

УКРАИНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

САЕНКО Александр Сергеевич

УДК 656.254.16:621.396.931

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ СТАНДАРТА GSM-R

05.12.02 – Телекоммуникационные системы и сети

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент  
КНИГАВКО Николай  
Владимирович

Харьков-2009

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |   |
|---|---|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 8                                       |
| РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ<br>ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ<br>ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОСВЯЗИ.....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b>     |
| 1.1. Основные требования функциональным возможностям и надежности<br>работы сетей ЖТР .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b>     |
| 1.2. Краткий обзор основных элементов сети стандарта GSM-R ....   | <b>Error!<br/>Bookmark not defined.</b> |
| 1.3. Основные этапы проектирования сетей подвижной связи .....  | <b>Error!<br/>Bookmark not defined.</b> |
| 1.4. Анализ действующих рекомендаций ЧТП сетей ЖТР .....  | <b>Error!<br/>Bookmark not defined.</b> |
| 1.4.1. Методика расчета дальности радиосвязи, рекомендуемая<br>инструкцией ЦШ 4818 .....  | <b>Error! Bookmark not defined.</b>     |
| 1.4.2. Порядок обеспечения ЭМС при проектировании сетей ЖТР по<br>действующим рекомендациям .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b>     |
| 1.5. Анализ существующего программного обеспечения для ЧТП и<br>оценка возможности его использования при проектировании сетей ЖТР   | <b>Error! Bookmark not defined.</b>     |
| Выводы по первому разделу .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b>     |
| 5. Сделан вывод об актуальности разработки автоматизированного метода<br>ЧТП сетей стандарта GSM-R, который позволит учесть специфику<br>построения, жесткие требования к надежности и качеству работы систем<br>ЖТР а также одновременно уменьшить материальные затраты на<br>строительство и эксплуатацию. .... | <b>Error! Bookmark not defined.</b>     |
| РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ<br>ЧАСТОТНО – ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТИ<br>ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОСВЯЗИ<br>СТАНДАРТА GSM-R .....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b>     |

2.1. Формализация задачи ЧТП сети ЖТР стандарта GSM-R .....**Error!**

**Bookmark not defined.**

2.1.1. Анализ способов уменьшения материальных затрат на создание и эксплуатацию сети GSM-R на ЧТП**Error! Bookmark not defined.**

2.1.2. Анализ показателей качества, предъявляемых к сети**Error! Bookmark not defined.**

2.1.3. Влияние конфигурации подсистемы БС на структурную надежность сети GSM-R ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.1.4. Вероятность отказа абоненту в обслуживании с учетом занятости радиочастотных каналов и наличия приоритетов**Error! Bookmark not defined.**

2.1.5. Критерий качества передачи речи **Error! Bookmark not defined.**

2.2. Формализация задачи обеспечения ЭМС сети GSM-R .....**Error!**

**Bookmark not defined.**

2.3. Формализация и анализ задачи ЧТП сети GSM-R.. **Error! Bookmark not defined.**

2.3.1. Анализ размера пространства поиска решений, задачи ЧТП сети стандарта GSM-R ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.4. Разработка методики решения задачи ЧТП сети GSM-R .....**Error!**

**Bookmark not defined.**

Выводы по второму разделу..... **Error! Bookmark not defined.**

РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ К МЕТОДУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОСИГНАЛА НА ЧАСТОТЕ 900 МГц, В УСЛОВИЯХ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ... **Error! Bookmark not defined.**

3.1. Постановка задачи ..... **Error! Bookmark not defined.**

3.2. Разработка метода оценки влияние погрешности прогнозирования потерь при распространении радиосигнала, на стоимость получаемых конфигураций подсистемы БС сети GSM-R **Error! Bookmark not defined.**

3.3. Анализ существующих методик прогнозирования потерь при распространении радиосигнала и возможности их модификации с целью

использования для расчета дальности радиосвязи ЖТР .. **Error! Bookmark not defined.**

- 3.3.1. Методика расчета дальности радиосвязи, основанная на модели распространения радиоволн в свободном пространстве **Error! Bookmark not defined.**
- 3.3.2. Методика расчета зоны обслуживания Окамуры - Хата **Error! Bookmark not defined.**
- 3.3.3. Методика расчета зоны обслуживания на основе рекомендации МСЭ Р.370 ..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.3.4. Методика расчета зоны обслуживания на основе модели Уолфиш-Икегами ..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.3.5. Сравнительная характеристика рассмотренных методов расчета зоны обслуживания ..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.4. Экспериментальное исследование особенностей распространения сигнала, диапазона частот 900 МГц, на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов ..... **Error! Bookmark not defined.**
  - 3.4.1. Экспериментальное исследование быстрых замираний сигнала на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов **Error! Bookmark not defined.**
  - 3.4.2. Исследование медленных замираний сигнала на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов **Error! Bookmark not defined.**
- 3.5. Метод учёта рельефа местности при расчете потерь распространения радиоволн ..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.6. Разработка гибридной модели прогнозирования ослабления сигнала при распространении ..... **Error! Bookmark not defined.**
  - 3.6.1. Анализ возможности использования многослойного персептрона для прогнозирования величины медленного замирания сигнала ..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.7. Влияние погрешности прогнозирования потерь при распространении радиосигнала, на точность получаемых решений поиска расположения БС ..... **Error! Bookmark not defined.**
- Выводы по третьему разделу ..... **Error! Bookmark not defined.**

РАЗДЕЛ 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ГРУПП  
ЧАСТОТНЫХ ПРИСВОЕНИЙ СОТАМ СЕТИ ЖТР СТАНДАРТА GSM-R  
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС ..... **Error! Bookmark not defined.**

4.1. Классификация технических характеристик, влияющих на  
электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств.....**Error!**  
**Bookmark not defined.**

