

На правах рукописи



СКОВПИН МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЧА-
СТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ СОТОВОЙ
СВЯЗИ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ВЛАДИМИР – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова» Воронежский филиал (ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»)

Научный руководитель: **Лапшина Марина Леонидовна**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Математики, информационных систем и технологий» ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова.

Официальные оппоненты: **Цимбал Владимир Анатольевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Автоматизированных системы управления военной академии РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов).

Самойлов Сергей Александрович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет».

Защита состоится 31 мая 2018 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, корп. 3, ауд. 301-3.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан 30 марта 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, РТиРС, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.04.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время объемы информации, необходимой человечеству для хозяйственной, культурной, научной и другой деятельности переживают эпоху быстрого роста. Одну из самых важных ролей в обеспечении обмена информацией играют различные системы радиосвязи и телекоммуникаций. Важнейшими характеристиками радиосистем, определяющими их конкурентоспособность на мировом рынке, являются зона действия, точность получаемой информации, быстродействие, надежность и помехоустойчивость, пропускная способность, потребляемая мощность и перспективность, то есть способность в течение длительного времени удовлетворять потребности пользователей.

Создание высокоэффективных радиосистем связано с решением ряда задач анализа и синтеза, учитывающих возможные состояния функционирования. За последние 15 лет огромный успех мобильных телефонных систем послужил стимулом для развития технологий и внес большой вклад в подходы к математическому моделированию и алгоритмы оптимизации проектирования и принятия управленческих решений. На этапе строительства и эксплуатации телекоммуникационной сети оператор заинтересован в том, чтобы сеть соответствовала необходимым критериям надежности и качества предоставляемых услуг. Задача выбора наилучшего варианта телекоммуникационной сети на этапе проектирования в условиях ограниченного финансирования является наиболее типичной.

Основными направлениями в совершенствовании систем радиосвязи являются использование новых физических принципов функционирования, интеллектуализация на основе современной компьютерной техники, повышение роли устройств обработки информации, расширение применяемого диапазона радиоволн и условий функционирования.

Вопросы частотно-территориального планирования различных видов телекоммуникационных сетей и организации радиосвязи рассматривались в своих работах известными российскими специалистами, такими как Цимбал В.А., Бабков В.Ю., Самойлов А.Г., Румянцев К.Е., Тихвинский В.О., Юдин В.В., Трофимов А.П. и дру-

гими, а так же зарубежными авторами – Mishra A.R., Chevallier C., Garg V.K., Rayat N., Rumney M. Wong K.D.

Проведенный анализ современных методов планирования сетей радиосвязи показал, что задачи проектирования не ставятся как многокритериальные задачи оптимизации с учетом совокупности противоречивых технических и экономических требований. Полученные в результате проектные варианты не являются оптимальными по совокупности показателей качества, что приводит к необходимости перепланировок данных сетей после введения их в эксплуатацию и проведения мониторинга.

Таким образом, актуальность диссертационного исследования продиктована необходимостью развития математического и программного обеспечения, предназначенного для оптимизации проектных вариантов при частотно-территориальном планировании сетей радиосвязи со строгим учетом показателей качества на основе методов многокритериальной оптимизации.

Тематика диссертационной работы соответствует одному из научных направлений ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» «Разработка средств проектирования и управления технических и организационных систем, в том числе специального назначения».

Объект исследования. Методы автоматизации процесса оптимального частотно-территориального проектирования сетей радиосвязи.

Предмет исследования. В работе рассматриваются модели, методы, алгоритмы и методики частотно-территориального планирования сетей радиосвязи.

Цель исследования. Целью работы является повышение эффективности частотно-территориального проектирования систем радиосвязи в условиях ограниченных ресурсов.

Методы исследования. В работе использовались методы математического моделирования, методы оптимизации, теория управления, методы эволюционного моделирования, объектно-ориентированное программирование.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.12.13

«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»: п. 3 «Разработка эффективных путей развития и совершенствования архитектуры сетей и систем телекоммуникаций и входящих в них устройств», п. 11 «Разработка научно-технических основ технологии создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования», а также п. 14 «Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций».

Научная новизна. В диссертации получены характеризующиеся научной новизной результаты:

– предложены и обоснованы методы выбора оптимальных проектных вариантов построения сети сотовой связи с учетом совокупности показателей качества, основанные на оптимальности по Парето;

– впервые разработана синтезированная гибридная методика поиска оптимального решения задачи частотно-территориального планирования сети сотовой связи как задачи векторной (многокритериальной) оптимизации;

– предложены модификации моделей распространения радиосигналов и определения зоны прямой видимости, позволяющих применение их в процедурах эволюционного моделирования;

– разработана методология автоматизации проектирования сети радиосвязи, позволяющая снизить время составления частотно-территориального плана сети на 80%;

– разработаны алгоритмические средства поддержки принятия решений для задач, возникающих при проектировании новых или модификации действующих телекоммуникационных сетей различных типов.

Практическая значимость работы.

– разработано технологическое решение, состоящее из комплекса алгоритмических и инструментальных средств (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 50201550514), в результате использования которого возможно достижение полной автоматизации процесса поиска оптимального проектного решения для выбранной зоны расчетов;

– внедрение разработанной информационной системы повышает эффективность планирования радиосетей на 21% в целом и, в частности, эффективность использования ресурсов возрастает на 26.0%, управление рисками – на 19.0%, организация времени – на 27.5%;

– разработанная методика оптимального планирования сети радиосвязи, отличающаяся сочетанием методов многокритериальной оптимизации, эволюционного моделирования и метода анализа иерархий, позволяет снизить временную сложность применяемых алгоритмов с экспоненциального времени до линейно-логарифмического.

Достоверность полученных научных результатов обусловлена применением адекватного математического аппарата, подтверждается их согласованностью с результатами компьютерного моделирования и сопоставлением ряда полученных результатов с данными, известными из российской и зарубежной литературы.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные теоретические и практические результаты работы реализованы в виде комплекса средств программного обеспечения, предназначенного для автоматизации процесса проектирования радиосетей. Результаты работы получили практическое внедрение в ЦСИР АО «НТЦ РЭБ», а также включены в материалы учебно-методического комплекса преподавания дисциплин «Моделирование процессов и систем» и «Методы и средства проектирования информационных систем и технологий» в ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова».

