

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-2008

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОСВЯЗИ.....	17
1.1. Основные требования функциональным возможностям и надежности работы сетей ЖТР.....	17
1.2. Краткий обзор основных элементов сети стандарта GSM-R.....	18
1.3. Основные этапы проектирования сетей подвижной связи	19
1.4. Анализ действующих рекомендаций ЧТП сетей ЖТР	21
1.4.1. Методика расчета дальности радиосвязи, рекомендуемая инструкцией ЦШ 4818	21
1.4.2. Порядок обеспечения ЭМС при проектировании сетей ЖТР по действующим рекомендациям	24
1.5. Анализ существующего программного обеспечения для ЧТП и оценка возможности его использования при проектировании сетей ЖТР .	24
Выводы по первому разделу	28
РАЗДЕЛ 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЧАСТОТНО – ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА GSM-R	29
2.1. Формализация задачи ЧТП сети ЖТР стандарта GSM-R	29
2.1.1. Анализ способов уменьшения материальных затрат на создание и эксплуатацию сети GSM-R на ЧТП	30
2.1.2. Анализ показателей качества, предъявляемых к сети	32
2.1.3. Влияние конфигурации подсистемы БС на структурную надежность сети GSM-R.....	33
2.1.4. Вероятность отказа абоненту в обслуживании с учетом занятости радиочастотных каналов и наличия приоритетов.....	37
2.1.5. Критерий качества передачи речи	42

	3
2.2. Формализация задачи обеспечения ЭМС сети GSM-R.....	44
2.3. Формализация и анализ задачи ЧТП сети GSM-R.....	46
2.3.1. Анализ размера пространства поиска решений, задачи ЧТП сети стандарта GSM-R.....	46
2.4. Разработка методики решения задачи ЧТП сети GSM-R.....	47
Выводы по второму разделу.....	53
РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ К МЕТОДУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОСИГНАЛА НА ЧАСТОТЕ 900 МГц, В УСЛОВИЯХ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ	55
3.1. Постановка задачи.....	55
3.2. Разработка метода оценки влияние погрешности прогнозирования потерь при распространении радиосигнала, на стоимость получаемых конфигураций подсистемы БС сети GSM-R.....	56
3.3. Анализ существующих методик прогнозирования потерь при распространении радиосигнала и возможности их модификации с целью использования для расчета дальности радиосвязи ЖТР	59
3.3.1. Методика расчета дальности радиосвязи, основанная на модели распространения радиоволн в свободном пространстве	59
3.3.2. Методика расчета зоны обслуживания Окамуры - Хата.....	59
3.3.3. Методика расчета зоны обслуживания на основе рекомендации МСЭ Р.370	60
3.3.4. Методика расчета зоны обслуживания на основе модели Уолфиш-Икегами	61
3.3.5. Сравнительная характеристика рассмотренных методов расчета зоны обслуживания	62
3.4. Экспериментальное исследование особенностей распространения сигнала, диапазона частот 900 МГц, на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов.....	64

3.4.1. Экспериментальное исследование быстрых замираний сигнала на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов.....	65
3.4.2. Исследование медленных замираний сигнала на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов	69
3.5. Метод учёта рельефа местности при расчете потерь распространения радиоволн.....	72
3.6. Разработка гибридной модели прогнозирования ослабления сигнала при распространении.....	78
3.6.1. Анализ возможности использования многослойного персептрона для прогнозирования величины медленного замирания сигнала	79
3.7. Влияние погрешности прогнозирования потерь при распространении радиосигнала, на точность получаемых решений поиска расположения БС85	
Выводы по третьему разделу.....	86
РАЗДЕЛ 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ГРУПП ЧАСТОТНЫХ ПРИСВОЕНИЙ СОТАМ СЕТИ ЖТР СТАНДАРТА GSM-R ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС.....	88
4.1. Классификация технических характеристик, влияющих на электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств	88
4.2. Экспериментально - теоретическое исследование влияния внутрисистемных помех на качество функционирования сети GSM-R.....	90
4.2.1. Постановка задачи исследования.....	90
4.2.2. Теоретическое исследование влияния помех по основному и соседнему каналам	90
4.2.3. Экспериментальное исследование влияния соотношения сигнал/помеха по основному каналу приема, на уровень битовых ошибок в радиоканале.....	95
4.2.4. Исследование влияния помех по соседнему каналу приема.....	98