4.2. Экспериментально - теоретическое исследование влияния  
внутрисистемных помех на качество функционирования сети GSM-R  
**Error! Bookmark not defined.**

4.2.1. Постановка задачи исследования. **Error! Bookmark not defined.**

4.2.2. Теоретическое исследование влияния помех по основному и  
соседнему каналам ..... **Error! Bookmark not defined.**

4.2.3. Экспериментальное исследование влияния соотношения  
сигнал/помеха по основному каналу приема, на уровень битовых  
ошибок в радиоканале ..... **Error! Bookmark not defined.**

4.2.4. Исследование влияния помех по соседнему каналу приема**Error! Bookmark**

4.2.5. Определение минимально-допустимого соотношения  
сигнал/помеха по основному и соседнему каналам приема для  
выполнения частотного планирования ЖТР стандарта GSM-R**Error! Bookmark**

4.3. Разработка автоматизированного метода оптимального присвоения  
частот сети ЖТР стандарта GSM-R ..... **Error! Bookmark not defined.**

4.3.1. Краткий обзор существующих методов формирования групп  
частотных присвоений для радиосетей, использующих принцип  
повторного использования частот ..... **Error! Bookmark not defined.**

4.3.2. Эвристический метод формирования групп частотных  
присвоений сотам сети GSM-R на основе “жадного” алгоритма**Error! Bookmark**

4.3.3. Разработка комбинированного метода решения задачи  
присвоения частот сети GSM-R..... **Error! Bookmark not defined.**

Выводы по четвертому разделу ..... **Error! Bookmark not defined.**

РАЗДЕЛ 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ БС СЕТИ GSM-R ПО  
КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНОЙ СТОИМОСТИ.....**Error! Bookmark not  
defined.**

5.1. Анализ возможности применения существующих методов решения  
задачи об обобщенном покрытии, для определения оптимальных мест  
установки БС сети GSM-R ..... **Error! Bookmark not defined.**

5.2. Разработка метода генетического алгоритма выбора оптимальных  
мест установки БС сети GSM-R..... **Error! Bookmark not defined.**

5.2.1. Выбор способа кодирования конфигурации ПБС в хромосому**Error! Boo**

5.2.2. Разработка модели целевой функции ГА**Error! Bookmark not defined.**

5.2.3. Выбор метода селекции ГА ..... **Error! Bookmark not defined.**

5.2.4. Выбор вида оператора кроссинговера**Error! Bookmark not defined.**

5.2.5. Выбор вида оператора мутации.... **Error! Bookmark not defined.**

5.2.6. Разработка метода формирования начальной популяции**Error! Bookmark**

5.2.7. Разработка метода оператора восстановления**Error! Bookmark not defin**

5.3. Определение параметров метода ГА определения оптимальных мест  
установки БС ..... **Error! Bookmark not defined.**

5.3.1. Определение оптимальной вероятности применения оператора  
мутации ..... **Error! Bookmark not defined.**

5.3.2. Определение размера начальной популяции**Error! Bookmark not defined**

5.4. Анализ результатов работы разработанного метода ГА выбора  
оптимальных мест установки БС сети GSM-R**Error! Bookmark not defined.**

Выводы по пятому разделу ..... **Error! Bookmark not defined.**

ВЫВОДЫ ..... **Error! Bookmark not defined.**

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ..... 17

ПРИЛОЖЕНИЕ А ..... **Error! Bookmark not defined.**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ..... **Error! Bookmark not defined.**

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

|       |  |
|-------|--|
| GSM-R | Global System for Mobile communications — Railway  |
| GSM   | Global System for Mobile Communications            |
| HLR   | Home Location Register                             |
| MSC   | Mobile Switching Center                            |
| VLR   | Visitor Location Register                          |
| БЗ    | быстрые замирания                                  |
| БС    | базовая станция                                    |
| ГА    | генетический алгоритм                              |
| ЖТР   | железнодорожная технологическая радиосвязь         |
| ЗО    | зона обслуживания                                  |
| ЗП    | зона помех   |
| КБС   | контроллер базовых станций                         |
| КС    | канал связи  |
| МЗ    | медленные замирания                                |
| МС    | мобильная (подвижная) станция                      |
| НГОР  | нижняя граница минимальной области распространения |
| НС    | нейронная сеть                                     |
| ПКС   | подсистема каналов связи                           |
| ПКЦ   | подсистема коммутации                              |
| ПРС   | поездная радиосвязь                                |
| РОРС  | ремонтно-оперативная радиосвязь                    |
| САПР  | система автоматизированного проектирования         |
| СМО   | система массового обслуживания                     |
| СРС   | станционная радиосвязь                             |
| ЧТП   | частотно-территориальное планирование              |

## ВВЕДЕНИЕ

Важная роль в осуществлении железнодорожных перевозок отводится системе технологической радиосвязи, как средству оперативного управления перевозочным процессом, обеспечения безопасности движения, контроля состояния железнодорожных устройств, организации и осуществления технологических процессов, выполняемых линейными подразделениями железнодорожного транспорта [67]. Это предъявляет особые требования к надежности и качеству функционирования железнодорожных радиосетей.

Существующие, аналоговые системы железнодорожной технологической радиосвязи (ЖТР) имеют много недостатков: низкая помехозащищенность приводит к ухудшению разборчивости передаваемой речи, система вызова требуемых абонентов обладает малой оперативностью, низкая надежность используемого оборудования, ограниченные функциональные возможности.

Устранить упомянутые недостатки возможно при переходе к цифровым системам технологической радиосвязи [15], основными преимуществами которых, по сравнению с аналоговыми, являются: более высокое качество передачи речи, повышение эффективности использования радиочастотного спектра, задание приоритетов в предоставлении каналов, передача данных, выход во внешние сети передачи информации.

