С. 79 – 81.

3. Перепелкин Д.А. Исследование процессов маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. РГРТУ. 2007. С. 227 – 229.

4. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Разработка алгоритмов адаптивной маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. РГУ имени С.А. Есенина. 2008. С. 100 – 105.

5. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Алгоритмы маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. РГУ имени С.А. Есенина. 2008. С. 106 – 108.

6. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Программный комплекс для оценки процессов маршрутизации в корпоративных вычислительных сетях // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. РГУ имени С.А. Есенина, 2008. С. 109 – 111.

7. Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И. Разработка алгоритма динамической маршрутизации на базе протокола OSPF в корпоративных вычислительных сетях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 2 (выпуск 28). С. 68 – 72.

8. Перепелкин Д.А., Шибанов А.П. Повышение эффективности протокола OSPF при условии частичного изменения структуры корпоративных вычислительных сетей // 13-я Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука». Москва. МИФИ. 2009. <http://www.mephi.ru/molod>.

9. Перепелкин Д.А., Кравчук Н.В. Применение алгоритмов адаптивной маршрутизации в протоколе IGRP // 13-я Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука». Москва. МИФИ. 2009. <http://www.mephi.ru/molod>.

ПЕРЕПЕЛКИН Дмитрий Александрович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
АДАПТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ
В КОРПОРАТИВНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 09.11.09. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага офисная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.