4.2.5. Определение минимально-допустимого соотношения сигнал/помеха по основному и соседнему каналам приема для выполнения частотного планирования ЖТП стандарта GSM-R	98
4.3. Разработка автоматизированного метода оптимального присвоения частот сети ЖТП стандарта GSM-R	100
4.3.1. Краткий обзор существующих методов формирования групп частотных присвоений для радиосетей, использующих принцип повторного использования частот	102
4.3.2. Эвристический метод формирования групп частотных присвоений сотам сети GSM-R на основе “жадного” алгоритма.....	104
4.3.3. Разработка комбинированного метода формирования групп частотных присвоений сотам сети GSM-R.....	107
Выводы по четвертому разделу.....	112
РАЗДЕЛ 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ БС СЕТИ GSM-R ПО КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНОЙ СТОИМОСТИ	113
5.1. Анализ возможности применения существующих методов решения задачи об обобщенном покрытии, для определения оптимальных мест установки БС сети GSM-R.....	113
5.2. Разработка метода генетического алгоритма выбора оптимальных мест установки БС сети GSM-R.....	116
5.2.1. Выбор способа кодирования конфигурации ПБС в хромосому	119
5.2.2. Разработка процедуры вычисления целевой функции ГА.....	120
5.2.3. Выбор метода селекции ГА	120
5.2.4. Выбор вида оператора кроссинговера.....	123
5.2.5. Выбор вида оператора мутации	128
5.2.6. Разработка процедуры формирования начальной популяции ...	128
5.2.7. Разработка метода оператора восстановления	134
5.3. Определение параметров метода ГА определения оптимальных мест установки БС	135

5.3.1. Исследование влияния вероятности применения мутации на точность и получаемых решений и время их поиска	135
5.3.2. Разработка рекомендаций для выбору размера начальной популяции.....	137
5.4. Анализ результатов работы разработанного метода ГА выбора оптимальных мест установки БС сети GSM-R.....	139
Выводы по пятому разделу	143
ВЫВОДЫ	145
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ А	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	163

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 [16], 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 [49]:

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. Вериге, Ю.Я. Мемерсон, К.К. Алмазян, А.Ф. Фомин [14,24,25,35,64].

Основным документом, описывающим технические характеристики стандарта GSM-R, является “European Integrated Railway Radio Enhanced Network System Requirements Specification.” [88]. 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 [106,86,80], излагающих основные подходы к ЧТП сетей GSM общего назначения. Вопросам ЧТП посвящено также много работ как отечественных [3,27,46,2,7,70,72,49] так и зарубежных [75,76,96,108,119,110] авторов, однако, вопросы проектирования сетей цифровой ЖТР затронуты лишь в нескольких работах [72,49,108]. 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 [72,49,108], 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 [18], 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 [18]. Также переход к цифровым системам технологической связи намечен в документах: «Концепція Національної програми інформатизації» [29] ; «Концепція розвитку зв'язку України до 2010 року» [30]; «Концепція створення Державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами » [31].

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 ЖТР стандарта GSM-R, для обеспечения ЭМС.

5. Разработать метод поиска оптимальных, по критерию минимальных материальных затрат, мест установки БС сети ЖТР 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 [50,51,54] 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 прогнозированного 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 [58,53], 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 [53], 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, а также ЗАО «Украинская мобильная связь» в рамках программы по улучшению качества покрытия на основных направлениях железных дорог, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

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 [54] 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 [50,51,58,52,59,54,53,60], 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.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОСВЯЗИ

Построению сети подвижной связи предшествует выполнение проектных работ, которые в значительной мере определяют надежность, качество связи и стоимость будущей сети.

Организация аналоговых сетей ЖТР в диапазонах 2,13; 150 и 330 МГц выполняется в соответствии с утвержденными правилами и рекомендациями по порядку проектирования сетей СРС, ПРС и РОРС [67,37,36]. Для оценки возможности использования данных правил и рекомендаций при проектировании сетей GSM-R, необходимо провести анализ возможности решения с использованием этой методологии всего круга задач, возникающих в процессе ЧТП.