Использование функций цифровых сетей ЖТР открывает принципиально новые возможности, позволяющие значительно повысить производительность и безопасность перевозочного процесса. К таким возможностям относятся:

1. Интеграция всех существующих сетей технологической радиосвязи: станционной, поездной, ремонтно-оперативной;
2. Динамическое предоставление радиоканала группам абонентов, решающих общую производственную задачу;
3. Организация базы данных оперативной информации о каждом



блок - участке с безусловным ее донесением до машинистов поездных локомотивов, находящихся в пределах этого блок – участка;

4. Организация интервального регулирования поездов с передачей управляющей информации по радиоканалам (подвижные блок - участки).

Для реализации указанных функций подвижной железнодорожной связи требуется обеспечивать высокую надежность цифровых радиоканалов, определяемую качеством выполнения проектных работ.

Частотно-территориальное планирование (ЧТП) сети радиосвязи - это сложная многопараметрическая задача, решить которую возможно лишь при использовании системного подхода. Наиболее трудоемкими этапами ЧТП являются: поиск оптимального расположения БС, прогнозирование ослабления радиосигнала на трассе при распространении, выполнение частотных присвоений. Анализ современного состояния данного вопроса показывает, что в настоящее время не существует универсальных рекомендаций, на основе которых с общих позиций могли бы быть сформулированы и решены задачи ЧТП сети ЖТР. Это, обусловлено тем, что точное решение даже некоторых частных задач ЧТП, сопряжено с большими вычислительными трудностями (большинство задач являются NP-полными) и зачастую для их решения могут быть использованы только приближенные методы и алгоритмы.

**Анализ литературы.** В настоящее время, порядок проектирования сетей радиосвязи УЗ регламентируется отраслевыми нормативными документами, главными из которых являются «Правила организации и расчета сетей железнодорожной радиосвязи» [67]. Данные документы предписывают порядок и методологию проектирования аналоговых сетей ЖТР в диапазонах 2,13; 150 и 330 МГц, и не содержат рекомендаций к проектированию радиосетей стандарта GSM-R. Вопросами проектирования сетей ЖТР в диапазонах частот 2.13, 150, 330 МГц в разное время занимались: Ю.В. Ваванов, Э.С Головин, А.В. Елизаренко, В.И. Зыков, А.М. Вериги, Ю.Я. Мемерсон, К.К. Алмазян, А.Ф. Фомин [13,23,24,35,64].

Основным документом, описывающим технические характеристики стандарта GSM-R, является “European Integrated Railway Radio Enhanced Network System Requirements Specification.” [81]. В этом документе описаны основные принципы построения сети, приведены некоторые рекомендации по проектированию. Однако этот документ несет лишь общую информацию, рекомендации по ЧТП имеют поверхностный характер, недостаточный для выполнения проектирования сетей этого стандарта.

Стандарт GSM-R основан на стандарте GSM, для которого существует ряд рекомендаций [92,91,82], излагающих основные подходы к ЧТП сетей GSM общего назначения. Вопросам ЧТП посвящено также много работ как отечественных [3,26,45,2,6,70,72,49] так и зарубежных [75,76,99,90,119,101] авторов, однако, вопросы проектирования сетей цифровой ЖТР затронуты лишь в нескольких работах [72,49,90]. Рекомендации к ЧТП сетей общего назначения, не учитывают специфику проектирования радиосетей ЖТР, что может привести к невыполнению некоторых специфических технических требований, а также введению излишней аппаратной избыточности, значительно увеличивающей стоимость сети. Более того, анализ работ [72,49,90], показал, что в них отсутствует полноценная реализация метода автоматизированного ЧТП сетей ЖТР стандарта GSM-R, а также не рассмотрены многие важные этапы планирования (поиск оптимального размещения БС, и их конфигурации).

**Актуальность темы диссертационной работы.** В соответствии с принятой программой реформирования железнодорожного транспорта на 2008-2015 г [17], одним из стратегических направлений развития УЗ является интеграция железных дорог Украины в европейскую транспортную систему. Это невозможно без внедрения цифровой технологической радиосвязи стандарта GSM-R, который рекомендован Международным союзом железных дорог к использованию на европейских железных дорогах.

В тоже время, действующие правила и рекомендации по проектированию сетей ЖТР УЗ [67], не содержат рекомендаций

относительно планирования цифровых радиосетей, а спецификация, которая описывает стандарт GSM-R, несет лишь общую информацию, недостаточную для ЧТП сетей этого стандарта. Существующие методы ЧТП сетей стандарта GSM общего пользования не учитывают специфику ЖТР, что при их использовании для проектирования сетей GSM-R, может привести к невыполнению заданных показателей качества или значительно увеличить стоимость проектируемой сети. Это требует усовершенствования существующих и разработки новых методов решения отдельных расчетных этапов ЧТП, что и обуславливает актуальность темы диссертации.

Сложность ЧТП делает обязательным использование для его реализации современных вычислительных средств и специального программного обеспечения. В связи с чем, приобретает актуальность научно-техническая задача разработки метода автоматизированного частотно-территориального планирования сети стандарта GSM-R.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Результаты диссертационной работы вошли в научно-исследовательские работы “Дослідження та визначення методів та засобів радіомоніторингу на залізницях України” (№ ДР 0107U007062), “Правила організації та розрахунку мереж поїздного радіозв'язку” (№ ДР 0107U007063), а також “Дослідження існуючих видів дуплексного радіозв'язку з метою визначення системи радіозв'язку прийнятної для впровадження на залізничному транспорті України”(№ ДР 0109U001518), которые выполнялись на кафедре “Транспортная связь” Украинской государственной академии железнодорожного транспорта согласно Государственной программе реформирования железнодорожного транспорта на 2008-2015 годы [46]. Также переход к цифровым системам технологической связи намечен в документах: «Концепція Національної програми інформатизації» [28] ; «Концепція розвитку зв'язку України до 2010 року» [29]; «Концепція створення Державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами » [30].