Апробация. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: IV Научно–технической конференции молодых ученых и специалистов "Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО" (Москва, 2013), XX Международной научно-технической конференций «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2014) (Воронеж, 2014г.) IV научно-практической Internet-конференции, "Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики" (Ульяновск, 2014 г.), IV Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в науке и образовании» (Чебоксары, 2015 г.), VII Всероссий-

ская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем" (Москва, 2016г.), II Международная научно-практическая конференция «Научные исследования: теория, методика и практика» (Чебоксары, 2017г.). Работа выполнялась при финансовой поддержке Фонда развития малых форм предприятий «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» «У.М.Н.И.К» (тема № 6216ГУ/2015, 2015-2016 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 21 научной работе, в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат: в [1, 3] предложены подходы к планированию сотовых сетей второго и третьего поколения, а так же математические модели покрытия территории сетью базовых станций; в [2, 20] разработаны модели учета потерь при распространении радиосигнала; в [4-6] формализован подход к автоматизации проектирования радиосетей на основе использования моделей многокритериальной оптимизации; составлены методики формирования допустимых вариантов системы и выбора единственного оптимального решения с помощью метода анализа иерархий; в [7-8] предложена методика выбора решения среди множества альтернатив с помощью МАИ; в [9] составлена методика планирования телекоммуникационных сетей на примере сетей сотовой связи с учетом нескольких критериев оптимальности, а так же разработаны методики построения зон покрытия базовых и абонентских станций; в [10,11] предложены методы формирования допустимых вариантов системы и выбора единственного оптимального решения; в [19, 21] составлена модель беспроводной сети.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы. Основная часть работы изложена на 154 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 16 таблиц. Список литературы содержит 136 наименований.

Научные результаты, выносимые на защиту:

– алгоритмические средства поддержки принятия решений, адаптированные для использования в методах эволюционного моделирования и соответствующие рекомендациям Международного Союза Электросвязи, включающие модели распространения радиосигналов и определения зоны прямой видимости, а также методику расчета зон покрытия.

– методика поиска оптимального решения задачи планирования сети радиосвязи, основанная на применении методик многокритериальной оптимизации, эволюционного моделирования и метода анализа иерархий, учитывающая противоречивые требования, возникающие в процессе планирования;

– комплекс алгоритмических и инструментальных средств, обеспечивающий планирование и оптимизацию топологии радиосетей, составление частотных планов по выбранной области в полностью автоматическом режиме.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе диссертации проведён обзор методов и подходов к планированию сетей радиосвязи. Обосновывается необходимость синтеза оптимальной конфигурации сети.

В ходе разработки проекта сети радиосвязи необходимо выполнять большой объем расчетов, требующих интенсивного использования вычислительных средств, так как конфигурация и параметры сети существенно зависят от условий местности (рельефа, характеристик застройки и т.п.). Проектирование начинается с создания электронной карты территории. Затем разрабатывается предварительный план расположения базовых станций (БС) и сот сети с учетом характеристик намечаемой к использованию аппаратуры и результатов приближенной оценки энергетического баланса. Далее с помощью выбранных моделей распространения радиоволн и характеристик местности для полученной схемы уточняются параметры электромагнит-

ного поля в пределах зоны обслуживания, что позволяет оценить качество покрытия. Для той же схемы составляется частотно-территориальный план, а также оцениваются трафик и емкость для характерных участков и сети в целом. Процесс проектирования является итерационным, и, если по показателям качества покрытия, трафика или емкости составленный план сети не удовлетворяет предъявляемых к нему требований, производится его корректировка, и для нового плана производятся заново все перечисленные расчеты.

В данном диссертационном исследовании рассмотрены вопросы построения и планирования современных систем радиосвязи на примере частотно-территориального проектирования сотовых мобильных сетей.

Произведен обзор возможностей программных комплексов планирования радиосетей, выделены их основные недостатки.

В процессе планирования ССС были выделены следующие этапы: планирование радиопокрытия, планирование емкости и частотное планирование. Все этапы проектирования взаимосвязаны между собой, поэтому такое поэтапное деление в значительной степени условно.

В связи с отсутствием эффективных методов автоматизации процесса проектирования радиосетей различных типов и оптимизации принципов их организации и функционирования и в соответствии с поставленными задачами исследования, была сформулирована научная задача синтеза сети радиосвязи, позволяющая построить оптимизационную функцию с соответствующими ограничениями, в формализованном виде это будет выглядеть следующим образом:

Найти такую сеть радиосвязи S'' , которая удовлетворяет исходным требованиям (ограничениям) и обладает при этом значением совокупности (вектора) показателей качества $\bar{K}(S'')$, наилучшим в смысле безусловного критерия предпочтения, который имеет вид

$$\bar{K}(S'') \leq \bar{K}(S') \quad (1)$$

Если выполняется условие (1), то каждый из показателей качества $k_i(S'')$ $i = \overline{1, m}$ оптимизированной сети S'' не хуже, чем у исходной сети S' , в том числе, по меньшей мере, один из этих показателей качества лучше, чем у сети S' .

В данной постановке задача синтеза сети относится к задаче векторной (многокритериальной) оптимизации и заключается в выборе из нескольких вариантов векторно-сравнимых решений такого, при котором сеть обладает наилучшими значениями вектора показателей качества $\vec{K}(S)$, где S – набор характеристик сети радиосвязи.

Во второй главе детально проработана постановка задачи оптимизации сетей радиосвязи на примере сетей сотовой связи (ССС), определены критерии оптимальности для решения задачи многокритериальной оптимизации.

Были выделены два подхода к описанию предпочтения лицом принимающего решения (ЛПР) одного варианта другому: ординалистический и кардиналистический.