В настоящее время представлен широкий круг программных продуктов [42,103,32,68], позволяющих решать как отдельные проектные задачи, так и весь перечень задач ЧТП. Для оценки возможности использования существующих программ при проектировании цифровых сетей ЖТР в работе проводится анализ их функциональных возможностей.

1.1. Основные требования функциональным возможностям и надежности работы сетей ЖТР

Вопросы проектирования и построения ЖТР регламентируются большим количеством нормативно-методической документации [67,67,88,37,36]. Основным руководящим документом на железной дороге являются «Правила технической эксплуатации железных дорог Украины» [67], в которых в пунктах 6.41-6.47 изложены основные требования к функциональным возможностям систем технологической связи, определены основные группы абонентов. Однако требования к качеству и надежности

работы сетей технологической радиосвязи определены очень поверхностно, сказано [67, п 6.42], что «поездная радиосвязь должна обеспечивать надежную двухстороннюю связь»:

- с поездным диспетчером по всей длине диспетчерского участка;
- с дежурными по станциям, что ограничивают перегон;
- с машинистами встречных и вслед идущих локомотивов, специального подвижного состава, что находится на одном перегоне;
- с дежурными по переездам и депо;
- с руководителями ремонтных работ и сигналистами;
- со стрелками военизированной охраны в поездах и на объектах;
- с помощником машиниста при выходе его с кабины;
- с начальником пассажирского поезда.

Станционная радиосвязь согласно [67] «должна обеспечивать двухстороннюю радиосвязь в пределах: маневровой и горочной радиосвязи, радиосвязи станционных технологических центров, пунктов технического обслуживания вагонов и локомотивов, радиосвязи пунктов коммерческого осмотра вагонов, контейнерных площадей, бригад по обслуживанию и ремонту технических средств, подразделений военизированной охраны».

Более детально требования к качеству работы сетей ЖТР рассмотрены в [67,37,36]. Согласно [67], радиостанции существующей сети ЖТР системы «транспорт» относятся ко второму классу, что соответствует уровню слоговой разборчивости 80%. Коэффициент готовности для средств связи и СЦБ определяется из условий безопасности движения и должен быть не менее 0,999 - 0,9995.

1.2. Краткий обзор основных элементов сети стандарта GSM-R

Стандарт GSM-R создан на основе стандарта GSM в рамках программ EIRENE (European Integrated Railway radio Enhanced Network) и MORANE (Mobile Radio for Railways Networks in Europe).

Спецификация стандарта GSM-R [88] предусматривает работу сети в следующих полосах частот: 876 – 880 МГц (передача от МС), 921 – 925 МГц (передача от БС). Несущая частота определяется номером GSM-R канала:

$$F_l(n) = 890 + 0,2*(n-1024), \quad (1.1)$$

$$F_u(n) = F_l(n) + 45, \quad (1.2)$$

где n – номер частотного канала ($955 \leq n \leq 973$).

Всего 19 частотных каналов, из которых 1 канал (955) используется для организации прямой связи между мобильными терминалами [88]. Итого для присвоения частот БС остается 18 частотных каналов (956 - 973).

Упрощенная блочная схема сети стандарта GSM-R [88] представлена на рис. 1.1. Где [88] : MSC (Центр Мобильной Коммутации) — специализированная автоматическая телефонная станция, обеспечивающая возможность связи с коммутацией каналов и предоставления сервисов для мобильных терминалов внутри зоны своего обслуживания; HLR (Home Location Register) — база данных, содержащая информацию о каждом абоненте сети; VLR (Visitors Location Register) — временная база данных абонентов, которые находятся в зоне действия определённого MSC/VLR; EIR (Equipment Identity Register) — регистр идентификации оборудования, содержит перечень мобильных терминалов, доступ которым запрещён в сеть; CGR – (Call Group Register) - регистр для организации группового вызова.

Все элементы ЖТР стандарта GSM-R условно возможно разделить на четыре группы: подсистема коммутации (ПКЦ), подсистема каналов связи (ПКС), подсистема БС (ПБС) и подсистема мобильных (абонентских) станций (ПМС).

1.3. Основные этапы проектирования сетей подвижной связи

Проектирование сети подвижной связи - это сложный процесс выработки технико-экономических и конструкторско-технологических решений, приближающихся к оптимальным [3].