**Цель и задачи исследования.** Целью исследований, проводимых в работе, является снижение затрат на строительство сети железнодорожной технологической радиосвязи стандарта GSM-R, путем разработки метода автоматизированного ЧТП сетей этого стандарта, позволяющего получать оптимальные, по критерию минимальной стоимости, конфигурации сети, обеспечивая при этом заданные показатели качества.

Научной задачей исследований является разработка метода автоматизированного ЧТП сетей ЖТР стандарта GSM-R, позволяющего получать оптимальные, по критерию минимальной стоимости, конфигурации сети, обеспечивая при этом заданные показатели качества.

Сложность достижения поставленной цели состоит в отсутствии универсального метода ЧТП и недостаточности опыта проектирования и эксплуатации цифровых сетей ЖТР в условиях инфраструктуры железных дорог Украины.

Поскольку большинство частных подзадач ЧТП являются NP-полными для их решения могут быть использованы только приближенные методы поиска решения.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить ряд научных и практических задач:

1. Формализовать задачу ЧТП сети ЖТР стандарта GSM-R в виде задачи оптимизации по критерию минимальной стоимости, и ограничениями, заданными требуемыми показателями качества;
2. Определить метод прогнозирования ослабления сигнала на трассе распространения, наиболее пригодный для применения в процессе ЧТП сетей ЖТР стандарта GSM-R в условиях инфраструктуры железных дорог Украины;
3. Разработать метод оценки влияния погрешности прогнозирования ослабления радиосигнала при распространении, на количество необходимых БС сети GSM-R.
4. Разработать метод формирования групп частотных присвоений сотам

сети ЖТП стандарта GSM-R, для обеспечения ЭМС.

5. Разработать метод поиска оптимальных, по критерию минимальных материальных затрат, мест установки БС сети ЖТП стандарта GSM-R.

**Объектом исследования** является процесс частотно-территориального планирования сети подвижной технологической железнодорожной радиосвязи стандарта GSM-R.

**Предметом исследования** является метод автоматизированного частотно-территориального планирования сетей железнодорожной технологической радиосвязи стандарта GSM-R, позволяющий получать оптимальные, по критерию минимальной стоимости, конфигурации сети, обеспечивая при этом заданные показатели качества.

**Методы исследования.** При формализации задачи ЧТП сети GSM-R использовались методы теории множеств, теории электросвязи, теории вероятностей, теории дискретной оптимизации. При разработке метода формирования групп частотных присвоений радиосотам сети GSM-R использованы методы комбинаторики, элементы теории графов, методы операционного исчисления, математического и имитационного моделирования на ЭВМ. При разработке метода поиска оптимальных мест установки БС использовались методы теории генетических алгоритмов, методы математического и имитационного моделирования на ЭВМ. Методы математической статистики использованы при обработке результатов экспериментальных исследований.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые разработан метод автоматизированного поиска оптимального варианта размещения БС сети GSM-R [50,51,53] с использованием генетического алгоритма, который отличается от известных введением дополнительного оператора “восстановления”, который позволил обеспечить получение допустимых конфигураций сети после операций кроссинговера и мутации, за счет локальной оптимизации параметров радиосот, а также предложенной эвристической процедурой формирования

начальной популяции, которая учитывает территориальное распределение прогнозируемого ослабления сигнала от каждой БС на местности. Это позволило снизить стоимость получаемых конфигураций подсистемы БС проектируемой сети GSM-R, а также уменьшить время поиска решения.

2. Впервые разработан метод оценки влияния погрешности прогнозирования ослабления сигнала на трассе распространения, на точность получаемых решений расположения БС сети GSM-R [52], который отличается от известных, вероятностным описанием ожидаемого количества необходимых БС. Это позволяет приводить сравнительный анализ разных методик прогнозирования ослабления радиосигнала на трассе распространения, и определять степень их влияния на эффективность ЧТП сетей подвижной радиосвязи, которые имеют линейную форму зон обслуживания и нерегулярную сотовую структуру.

3. Получил дальнейшее развитие метод формирования групп частотных присвоений БС сети GSM-R [58,54], который отличается от известных комплексным применением эвристического и случайного методов поиска решения, что позволило увеличить вероятность получения решений с минимальным числом необходимых частотных каналов, при приемлемом времени поиска решения.

#### **Практическое значение полученных результатов.**

1. Разработанный метод ЧТП сетей стандарта GSM-R позволяет уменьшить материальные затраты на строительство проектируемой сети, благодаря применению поиска оптимального размещения БС. По результатам моделирования на ЭВМ уменьшение стоимости строительства проектируемой сети в среднем составляет 9,3%.

2. Расширена область применения метода Окамуры-Хата прогнозирования ослабления радиосигнала на трассе распространения, за счет введения дополнительных коэффициентов ослабления, обусловленных влиянием инфраструктуры железной дороги, определенных экспериментально [60,59]. Это позволяет применить его для прогнозирования

зон обслуживания БС на частоте 900 МГц, в условиях инфраструктуры железной дороги.

3. На основе экспериментальных статистических данных определена величина минимально-допустимого значения отношения сигнал/помеха по основному и соседнему каналам приема, для сети GSM-R, при условии обеспечения слоговой разборчивости речи не менее 80%, с вероятностью 0,95, которые составили 14 дБ и -2 дБ соответственно [58]. Это позволяет учитывать жесткие требования к качеству работы систем ЖТР при ЧТП сетей стандарта GSM-R.

4. Разработанный метод формирования групп частотных присвоений радиосотам сети GSM-R [54], позволяет уменьшить количество необходимых частотных каналов, обеспечивая при этом ЭМС. По результатам моделирования на ЭВМ уменьшение количества необходимых частотных каналов в сравнении с решением полученным методом наискорейшего спуска составляет 20%, в более чем 90% случаев.