Выбор критерия оптимальности основан на представлениях ЛПР об оптимальности. Однако из-за недостаточной определенности не всегда удастся формализовать целевую функцию и скалярный критерий оптимальности. В таком случае невозможно выбрать единственный оптимальный вариант $\varphi_0 = \underset{\varphi \in \Phi_D}{extr}[U(\varphi)]$, где $U(\varphi)$ – целевая функция полезности системы. Тогда, на начальных этапах планирования, система характеризуется совокупностью целевых функций:

$$\vec{f}(\varphi) = (f_1(\varphi), f_2(\varphi), \dots, f_m(\varphi)), \quad (2)$$

которая определяет влияние структуры s и параметров $\vec{\beta}$ варианта системы $\varphi = (s, \vec{\beta})$ на показатели качества системы. В таком случае возникает подкласс более сложных задач оптимизации решений по показателям качества, называемый многокритериальной или векторной оптимизацией. В основном, постановка и решение задачи многокритериальной заключается в замене (аппроксимации) представлений ЛПР об оптимальности системы на различные концепции оптимизации, которые могут быть формализованы в виде некоторого вектора критериев оптимальности (2) и такая задача может быть решена с использованием эффективных процедур оптимизации.

Был формализован процесс поиска оптимальных вариантов построения СССР, включающий в себя следующие этапы:

1) Задание начального набора вариантов системы, различающихся используемыми стандартами радиосвязи, выделенными полосами частот, числом абонентов, территорией покрытия, секторами и высотой базовых станций (БС), мощностью передатчиков БС, параметрами антенн и др.

2) Выделение подмножества допустимых вариантов системы с учетом ограничений на структуру и параметры сети, а также на значения показателей качества.

3) Выбор подмножества оптимальных по Парето вариантов ССС.

4) Анализ и оценивание полученного подмножества вариантов.

5) Выбор единственного варианта сети.

Так же были предложены методы многокритериальной оптимизации, основанные на оптимальности по Парето, для решения проблем краткосрочного и долгосрочного планирования и проектирования телекоммуникационных сетей различных типов, определены критерии оптимальности и показатели качества системы. Среди них были выделены следующие показатели для оптимизации ССС на номинальном этапе проектирования: N_a – количество обслуживаемых абонентов; S_o – площадь обслуживаемой территории; N_a / S_o – плотность обслуживаемых абонентов; $P_{ош}$ – вероятность ошибки; N_k – количество частотных каналов; A – допустимая нагрузка; N_{BC} – количество БС; ΔF_C – полоса частот БС на передачу; N_{aBC} – количество абонентов, обслуживаемых одной БС; β – максимальная активность одного абонента в час наибольшей нагрузки; $P_{бл}$ – допустимая вероятность блокировки;

Проведен анализ различных подходов к нахождению оптимальных вариантов построения сети, среди которых прямые методы, метод исследования пространства параметров и использование метаэвристик. Метаэвристиками называют множество методов предназначенных для решения задач оптимизации, представляющих собой стратегии высокого уровня, управляющих эвристиками низкого уровня. Различают методы траекторий (табу-поиск, моделируемый отжиг), сохраняющие одно решение и популяционные методы (методы муравьиной колонии, эволюционное моделирование), сохраняющие конечное множество (популяцию) решений.

Метаэвристики показали себя как легко адаптируемая технология для решения задачи многокритериальной оптимизации проектных решений при планировании

сети сотовой связи. В данном случае были применены генетические алгоритмы как адекватная реализация процедур эволюционного моделирования.

Генетическое представление беспроводной сети для использования в многокритериальном генетическом алгоритме SPEA2 отражено на рис. 1. В генетическом алгоритме передатчики БС и их зоны обслуживания представлены как особи, а набор передатчиков – беспроводная сеть в целом – представляет собой популяцию. Генетическое отображение радиосети представляет собой иерархию, на нижнем уровне которой находятся хромосомы, которые кодируют характеристики передатчиков – расположение, мощность, емкость и т.д. Эти данные кодируются бинарно с помощью годов Грея. Уровнем выше находятся особи, и еще выше – популяции, отражающие альтернативные варианты архитектуры системы. Вершина иерархии – метапопуляция – набор всех популяций в любой момент времени.

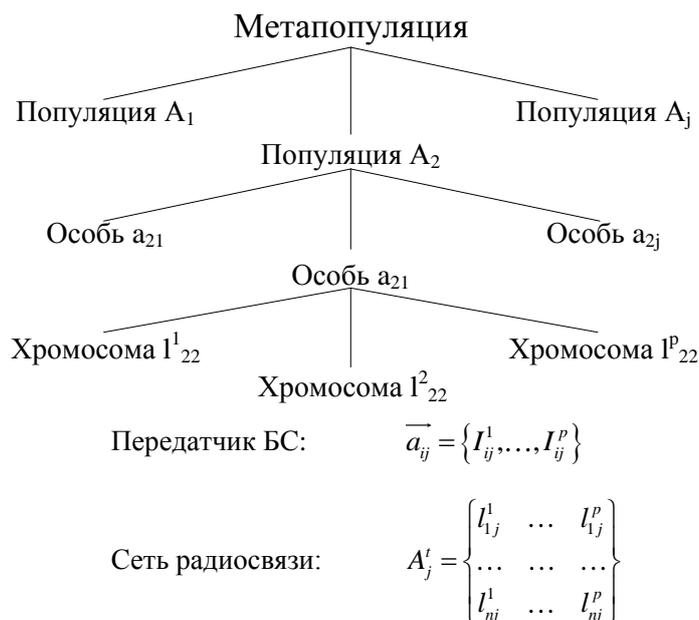


Рис. 1– Структура генетического представления сети

В третьей главе проведено математическое моделирование систем сотовой связи, а также сформулированы модели, использующиеся в перспективных широкополосных системах военной связи. Определены параметры, использующиеся при проектировании, составлены модели учета потерь при распространении сигнала.

Составлены алгоритмы построения зон обслуживания и радиопокрытия БС в соответствии с рекомендациями Международного Союза Электросвязи (МСЭ), а также модель определения зоны «прямой видимости».