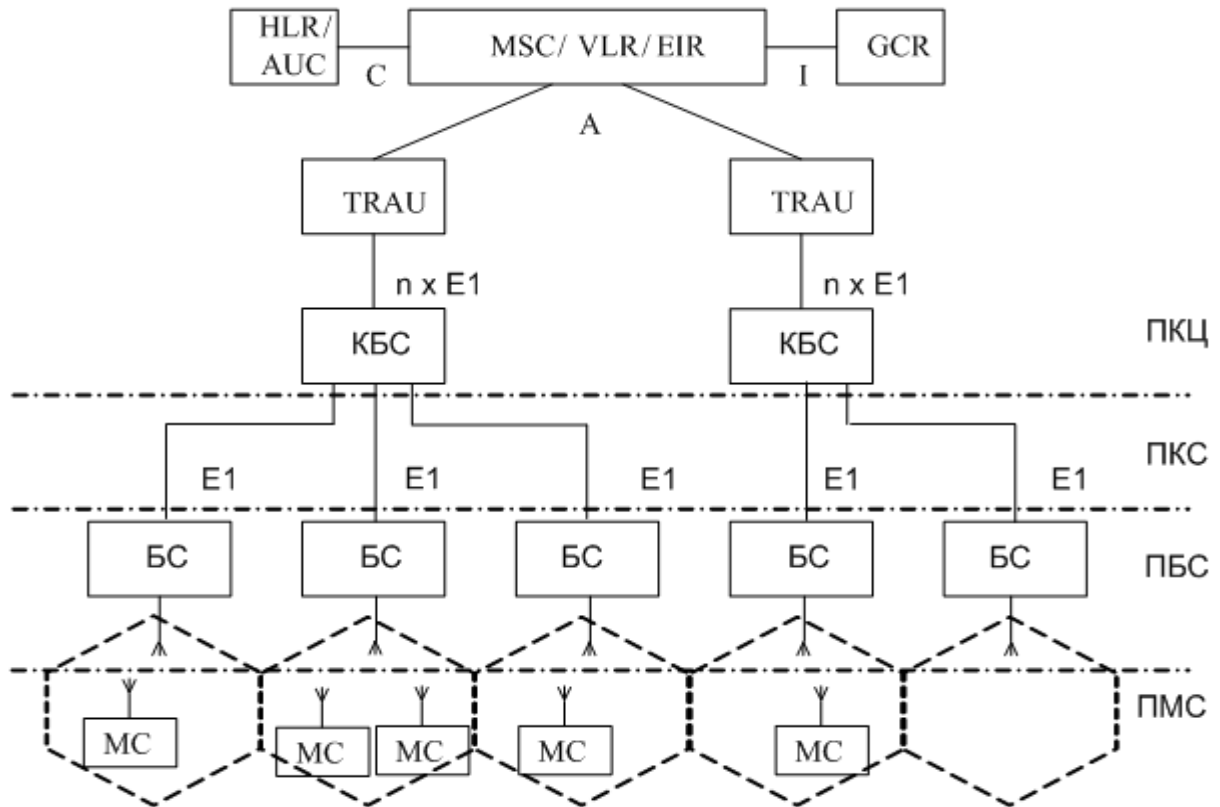


Рис. 1.1 Упрощенная блочная схема сети GSM-R.

Процесс проектирования сетей подвижной связи состоит из следующих основных этапов:

1. Подготовка исходных данных, включающих:

- материалы начального этапа определения функциональных требований к сети, технико-экономического анализа возможностей для ее построения;
- документы по лицензированию частот;
- топографические карты местности с нанесенными станциями и участками железных дорог;
- материалы предварительных согласований в госнадзорных органах, а также с владельцами земель, сооружений и средств, которые необходимо использовать;
- материалы разработки на этапе предпроектных решений технических предложений, включая обоснование и оценку необходимых инвестиций.

2. Частотно-территориальное планирование сети – совокупность методов для получения конфигурации сети, обладающей качеством не ниже заданного и отвечающей при этом заданному критерию оптимальности. Является наиболее сложной задачей при проектировании сетей ЖТР, оптимальность решения которой зависит от полноты исходных данных, моделей, используемых при решении, опыта проектировщика, аппаратных и программных средств, задействованных при проектировании. Именно этот этап определяет наиболее важные технико-экономические показатели сети.

3. Разработка конструкторско-технологических решений компоновки оборудования, вариационная конструкторская проработка вариантов его размещения, установки, монтажа, кабельной трассировки.