Вышеизложенные пункты является составляющими метода автоматизированного ЧТП сетей стандарта GSM-R, реализация которого в виде программного обеспечения, позволяет автоматизировать процесс планирования сетей данного стандарта, обеспечивая при этом жесткие требования к надежности и качеству работы систем ЖТР.

Материалы диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры “Транспортная связь” Украинской государственной академии железнодорожного транспорта (акт о внедрении от 20.11.2008), а также ЗАО «Украинская мобильная связь» в рамках программы по улучшению качества покрытия на основных направлениях железных дорог (акт о внедрении от 4.12.2008).

**Достоверность результатов**, полученных теоретически, обеспечивается корректностью использованных в работе физических и математических моделей и подтверждается данными, полученными экспериментально. В свою очередь, корректность результатов измерений

обеспечена использованием для их проведения сертифицированного оборудования, прошедшего метрологическую проверку.

**Личный вклад соискателя.** В работе [53] автору принадлежит разработка метода автоматизированного поиска оптимального размещения базовых станций, проектируемой сети GSM-R, построенного на принципах генетического алгоритма. В работе [60] автором выполнено экспериментальное исследование, произведена статистическая обработка полученных результатов.

**Апробация результатов диссертации** проводилась на 4-х научно-технических конференциях: 9-й международный форум “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (Харьков 2005), 12-й международный форум “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (Харьков 2008), 70-я международная научно-практическая конференция кафедр академии и специалистов железнодорожного транспорта (Харьков 2008), 21-я международная научно-практическая конференция: “Перспективные компьютерные управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины” (Алушта 2008 г).

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования освещены в 8 научных работах, которые опубликованы в научных специализированных изданиях, включенных в перечень ВАК Украины [50,51,58,52,59,53,54,60], а так же в тезисах докладов на 3-х научно-технических конференциях [55,56,57].

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из вступления, пяти разделов, выводов, списка использованных источников, приложений. Основное содержание работы изложено на 169 страницах, в том числе два приложения на 8 страницах, 33 рисунка на 16 страницах, 9 таблиц, список использованных источников из 119 наименований на 11 страницах.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афонин С. В. Проблемы электромагнитной совместимости систем сотовой связи / С. В.Афонин, В.Ф. Корсак // Зв'язок.- 2004. -№ 4.- С 26-29.
2. Бабков В.Ю. Качество услуг мобильной связи. Оценка, контроль и управление / В.Ю. Бабков, П.В. Полынцев, В.И. Устюжанин – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 160с.
3. Бабков В.Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, П.А. Михайлов –М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 220с.
4. Бакланов И.Г. Тестирование и диагностика систем связи / И.Г. Бакланов // – М.:Эко-Трендз, 2001. – 265 с.
5. Балдин Е.В. Случайная и детерминированная компоненты в эволюционном моделировании / Е.В. Балдин // Интеллектуальные системы: № 6, 2001. С. 12–32.
6. Білоус Ю.В. Методи територіально-частотного планування стільникових систем рухомого радіозв'язку та аналіз їх ефективності : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. : спец. 05.12.02 “телекомунікаційні системи та мережі ” / Білоус Юрій Васильович – Харків 2003. – 23 с.
7. Боровиков В. П. Нейронные сети. Statistica Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / В. П. Боровиков. – М. : Горячая Линия-Телеком, 2008. – 392 с.
8. Быков Ю.С. Теория разборчивости речи в линиях связи. / Быков Ю.С. - М. : Научный институт самолетного оборудования , 1963 – 228с.
9. Ваванов Ю. В. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств на железнодорожном транспорте / Ваванов Ю. В. - Автоматика, телемеханика и связь, 1984, № 5, с. 42-46

- 10.Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель М.-Наука, 1969 – 678 с.
- 11.Винокуров В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Винокуров В.И., Винофадов Е.М., Харченко И.П. — Л.: Судостроение, 1986. – 389 с.
- 12.Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Гладков Л.А., Курейчик В.В. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006.- 320 с.
- 13.Головин Э.С. Мультипликативные помехи в сетях железнодорожной радиосвязи / Э.С. Головин – М.: Транспорт ,1985. – 200 с.
- 14.Гончаров Е. Н. Поведение вероятностных жадных алгоритмов для многостадийной задачи размещения / Е. Н. Гончаров, Ю. А. Кочетов // Дискретный анализ и исследования операций: № 6, 1999. С. 12–32
- 15.Горелов Г.В. Системы связи с подвижными объектами: Учеб. Пособие / Горелов Г.В., Загарий Г.И. – Х.:ЧП издательство “Новое слово”, 2003. – 200 с.
- 16.ГОСТ 16600-72 Передача речи по трактам радиотелефонной связи. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных испытаний. -М.: 1972-125с.
- 17.Державна програма реформування залізничного транспорту на 2008-2015 роки, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2006р. № 651-р.
- 18.Джейсуол Н. Очереди с приоритетами. / Джейсуол Н. - М.: Мир, 1973. - 280 с.
- 19.Дядюнов А.Н. Решетников В.В. Оценка качества речевого канала связи стандарта GSM-900 / А.Н. Дядюнов, В.В. Решетников // Научный вестник Московского Государственного Технического Университета Гражданской Авиации – 2001.№ 35- с. 216-226.
- 20.Еремеев А. В. Генетический алгоритм для задачи о покрытии / А. В. Еремеев // Дискретный анализ и исследования операций: Серия 2. Том 7, № 1, 2000. С. 47-60