Алгоритм построения зон обслуживания БС был представлен на рисунке 2. В результате построения радиопокрытия каждой базовой станции и соответствующих абонентских (мобильных) станций образуется множество зон покрытия, состоящих

из элементарных площадок, изображаемых в виде квадратов с центром в точке с координатами $(ш_i, д_i)$ и имеющих следующий набор атрибутов:

- 1) порядковый номер, ID_i^j ;
- 2) уровень сигнала на входе приемника МС, создаваемый передатчиком БС, P_{BSi}^j , дБВт;
- 3) уровень сигнала на входе приемника БС, создаваемый передатчиком МС, P_{MSi}^j , дБВт;
- 4) ослабление сигнала на трассе БС-МС, L_i^j , дБ;
- 5) длина трассы, D_i^j , км;
- 6) азимут направления БС – МС, az_{12i}^j , град;
- 7) азимут направления МС – БС, az_{21i}^j , град;
- 8) коэффициент усиления антенны БС, G_{BSi}^j , дБ;
- 9) коэффициент усиления антенны МС, G_{MSi}^j , дБ;

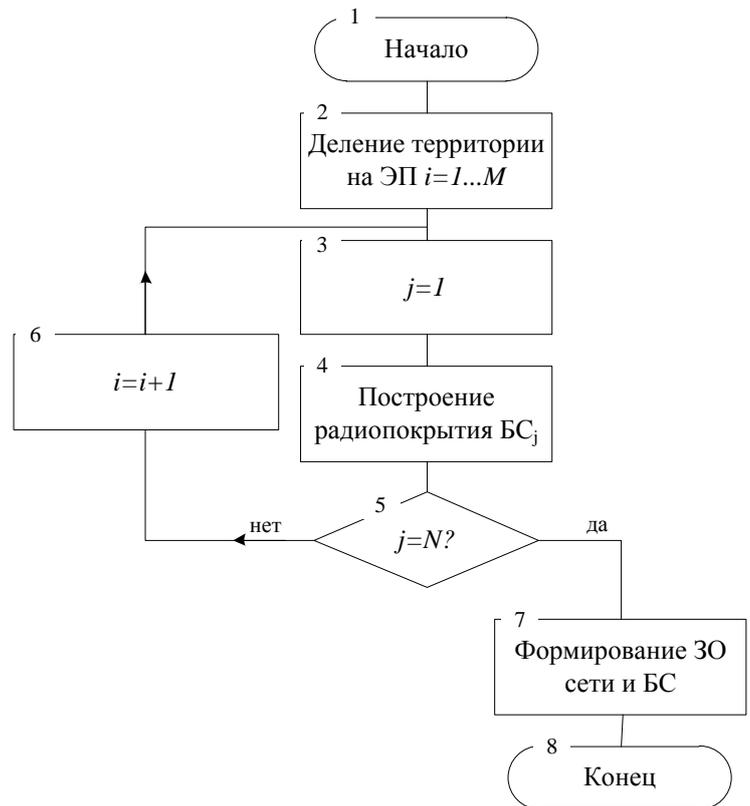


Рис. 2 – Блок-схема алгоритма построения зон обслуживания

Перечисленные параметры рассчитываются для каждого i -го фрагмента территории и j -ой БС следующим образом (рис. 3):

- 1) С помощью значений координат рассчитывается расстояние r_i между БС и ЭП, если оно превышает R_{\max} , то осуществляется переход к следующей ЭП. R_{\max} рассчитывается следующим образом:

$$R_{\max} = 0,05 \cdot 10^{\min(Z_1, Z_2)}$$

где $Z_1 = P_{prdBS} - P_{prmMS} + G_{\max BS} - L_{prdBS} + G_{\max MS} - L_{prmMS} - 32,45 - 20\lg(f_{prd})$,

$$Z_2 = P_{prdMS} - P_{prmBS} + G_{\max MS} - L_{prdMS} + G_{\max BS} - L_{prmBS} - 32,45 - 20\lg(f_{prm})$$

L_{prdMS} – потери в антенно-фидерном тракте передатчика МС, дБ,

L_{prmMS} – потери в антенно-фидерном тракте приемника МС, дБ,

L_{prdBS} – потери в антенно-фидерном тракте передатчика БС, дБ,

L_{prmBS} – потери в антенно-фидерном тракте приемника БС, дБ.

2) Строится профиль трассы, с помощью которого определяется длина трассы $Dist_i^j$ и высоты антенн h_{BS} и h_{MS} над уровнем моря.

3) По алгоритму, описанному

в рекомендации МСЭ Р.1546, определяется ослабление радиосигнал на трассе L_i^j [9].

4) Рассчитывается коэффициент усиления антенн, для этого:

а) Для антенны БС рассчитывают угловое отклонение от оси основного лепестка в горизонтальной плоскости:

$$\varphi = \begin{cases} az_{12i}^j - az_{BS} & -180 \leq az_{12i}^j - az_{BS} \leq 180 \\ |az_{12i}^j - az_{BS}| - 360 & az_{12i}^j - az_{BS} > 180 \\ 360 - |az_{12i}^j - az_{BS}| & az_{12i}^j - az_{BS} < -180 \end{cases}$$

б) Далее, рассчитывается угловое отклонение от оси основного лепестка передающей антенны БС в вертикальной плоскости:

$$\alpha = \Delta_{BS} - \delta, \text{ град,}$$

где

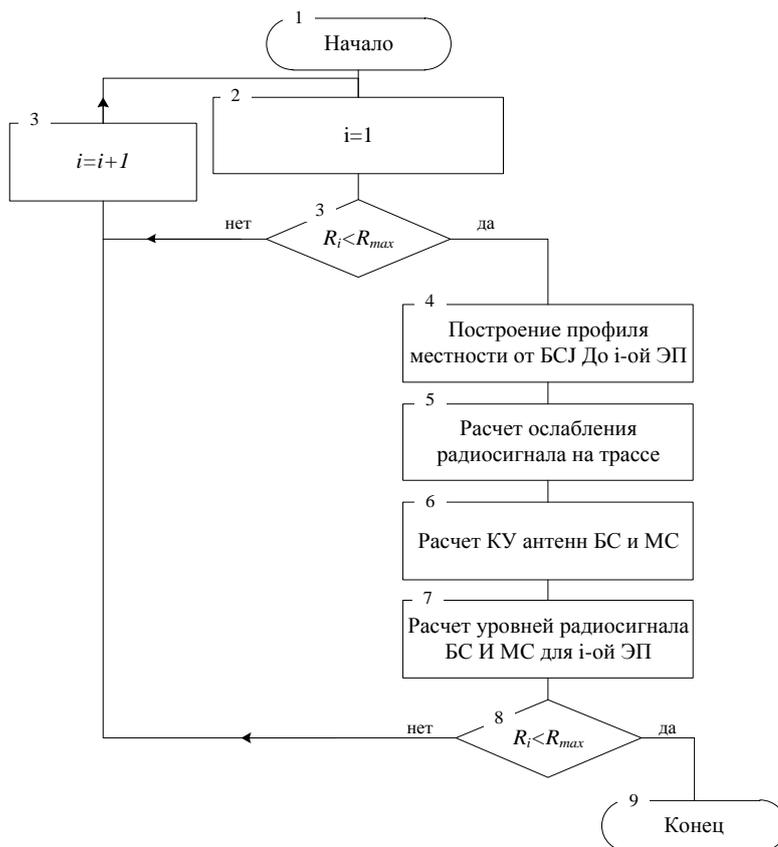


Рис. 3 – Блок-схема алгоритма построения радио-покрытия БС

$$\delta = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \cdot \frac{(h_{BS} - h_{MS})}{Dist_i^j}, & \text{если } Dist_i^j < 130,4 \left(\sqrt{h_{BS}} + \sqrt{h_{MS}} \right) \\ 0, & \text{если } Dist_i^j \geq 130,4 \left(\sqrt{h_{BS}} + \sqrt{h_{MS}} \right) \end{cases}, \text{ град,}$$

Δ_{BS} – угол возвышения антенны, град.

- в) Рассчитываются коэффициенты усиления $G_H(\varphi), G_V(\alpha)$ с помощью парциальных диаграмм направленности.
- г) Рассчитывается коэффициент усиления антенны БС:

$$G_{BSi}^j = G_{\max BS} + G_H(\varphi) + G_V(\alpha)$$

- д) Аналогично, рассчитывается коэффициент усиления для МС G_{MSi}^j
- е) Рассчитываются уровни сигнала на входах приемников МС, создаваемые передатчиками БС и уровни сигналов на входах приемников БС, создаваемые передатчиками МС:

$$P_{MSi}^j = P_{prdBS} + G_{BSi}^j - L_{prdBS} + G_{MSi}^j - L_{prmMS} - L_i^j$$

$$P_{BSi}^j = P_{prdMS} + G_{MSi}^j - L_{prdMS} + G_{BSi}^j - L_{prmBS} - L_i^j$$

Таким образом, зона обслуживания каждой БС формируется по результатам анализа всей совокупности элементов множеств зон покрытия, в виде множества зон обслуживания. Зона обслуживания сети состоит из зон обслуживания всех БС, то есть является совокупностью всех множеств ZO^j .

Также в данной главе предложена схема получения оптимального проектного решения, основывающаяся на применении методов многокритериальной оптимизации, эволюционного моделирования и метода анализа иерархий. В результате работы многокритериального генетического алгоритма формируется набор оптимальных по Парето решений. Для решения задачи проектирования радиосети, необходимо выбрать единственный вариант сети. Для этого необходимо привлечение дополнительной информации от лица принимающего решения. Методом выбора решения среди альтернатив был выбран метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Саати.

В формализованном виде, схема поиска оптимального решения представлена на рисунке 4. Согласно принципам МАИ, на первом этапе происходит выбор критериев, от которых зависит выбор той или иной альтернативы. Далее, выбранные критерии структурируются в виде иерархии, чтобы показать их взаимодействие между собой и влияние друг на друга.

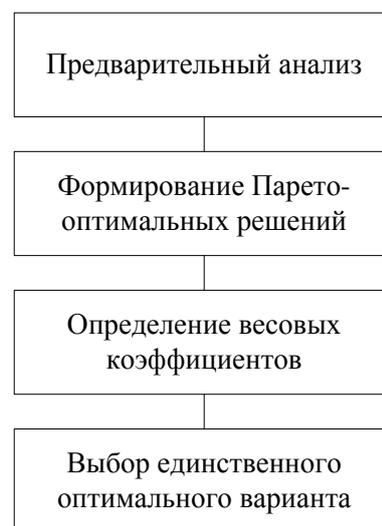


Рис. 4 – Схема поиска решения

Представления заказчика о требованиях к проектируемой сети определяют основные направления оптимизации, включаемые в анализ: надежность сети, ее пропускная способность и стоимость. Для обеспечения достаточного уровня детализации, критерии надежности и пропускной способности разбиваются на подкритерии. В надежности можно выделить следующие аспекты: число срывов, допустимая вероятность блокировки вызова, допустимая телефонная нагрузка, эффективность использования радиочастотного спектра. На пропускную способность сети влияют следующие параметры: число абонентов, площадь территории обслуживания, количество выделенных частотных каналов, активность абонентов в час наибольшей нагрузки. Стоимость, в общем случае, зависит от количества БС. Иерархия для МАИ представлена на рис. 5:

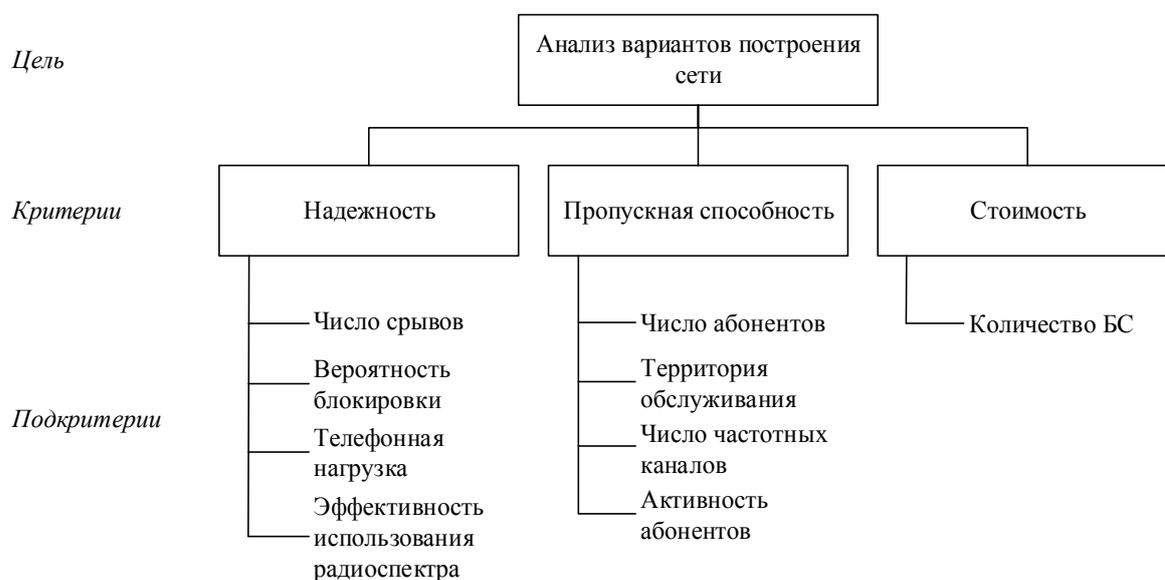


Рис. 5 – МАИ-иерархия для анализа вариантов построения сети

Четвёртая глава посвящена описанию структуры программного комплекса автоматизации проектирования радиосетей, а также его апробации на задачах, возникающих при планировании сетей радиосвязи.

Для обеспечения технологичности разработанного программного комплекса применялось модульное программирование. Оно позволяет обеспечить функциональную целостность и завершенность отдельных модулей, а также простую поддержку и эволюционируемость функциональных частей. Модульная структура разработанного программного обеспечения приведена на рисунке 6.

Так же была проведена апробация разработанного комплекса. На рис. 7а показаны результаты планирования сотовой сети мобильной связи стандарта GSM-1800 с помощью разработанного комплекса для 5 районов города Ростов-на-Дону. Рисунок 7б – результаты планирования сети LTE в Семилукском районе Воронежской области.

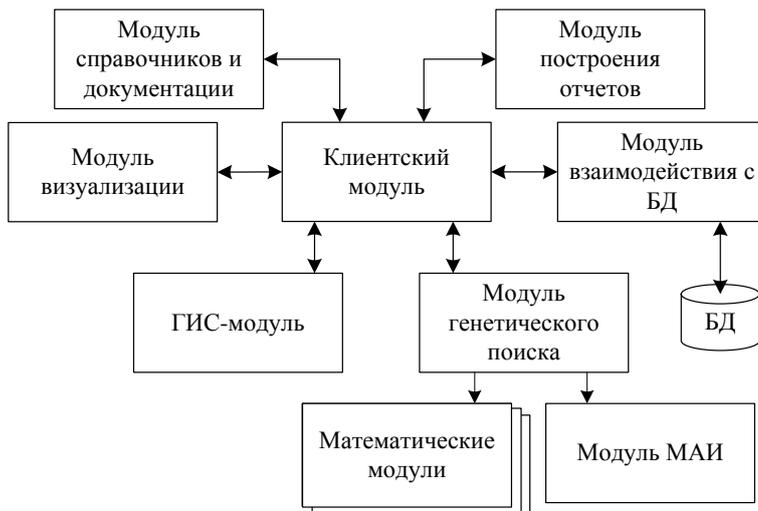
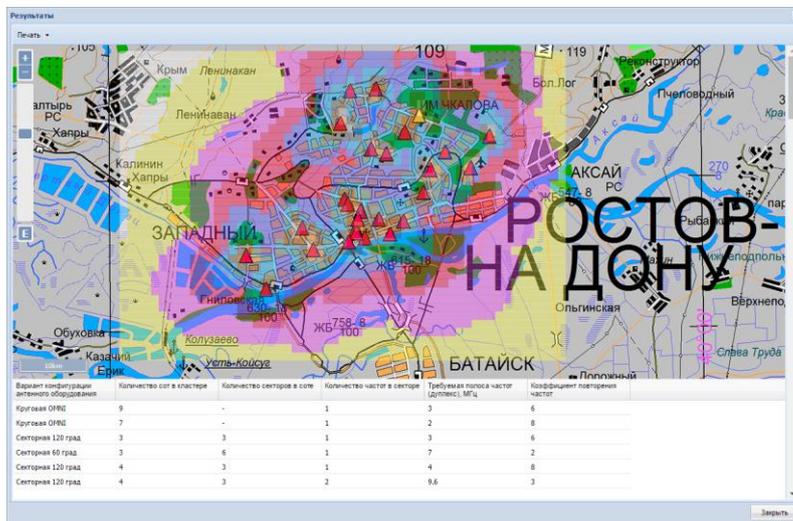
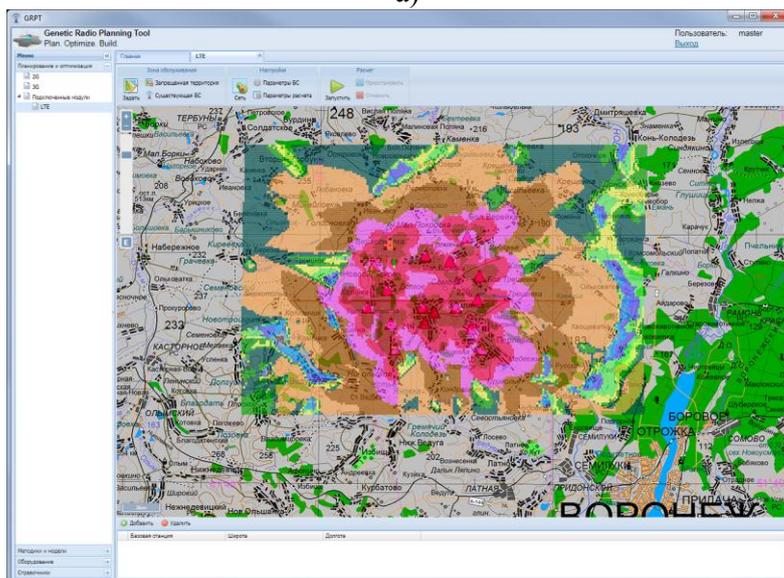


Рис. 6 – Модульная структура комплекса



а)



б)

Рис. 7 – Результаты работы комплекса

Автоматизация процесса проектирования радиосетей обеспечивает целый ряд преимуществ и выгодно отличается от классического процесса. Результатом применения разработанного комплекса должен быть прозрачный, четко регламентированный, документированный и автоматизированный процесс проектирования.