4. Подготовка рабочей документации – производится на основе выработанных решений в соответствии с нормативной документацией, составление сметы, разработка технико-экономической оценки системы.

1.4. Анализ действующих рекомендаций ЧТП сетей ЖТР

Порядок проектирования сетей ЖТР регламентируется соответствующими правилами и рекомендациями [67,37,36], которые предусматривают расчет сетей ПРС, СРС и РОРС в диапазонах 2,15; 150 и 330 МГц.

1.4.1. Методика расчета дальности радиосвязи, рекомендуемая инструкцией ЦШ 4818

Данная методика [67] является руководящим документом отрасли при расчете сетей ПРС. Расчет канала поездной радиосвязи по данной методике проводится в следующем порядке:

- задается минимально допустимый уровень полезного сигнала на входе приемника U_{2min} ;
- определяется значение напряженности поля E_2 при $U_2 = U_{2min}$;
- по базовой кривой [67] определяется дальность связи r .

Минимально допустимый уровень полезного сигнала U_{2min} задается в зависимости от используемого диапазона частот, электрификации железнодорожного участка и типа аппаратуры. Уровень сигнала на входе подвижной радиостанции определяется по формуле:

$$U_2 = E_2 + a_T + B_M + G_1 + G_2 + M - a_1 l_1 - a_2 l_2 - K_{\text{Э}} - K_{\text{КС}} - g_2 - K_M - K_B - K_u, \quad (1.3)$$

где a_T — коэффициент, учитывающий отличие условий распространения от условий, для которых снимались базовые кривые;

B_M - мощность передатчика, дБВт;

G_1 , и G_2 — коэффициенты, учитывающие направленные свойства антенн;

$$M = 20 \lg \left(\frac{h_1 \cdot h_2}{100} \right) - \text{высотный коэффициент};$$

$a_1 l_1$ и $a_2 l_2$ — коэффициенты, учитывающие затухание, вносимое фидерами l_1 , и l_2 ;

$K_{\text{Э}}$ - коэффициент экранирования металлической крыши, дБ;

$K_{\text{КС}}$ — коэффициент ослабления сигнала контактной сетью, дБ;

g_2 - коэффициент трансформации энергии ВЧ сигнала к напряжению в точке соединения приемной антенны с фидером, дБ;

K_M , K_B и K_u — вероятностные коэффициенты, учитывающие флуктуации сигналов, дБ;

K_M — учитывает медленные замирания напряженности поля, вызванные изменением рельефа местности, дБ;

$K_{\text{с}}$ - учитывает изменения уровня сигнала из-за рефракции в Атмосфере, дБ;

K_u — учитывает интерференцию волн, дБ;

Согласно методике, приведенной в [67] порядок проведения расчета следующий. По топографической карте выбирается несколько точек, находящихся на пути следования подвижного объекта, причем, эти точки должны лежать на трассах радиосвязи, наиболее сложных по профилю.

Обязательно берутся самые удаленные по азимуту точки, а также точки на кривых участках пути. Число выбираемых точек зависит от сложности трассы радиосвязи и длины перегона: от двух точек на равнинных перегонах до восьми на сложных горных перегонах. Выбор точек выполняется в обе стороны от места установки стационарной радиостанции. Для этих точек строятся профили трасс радиосвязи. Рекомендуется для одного перегона строить профили трасс в порядке увеличения расстояния от станций. По профилю трассы определяется ее тип. При определении типа трассы ее характеристики заносятся в таблицу, по результатам анализа которой определяется тип трассы, как наиболее сложный из найденных. Все трассы характеризуются пятью типами (от равнинной до сложной горной трассы) в зависимости от характера рельефа местности. Каждому типу соответствует значение коэффициента сложности трассы K_{cm} , определяющего поправку a_m . Далее по заданным условиям радиосвязи определяются поправочные коэффициенты и рассчитывается уровень сигнала вдоль перегона через каждые два километра, а также для всех точек, для которых построены профили трасс радиосвязи. Строится график зависимости уровня сигнала от расстояния до стационарной радиостанции вдоль перегона. Дальность устойчивой радиосвязи определяется по полученному графику как расстояние от стационарной радиостанции до точки пересечения кривой с линией минимально допустимого уровня сигнала U_{min} . Подобным образом производится расчет дальности радиосвязи в сетях СРС и РОРС.