21. Еремеев А. В. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования / А. В. Еремеев, Л. А. Заозерскал, А. А. Колоколов // Дискретный анализ и исследования операций: Серия 2. Том 7, № 2, 2000. С. 22-46
22. Зайченко Ю. П. Структурная оптимизация сетей ЭВМ / Зайченко Ю. П., Гонта Ю. В. – К.: Техніка, 1986. – 168 с.
23. Зражевский Г.Н. Поездная и станционная радиосвязь / Зражевский Г.Н., Вованов Ю.В., Елизаренко А.В., Танцюра А.А., Тропкин С.И. - М.: «Транспорт» 1978 – 344 с.
24. Зыков В.И. Оценка функционирования технологической радиосвязи в системе транспорт / Зыков В.И. - Автоматика, телемеханика и связь, 1982, № 7, с. 42-46
25. Калан Р. Основные концепции нейронных сетей / Калан Р : Пер. с англ. – М.:Издательский дом “Вильямс”, 2001. -286 с.
26. Кернов Ю.П. Проектирование мобильных радиосистем / Кернов Ю.П. - М.: МГУПС, 2000.- 90с.
27. Ковалев М.М. Дискретная оптимизация / Ковалев М.М. – М.: Едиториал, 2003 – 192 с.
28. Концепція Національної програми інформатизації, схвалена Законом України «Про Концепцію Національної програми інформатизації» від 4 лютого 1998 р. N 75/98-ВР.
29. Концепція розвитку зв'язку України до 2010 року, затверджена постановою Кабінету Міністрів України «Про Концепцію розвитку зв'язку України до 2010 року» від 9 грудня 1999 р. №2238.
30. Концепція створення Державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження), схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 липня 2003 р. N 410-р.
31. Краткое описание основных возможностей программы TEMS CellPlanner [Электронный ресурс] // Сайт компании Ericsson. — Режим доступа:

<http://www.ericsson.com/ru/solutions/tems/cellplanner.shtml>.— Название с экрана.

32. Кристофидес Н. Теория графов (алгоритмический подход) / Кристофидес Н. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
33. Кузюрин Н. Н. Асимптотически точные полиномиальные алгоритмы в задачах целочисленного линейного программирования / Н. Н. Кузюрин / Дискрет, математика. 1989. Т. 1, вып. 2, С. 78-85.
34. Лутманов С.В. Курс лекций по методам оптимизации / Лутманов С.В. – Инжевск: НИЦ, 2001 – 368 с.
35. Мемерсон Ю.Я. Методы повышения качественных показателей технологической железнодорожной радиосвязи УВЧ диапазона при воздействии мультипликативных помех / Мемерсон Ю.Я. : Автореферат дисс. на соиск. уч.ст. к.т.н. – Л.: 1986. – 21 с.
36. Методические указания по расчету системы ремонтно-оперативной радиосвязи. - М.: Транспорт, 1991. – 47 с.
37. Методические указания по расчету системы станционной радиосвязи. - М.: Транспорт, 1991. – 34 с.
38. Минаков И.А. О выборе оптимального метода селекции для генетического алгоритма / Минаков И.А. Вестник Самарского ГТУ Серия "Технические науки", 2000, № 8. – С. 193-198.
39. Назаров А.В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / Назаров А.В., Лоскутов А.И. – СПб.: Наука и Техника, 2003. – 384 с. 10.
40. Нейман Г.А. Метод случайного поиска граничной точки / Нейман Г.А., Филатов Н.А. - Вестник НИИ СУВПТ - Вып. 7. Красноярск: НИИ СУВПТ, 2001, с. 84-87.
41. Нигматуллин Р. Г. Сложность булевых функций / Р. Г. Нигматуллин - М.: Наука, 1991.
42. Описание и инструкция по эксплуатации пакета программ «ПИАР». — Ярославль: ЯГУ, 1998. – 127 с.

- 43.Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Осовский С. - Пер. с польского – М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
- 44.Подворный П. В. Качество обслуживания абонентов при беспроводном доступе в телекоммуникационных сетях железнодорожного транспорта: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.13.17 “Теоретические основы информатики” / / Подворный Павел Валерьевич. – Москва, 2007.
- 45.Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM / Попов В.И. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
- 46.Програма створення в системі Міністерства транспорту та зв'язку України єдиної транспортної мережі зв'язку.
- 47.P 50.1.033-2001. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. - М.: Изд-во стандартов. 2002. - 87 с.
- 48.Растрингин Л.А. Решение задач разношкальной оптимизации методами случайного поиска / Растрингин Л.А., Фрейманис Э.Э. : Проблемы случайного поиска - Вып. 11. Рига: Зинатне, 1988, с. 9-25.
- 49.Роенков Д.Н. Теория и практика проектирования цифровых сетей подвижной железнодорожной радиосвязи: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.12.13 “Телекоммуникационные системы и сети” / Д.Н. Роенков // СПб, 2003 – 333 с.
- 50.Саенко А.С. Анализ “случайного” метода формирования начальной популяции, для генетического алгоритма в задаче оптимального размещения базовых станций сети стандарта GSM-R / А.С. Саенко // Сб. научных трудов. – Донецк: ДонИЖТ, 2008. – Вып. 15 . –С 44.
- 51.Саенко А.С. Метод поиска оптимального размещения базовых станций сети железнодорожной технологической радиосвязи стандарта GSM-R с применением генетического алгоритма / А.С. Саенко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку УНДІЗ 2008 Вып. 4 – С. 61- 66.