Данные статистических исследований показывают, что прирост эффективности составляет при использовании информационных систем управления проектами и САПР порядка 21% по отношению к показателям компаний, не использующих подобные системы. В частности, эффективность использования ресурсов возрастает на 26.0%, управление рисками – на 19.0%, организация времени – на 27.5%.

Для проверки эффективности разработанной методологии многокритериальной оптимизации была проведена серия синтетических тестов на трех видах территории (Воронежская область, Камчатский край и Хабаровский край) без учета влияния рельефа поверхности (для уменьшения времени расчета), результаты сведены в таблицу 1.

Табл. 1 – Результаты тестирования алгоритма

Территория	Модель сети (количество БС)	Эффективность (%)			Покрытие (%)	Количество поколений
		Минимальная	Средняя	Максимальная		
А	10	59	76	94	89	242
	20	62	78	92	92	264
	30	60	84	96	86	297
	50	63	81	100	96	330
	100	40	79	93	92	341
Б	10	74	59	89	91	286
	20	83	75	92	97	330
	30	87	51	96	96	330
	50	80	54	95	97	341
	100	82	62	95	92	319
В	10	51	68	82	80	286
	20	53	72	84	86	253
	30	48	73	81	86	297
	50	44	76	91	89	286
	100	27	70	83	83	352

Во всех тестовых случаях покрытие, достигнутое моделью, было в пределах 5-10% от запланированного уровня покрытия (90% территории). Эффективность соты в пределах 20-30% от общей емкости.

При расчете тестовых проектов с использованием реальных данных, были получены следующие результаты затраченных ресурсов, необходимых для построения оптимальной сети радиосвязи (табл. 2):

Табл. 2 – Затраченные ресурсы

Проект	Количество запусков	Покрытие (усредненное)	Необходимый объем памяти	Минимальное время расчета	Максимальное время расчета
GSM-1800 Ростов-на-Дону	5	93%	6897МБ	11 ч. 36 мин.	12 ч. 48 мин.
LTE Воронежская обл.	10	97%	3470МБ	6ч. 05 мин.	6ч. 32 мин.

Среднее время разработки частотно-территориального плана, предлагаемого компаниями, занимающимися планированием радиосетей, составляет от 120 часов, таким образом, выигрыш от использования разработанной системы составит порядка 80% (с учетом времени, затраченного на анализ результатов).

Анализ временной сложности разработанного алгоритма показал, что при фиксированных вероятностях кроссовера и мутации выражение будет иметь следующий вид:

$$O(N \cdot G \cdot O(F) \cdot (2O(NL) + O(\log N))),$$

где N – размер популяции, G – число поколений, Таким образом, разработан алгоритм, требующий линейно-логарифмическое времени, что намного быстрее экспоненциального времени $O(F) \cdot 2^{O(n)}$, где n – число возможных мест для установки БС, необходимого для решения поставленной задачи с помощью динамического программирования. Время вычисления покрытия – $O(F)$ зависит от выбранных параметров проекта и одинаково в обоих подходах.

Так же одним из преимуществ использования эволюционного моделирования является предоставление ГА возможностей для реализации на архитектуре, допускающей параллельные процессы.

Проведённый анализ сходимости решений (рис. 9) показал, что худшие варианты популяций достигают оптимума уже на 250 шаге, что позволяет судить о высокой эффективности разработанной методологии.

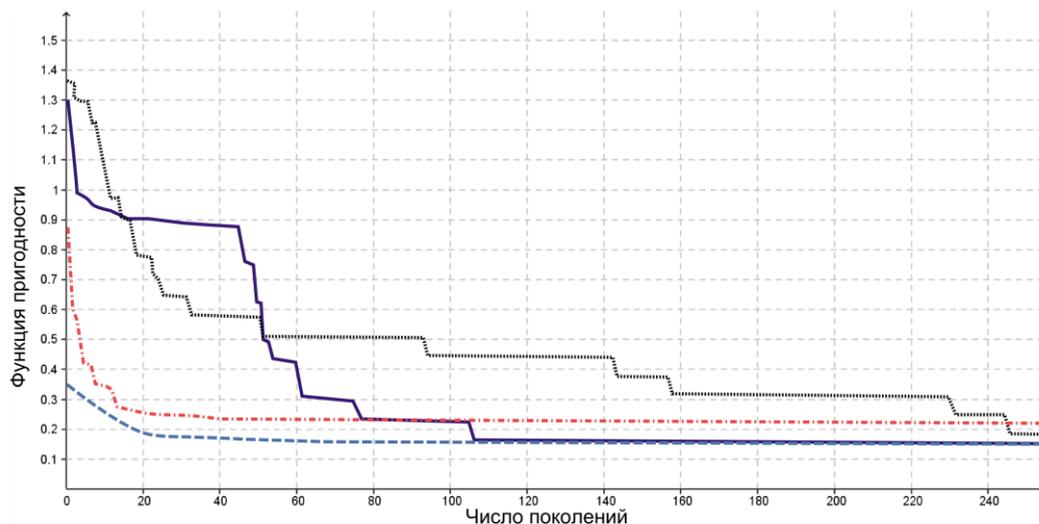


Рисунок 9 – Анализ сходимости решений

Основные результаты диссертационного исследования:

1. Предложены методы многокритериальной оптимизации, основанные на оптимальности по Парето, для решения проблем краткосрочного и долгосрочного планирования и проектирования телекоммуникационных сетей различных типов.

2. Составлена методология автоматизации проектирования сети радиосвязи, позволяющая проводить расчеты по выбранной области в автоматическом режиме.

3. Синтезирован гибридный алгоритм поиска оптимального решения, основанный на применении методов многокритериальной оптимизации, эволюционного моделирования и метода анализа иерархий.

4. Разработан математический аппарат и инструментальные средства в виде программного комплекса автоматизации процесса проектирования, особенностью которого является использование разработанных методик, что позволяет находить более точные решения прикладных задач за ограниченное время.

5. Проведены исследования эффективности разработанных методик: при решении задач, возникающих при планировании сетей, с помощью комплекса автоматизированного планирования достигается сокращение времени разработки плана сети на 80%, а также эффективность использования ресурсов возрастает на 26%, управление рисками – на 19%.