Метод, приведенный в [67], обеспечивает расчет дальности связи только в диапазонах 160 и 330 МГц поскольку коэффициенты K_M , K_B , K_u учитывающие быстрые и медленные замирания получены в результате экспериментальных исследований для диапазонов 160 и 330 МГц.

Для использования данной методики в расчетах дальности связи в диапазоне частот 900 МГц, необходимы дополнительные экспериментальные исследования. Кроме того, данная методика не обеспечивает автоматизацию данного этапа проектирования.

1.4.2. Порядок обеспечения ЭМС при проектировании сетей ЖТР по действующим рекомендациям

При проектировании сетей ЖТР по рекомендациям [36,37,67] обеспечение внутрисистемной ЭМС сводится к выбору для стационарных радиостанций групп частот в соответствии с таблицей распределения частот для различных типов сетей, а также определению координационного расстояния между радиостанциями, использующими одинаковые частоты. Помеховая обстановка в районе развертывания сети, а также межсистемная ЭМС не оцениваются. Ни в одной методике не выполняются работы по оптимизации предлагаемого частотно-территориального плана сети.

1.5. Анализ существующего программного обеспечения для ЧТП и оценка возможности его использования при проектировании сетей ЖТР

В настоящее время представлен целый ряд программного обеспечения для ЧТП. Объем функциональных возможностей предлагаемого программного обеспечения (ПО) различен и меняется от задачи грубого прогнозирования уровня сигнала в конкретной точке до пакетов программ, решающих весь спектр проектных задач. Наиболее известные программные продукты: Mentum PlanetEV [103], TEMS CellPlanner [32], Forsk Atoll [90], RPS-2 [107], «Балтика-СПС»[68], «ПИАР» [42].

Проведем обзор наиболее заметных разработок в области проектирования систем подвижной связи. В первую очередь можно отметить ПО Mentum PlanetEV [103], функционирующую на базе геоинформационной системы (ГИС) MapInfo, а также ПО TEMS CellPlanner [32] и Forsk Atoll [90]. Достоинством данных программ является полнота перечня решаемых задач, требуемых для проведения всего комплекса работ по ЧТП сетей сотовой связи стандартов GSM/GPRS/EDGE,CDMA,UMTS, т.е. радиосетей общего

пользования. Данные программы имеют равноценные основные возможности:

- расчет зон покрытия для каждой БС,
- автоматизированное назначение частот передатчикам БС, для обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости,
- возможность калибровки моделей распространения радиоволн по результатам измерений,
- планирования списка соседей и определения параметров хэндоверов,
- анализа абонентской нагрузки и её распределения по различным технологиям,
- расчет и анализ качества обслуживания.

Исходными данными для расчетов являются параметры БС и МС, характеристики антенн и высоты их расположения. Возможен выбор оборудования из базы данных. Результаты расчетов отображаются в графическом виде.

Преимуществом ПО Mentum PlanetEV, является доступность множества различных цифровых карт в распространенном формате MapInfo, а также возможность создавать собственные подпрограммы на встроенном интерпретаторе MapBasic. Отличительной особенностью ПО TEMS CellPlanner, является возможность оценки радиопокрытия с использованием модели распространения радиоволн “9999”, разработанной компанией Ericsson.

Пакет программ «Проектирование и анализ радиосетей - ПИАР» [42], - специализированная ГИС, предназначенная для расчета и построения зон уверенной двухсторонней связи, расчета электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, ведения соответствующих баз данных, выдачи рекомендаций по частотным присвоениям. Данное ПО позволяет вести расчеты в частотном диапазоне 27 МГц - 18 ГГц. Основными функциональными возможностями программного продукта являются: ввод в базы данных географических координат РЭС; измерения на топографических

картах (определение расстояний, площадей, азимута, географических координат в градусах, минутах и секундах), анализ рельефа местности с построением сечения рельефа между двумя выбранными точками на карте с учетом кривизны поверхности Земли; расчет карт напряженности поля, а также формирование карт населенных пунктов; построение зон уверенной радиосвязи для выбранных РЭС, в том числе с учетом мешающих передатчиков, работающих на той же частоте; анализ напряженности электромагнитных полей, создаваемых РЭС за счет побочных и внеполосных излучений.