- 52.Саенко А.С. Оценка влияния погрешности прогнозирования ослабления радиосигнала при распространении, на стоимость получаемых конфигураций подсистемы базовых станций сети GSM-R / А.С. Саенко // Сб.научных трудов. – Донецк: ДонИЖТ, 2008. – Вып. 16. –С. 71 – 78.
- 53.Саенко А.С. Метод синтеза оптимальной конфигурации сети технологической радиосвязи стандарта GSM-R / А.С. Саенко, Н.В. Книгавко // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. –2008. -№3. –С. 13-19.
- 54.Саенко А.С. Метод оптимального присвоения частот сети технологической радиосвязи стандарта GSM-R / А.С. Саенко // АСУ и приборы автоматики. – Харьков, ХНУРЕ, 2008. – Вып. 143. С. 68 - 73.
- 55.Саенко А.С. Метод территориально-частотного планирования сети технологической радиосвязи стандарта GSM-R / А.С. Саенко // Матеріали 21-ї міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні комп'ютерні, керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України». – Алушта: 2008. – С. 8.
- 56.Саенко А.С. Применение нейросетевых алгоритмов для прогнозирования изменения напряженности электромагнитного поля / А.С. Саенко // Материалы 9-го международного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» . – Харьков: ХНУРЭ, 2005. - С. 107.
- 57.Саенко А.С. Решение задачи структурной оптимизации сети GSM-R методом генетического алгоритма / А.С. Саенко // Материалы 12-го международного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ, 2008. - С. 161.
- 58.Саенко А.С. Экспериментальное исследование влияния внутрисистемных помех по основному каналу приёма на качество связи стандарта GSM-R / А.С. Саенко // Сб.научных трудов. – Донецк, ДонИЖТ, 2008. – Вып. 14. –С. 101-107.

59. Саенко А.С. Экспериментальное исследование влияния инфраструктуры железной дороги на статистические характеристики быстрых замираний в диапазоне частот 900 МГц / А.С. Саенко // Сб. научных трудов. – Донецк: ДонИЖТ, 2008. – Вып. 13 . –С. 75 – 80.
60. Саенко О.С., Экспериментальне дослідження характеристик каналів у стільникових мережах залізничного технологічного радіозв'язку / О.С. Саенко, А.О. Єлізаренко // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 98. –С. 99-104.
61. Семенкин Е.С. Оптимизация технических систем / Е.С Семенкин., О.Э. Семенкина, С.П. Коробейников - Красноярск: СИБУП, 1996, 292 с.
62. Соловьев В.В. Методы оптимального присвоения частот / Соловьев В.В.// - М. Гейзер, 2000 - 345 с.
63. Т.Кормен Алгоритмы: построение и анализ / Т.Кормен, Ч.Лейзерсон, Р.Ривест / Пер. с англ. под ред. А. Шеня. – М.: МЦНМО, 2002. – 960с.
64. Фомин А.Ф. Помехоустойчивость систем железнодорожной радиосвязи / А.Ф Фомин., Ю.В Ваванов. – М.: Транспорт, 1987. – 295 с.
65. Харченко Т.В. Оценка степени оптимальности присвоения частот с помощью комбинаторных алгоритмов / Т.В. Харченко // Доклады 60-й Научной сессии, посвященной Дню радио. ЗАО АВТЭКС. СПб-2005 г.
66. Хейл У.К. Присвоение частот: теория и приложения / У.К. Хейл // - ТИИЭР, 1980, №2. – 14с.
67. ЦРБ 0004. Правила технічної експлуатації залізниць України. - К.: Транспорт України, 2003. - 256 с.
68. Частотно-территориальное планирование сетей радиосвязи "Балтика-СПС" [Электронный ресурс] // Сайт Ленинградского отраслевого научно-исследовательского института Радио. — Режим доступа: <http://www.loniir.ru/frequ/mobile.htm>. - Название с экрана.
69. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов / Г.Н. Черкесов // Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2005. 479 с.

70. Шорин О.А. Методы оптимального распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук по специальности 05.12.13 – “Системы, сети и устройства телекоммуникаций” / Шорин Олег Александрович. - Москва, 2005. – 351 с.
71. Шубин Е.В. Метод синтеза топологической структуры сети передачи данных по критерию минимальной стоимости с использованием генетического алгоритма: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.12.02 “Телекоммуникационные системы и сети” / Шубин Евгений Владимирович. – Харьков, 2005.- 172 с.
72. Юрченко Д. Ю. Методы повышения эффективности применения технологий широкополосного доступа на железнодорожном транспорте: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.13.17 “Теоретические основы информатики” / Юрченко Денис Юрьевич. – Москва, 2007 – 186 с.
73. Яньшин С.Н. Оптимальное присвоение частот сетям УКВ радиосвязи/ С.Н. Яньшин // Радиотехника, 2000, № 10.
74. Яньшин С.Н., Харченко Т.В., Володин Д.В., Сорокин С.А. Эффективность алгоритмов раскраски графа в задачах оптимального присвоения частот / С.Н. Яньшин, Т.В. Харченко, Д.В. Володин, С.А. Сорокин // Электросвязь, № 1, 2004
75. Ajay Mishra. Advanced Cellular Network Planning and Optimisation / Ajay Mishra - John Wiley & Sons. 2007 – 470p.
76. Ajay Mishra. Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G. John Wiley & Sons. 2004– 590p.
77. Alander J.T. On optimal population size of genetic algorithms. In Proceedings of CompEuro 1992, – P. 65-70. IEEE Computer Society Press.
78. Andreas Eisenblatter. Frequency Assignment in GSM Networks: Models, Heuristics, and Lower Bounds. PhD thesis, Technische Universität Berlin, Fachbereich Mathematik, Berlin, Germany, 2001.