6. Компоненты программного комплекса прошли государственную регистрацию в ФГАНУ «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти».

7. Программный комплекс внедрён ЦСИР АО «НТЦ РЭБ», для использования в составе разрабатываемых комплексов в качестве подсистемы планирования радиосвязи.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, определенных ВАК:

1. Сковпин, М.С. Планирование и оптимизация сетей сотовой связи / М.С. Сковпин, М.Л. Лапшина [Текст]// Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2013. – Т.9, №6-3. – С.81–84.

2. Сковпин, М.С. Оптимальный прием и обработка радиосигналов в нелинейном канале ВЧ-облучения для дистанционного снятия акустической информации [Текст]/ В.Б. Авдеев, С.Н. Панычев, Н.Г. Денисенко, Н.А. Самоцвет, М.С. Сковпин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2014. – Т. 10. № 5. – С. 94–98.

3. Сковпин, М.С. Многокритериальный подход к автоматизации проектирования радиосетей [Текст]/ М.С. Сковпин, М.Л. Лапшина // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2016: Сборник трудов. – М.: ИППМ РАН, 2016. – С.252–259.

Свидетельства на программу для электронных вычислительных машин:

4. Сковпин, М.С. Система автоматизированного проектирования радиосетей на основе моделей многокритериального выбора [Текст]/ М.С. Сковпин, М.Л. Лапшина. – М.: ФГАНУ «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти». Госрегистрация № 50201550514 от 05.11.2015 г.

Статьи, материалы конференций:

5. Сковпин М. С. Автоматизация процесса оптимального проектирования сетей радиосвязи [Текст] / М. С. Сковпин, М. Л. Лапшина, Н. С. Сковпин // Научные исследования: теория, методика и практика: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 27 авг. 2017 г.) – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017 – С.241–249.

6. Сковпин, М.С. Взаимодействие вычислительного кластера и метода принятия решений [Текст]/ М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин // Actualscience. – Пенза: ООО Актуальность.РФ, 2016. – Т.2, №5. – С.50–51.

7. Сковпин, М.С. Обработка больших объемов данных для принятия управленческих решений [Текст]/ М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин // Интеллектуальные информационные системы: Труды Всероссийской конференции – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – С.220–223.

8. Сковпин, М.С. Метод анализа иерархий в сложных информационных системах [Текст]/ М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2015. – С.10–15.

9. Сковпин, М.С. Применение метода анализа иерархий при принятии управленческих решений [Текст]/ М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2015. – С.99–102.

10. Сковпин, М.С. Автоматизация проектирования телекоммуникационных сетей [Текст]/ М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин, М.Л. Лапшина // Инновационные технологии в науке и образовании. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – №4. – С.315–320.

11. Сковпин, М.С. Применение моделей многокритериальной оптимизации для автоматизации проектирования телекоммуникационных сетей [Текст]/ М.С. Сковпин, Н.С. Сковпин, М.Л. Лапшина // Моделирование систем и процессов. – Воронеж: Изд-во ВЛГТУ им. Г.Ф. Морозова, 2015. – №4. – С.64–70.

12. Сковпин, М.С. Разработка системы автоматизированного проектирования радиосетей на основе моделей многокритериального выбора [Текст] / Сборник докладов конференции «Инновационные разработки молодых ученых воронежской области на службу региона». – Воронеж: Воронежский центр научно-технической информации, 2015. С. 92-94

13. Сковпин, М.С. Оптимальное планирование телекоммуникационных сетей на основе моделей многокритериального выбора [Текст]/ М.С. Сковпин // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики: Материалы 4-й научно-практической internet- конференции. – Ульяновск: SIMJET, 2014. – С.24–29.

14. Сковпин, М.С. Применение метаэвристик для автоматизации задач проектирования телекоммуникационных сетей [Текст]/ М.С. Сковпин // Моделирование систем и процессов. – Воронеж: Изд-во ВЛГТУ им. Г.Ф. Морозова, 2014. – №3. – С.32–36.

15. Сковпин, М.С. Применение моделей многокритериального выбора при планировании телекоммуникационных сетей [Текст]/ М.С. Сковпин // Радиолокация, радионавигация, связь: Материалы XX Международной НТК (RLNC-2014). – Воронеж: Изд-во НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2014. – С.834–839.

16. Сковпин, М.С. Разработка системы автоматизированного проектирования радиосетей на основе моделей многокритериального выбора / М.С. Сковпин // Инновационные технологии на базе фундаментальных научных разработок – прорыв в будущее: Сборник докладов. – Воронеж: Воронежский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго РФ, 2014. – С.51–53.

17. Сковпин, М.С. Radio Network Planning Management on the Basis of Multiobjective Choice Models [Текст]/ М.С. Сковпин // Актуальные проблемы профессионального образования: подходы и перспективы: Материалы XI-ой международной, научно-практической конференции. – Воронеж: ВИВТ, 2013. – С.481–483.

18. Сковпин, М.С. Использование моделирования при планировании радиосетей [Текст]/ М.С. Сковпин, М.Л. Лапшина // Интеллектуальные информационные системы: материалы всероссийской конференции – Воронеж: ВГТУ, 2013. – С.67–72.

19. Сковпин, М.С. Применение пространственно–распределенных систем РЭБ для противодействия радионавигационным системам [Текст]/ М.С. Сковпин // Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО: Сборник докладов IV Научно–технической конференции молодых ученых и специалистов. – М.: ГСКБ «АЛМАЗ–АНТЕЙ», 2013. – С.341–347.

20. Сковпин, М.С. Управление частотно-территориальным планированием радиосетей на основе генетических алгоритмов [Текст]/ М.С. Сковпин // «ПЕРСПЕКТИВА – 2013»: Сборник статей межвузовской научно–практической конференции военно-научного общества курсантов и молодых ученых. – Воронеж: ВУНЦ ВВС "ВВА", 2013. – С.218–231.

21. Сковпин, М.С. Моделирование приёма и обработки случайных радиосигналов и помех [Текст]/ С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, М.С. Сковпин // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. – Воронеж: ВГТУ, 2013. – С. 18–19.

Подписано в печать _____

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Тираж 80 экз. Заказ № _____

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14