79. Blickle T., Thiele L.A. Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms. TIK-Report 11/12/95.
80. Chvatal V. A greedy heuristic for the set-covering problem // Mathematics of Oper. Res. 1979. V. 4, N 3. P. 233-235.
81. CLA111D004 European Integrated Railway Radio Enhanced Network. System Requirements Specification. 2003. 131 c.
82. COST 231 "Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800 MHz bands (Revision 2)" COST 231 TD (90) 119 Rev 2.
83. D. Kunz, Channel assignment for cellular radio using neural networks., IEEE Trans. Veh. Technol., VT-34, pp. 188-193, Feb. 1991.
84. Davis. L. Handbook of Genetic Algorithms. Van Nostrand Reinhold, 1991.
85. De Jong K.A., Spears W.M. A formal analysis of the role of multi-point crossover in genetic algorithms. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. - № 5(1) – P. 1–26. 1992.
86. De Jong, K.A., Spears, W.M. An Analysis of the Interacting Roles of Population Size and Crossover. Proceedings of the Int'l Workshop Parallel Problem Solving from Nature. – P. 38-47. 1990.
87. De Jong, Kenneth A. An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, Doctoral thesis, Dept. Computer and Communication Sciences, University of Michigan, Ann Arbor. 1975.
88. Diffraction over irregular terrain // Recommendation ITU-R P.526-4: Geneva: ITU, 1996.
89. EN/LZT 1235333. GSM advanced cell planning. Ericsson Radio Systems AB 2005
90. Eric Sauthier. GSM-R Network Planning. GSM-R centre of competence for network planning. GSM-R TS Workshop - Stockholm 2004.
91. ETS 100 974 GSM 09.02 (v. 7.5.0) Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Mobile Application Part (MAP) Specification July 2000

92. ETSI TR 101 362 v8.4.0 Radio network planning aspects (GSM 03.30 version 8.4.0 Release 1999)
93. Feo T. A. Greedy randomized adaptive search procedures // J. Global Optim. 1995. V. 6. P. 109-133.
94. Forsk Atoll RF Planning & Optimisation Software [Электронный ресурс] // Сайт компании Forsk. — Режим доступа: [http://www.forsk.com/images/product/atoll\\_overview/Atoll2\\_7\\_brochure\\_MD.zip](http://www.forsk.com/images/product/atoll_overview/Atoll2_7_brochure_MD.zip). — Название с экрана.
95. Gamst A. Some lower bound for a class of frequency assignment problems. IEEE Trans. Veh. Technol., VT-35, pp. 8-14, Feb. 1986.
96. Goldberg D.E. Optimal initial population size for binary-coded genetic algorithms (TCGA Report №. 85001). Tuscaloosa: University of Alabama, The Clearinghouse for Genetic Algorithms. 1985.
97. Goldberg D.E. Sizing population for serial and parallel genetic algorithms. In Schaffer, J. D. (Ed.), Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, 1989. — P. 70-79. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann. (Also TCGA Report 88004).
98. Grefenstette J. J. Optimization of control parameters for genetic algorithms. IEEE-SMC, SMC-16, — P. 122-128. 1986.
99. Hata, M., “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,” IEEE Trans. Vehicular Technol., **VT-29**(3), 1980.
100. Holland J. Genetic algorithms and the optimal allocations of trails. SIAM Journal of Computing, 2(2), 1973. — P. 88-105.
101. Iana Siomina Radio Network Planning and Resource Optimization: Mathematical Models and Algorithms for UMTS, WLANs, and Ad Hoc Networks Link.oping Studies in Science and Technology, Dissertations Link.oping, Sweden, 2007
102. Jery D. Laster Robust GMSK demodulation using demodulator diversity and BER estimation. Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997. — 241c.

103. Johnson D. S. Approximation algorithms for combinatorial problems // J. Comput. System Sci. 1974. V. 9, N 3. P. 256-278.
104. Lovasz L. On the ratio of optimal integral and fractional covers // Discrete Math. 1975. V. 13, N 4. P. 383-390.
105. Marvin K. S. Digital Communication over Fading Channels. John Wiley & Sons, Inc., publication 2004 – 902p.
106. Mentum-Planet Brochure [Электронный ресурс] // Сайт компании Mentum. – Режим доступа: <http://www.mentum.com/uploads/documents/Mentum-Planet-Brochure.pdf>. — Название с экрана.
107. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz // ITU-R Rec. P.1546-1. Geneva: ITU, 2003.
108. Petty C.B., Leuz M.R., Grefenstette J.J. A parallel genetic algorithm. Genetic algorithms and their applications: Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms, 1987. –P. 155-161.
109. RPS2: Radio Planning System 2 [Электронный ресурс] // Сайт компании «Связь-Телеком-Софт». — Режим доступа: <http://www.rps2.ru/>. — Название с экрана.
110. Schaffer J.D., Caruana R.A., Eshelman L.J., Das. R. A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization. In Proceedings of 3rd International Conference on Genetic Algorithms. Morgan Kaufmann, Los Altos, CA. 1989.
111. Srinivasan A. Improved approximation guarantees for packing and covering integer programs // SIAM J. Comput. 1999. V. 29, N 2. P. 648-670.
112. Stocker, K.E., Landstorfer, F.M.,: ‘Empirical prediction of radio wave propagation by neural network simulator’, Electron. Lett., 1992, №28, pp. 724-726.
113. Stocker, K.E., Landstorfer, F.M., Gschwendtner B.E., Neural network approach to prediction of terrestrial wave propagation for mobile radio, IEEE trans, Vol. 140, No. 4, Aug. 1993

114. Syswerda, Gilbert. Uniform Crossover in Genetic Algorithms, Proc. 3rd Int'l Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufman Publishing. 1989.
115. Tsoy Y.R. The Influence of population size and search time limit on genetic algorithm// Proceedings of the 7-th Korea – Russia International Symposium on Science and Technology KORUS-2003 - University of Ulsan, 2003. – P. 181-187.
116. VHF and UHF propagation curves for the frequency range from 30 MHz to 1000 MHz // ITU-R Rec. P.370-7. Geneva: ITU, 1995.
117. Wegener I., Witt C. On the Optimization of Monotone Polynomials by Simple Randomized Search Heuristics. Technical Report ISSN 1433-3325, October 2002, 25 p.
118. William M. Spears, Kenneth A., De Jong. An Analysis of Multi-Point Crossover. In Proceedings of the Foundations of Genetic Algorithms Workshop, Bloomington, IN. 1990.
119. Xuemin Huang Automatic Cell Planning for Mobile Network Design: Optimization Models and Algorithms / Xuemin Huang. - PhD thesis: Universitat Karlsruhe. - 2001. - 198 p.