Хотя одной из функций САПР «ПИАР» и является формирование рекомендаций по выбору частот, тем не менее, реализации функции автоматизированного ЧТП в рассматриваемой ГИС нет. Нет и возможности учета специфики распространения радиоволн в условиях инфраструктуры железной дороги.

ПО ЧТП «Балтика-СПС» позволяет проводить расчеты для частотного диапазона 0,15...2,0 ГГц. В основу используемого математического аппарата положены рекомендации МСЭ-Р (МККР). Исходные данные для расчета задаются в таблице входных данных и включают: характеристики всех БС сети; допустимый уровень сигнала на границе зоны обслуживания; величину защитного отношения сигнал/помеха и другие. Результаты расчета представляются графически и в виде таблиц, содержащих негеографическую информацию. Графически результаты работы программы представляются на одной из четырех карт:

- территориальный план сети связи - карта региона с обозначением БС;
- зоны обслуживания и зоны помех - дополнительная карта, используется для анализа перекрытия зон БС;
- уровни поля в зоне охвата сети — карта охвата сети без выделения зон отдельных БС;

- зоны обслуживания БС с учетом уровня сигнала - карта радиопокрытия, на которой зона обслуживания каждой БС выделена своим цветом, а уровень поля характеризуется его насыщенностью.

К недостаткам можно отнести невозможность построения графика изменения напряженности электромагнитного поля, вдоль трассы железной дороги. Кроме того, в программе не предусмотрен механизм учета влияния на уровень сигнала инфраструктуры железной дороги.

ПО ЧТП RPS-2 [107] предназначено для проектирования беспроводных сетей различной архитектуры (радиорелейных, транкинговых, сотовых), применяющих различные стандарты передачи данных. Использование системы позволяет проанализировать показатели электромагнитной совместимости проектируемой сети с другими сетями, работающими в той же местности, и оптимизировать характеристики с учетом конкретных географических условий местности при заданном распределении трафика и источников помех. Программа позволяет размещать радиостанции в заданном месте рассматриваемой территории, стандартов NMT-450, AMPS, D-AMPS, GSM, IS-95, SmarTrunk, TETRA, MPT 1327, EDACS. Для оценки ЗО есть возможность выбрать одну из нескольких моделей распространения радиоволн: Окамура-Хата, Уолфиш-Икегами, МККР 370-5.

Анализ всех рассмотренных программных продуктов, позволяет сделать следующие выводы: ни в одном описании не упоминается стандарт GSM-R, рассмотренные программы не учитывают влияние инфраструктуры железной дороги и не позволяют строить графики напряженности поля вдоль железнодорожных участков. Кроме того, применяемые в этих программах методы присвоения частот приемопередатчикам БС, допускают возможность появления зон с локально заниженным значением сигнал/помеха, что недопустимо в сетях ЖТР.

Таким образом, не один из рассмотренных программных продуктов не позволяет решить задачу автоматизированного ЧТП сетей стандарта GSM-R,

с учетом жестких требований к надежности, качеству, а также специфики построения сетей ЖТР.

Выводы по первому разделу

1. Анализ основных этапов полного цикла проектирования сетей подвижной радиосвязи, показал, что наиболее важные технико-экономические показатели определяются на этапе частотно-территориального планирования.

2. Выполнен анализ действующих правил организации и расчета сетей ЖТР в диапазонах 2; 150 и 330 МГц, который показал невозможность их использования для планирования сетей стандарта GSM-R, по причине отсутствия: методики прогнозирования ослабления радиосигнала частотой 900 МГц на трассе распространения; рекомендаций относительно поиска оптимальных мест установки БС и определение их конфигурации; методики формирования групп частотных присвоений передатчикам БС для обеспечения ЭМС.

3. Анализ спецификации стандарта GSM-R показал, что она несет лишь общую информацию, рекомендации по ЧТП имеют поверхностный характер, недостаточный для выполнения проектирования сетей этого стандарта.

4. Рассмотренные доступные программные продукты для ЧТП, не позволяют учитывать влияние инфраструктуры железной дороги и особенностей планирования сетей ЖТР стандарта GSM-R.

5. Сделан вывод об актуальности разработки автоматизированного метода ЧТП сетей стандарта GSM-R, который позволит учесть специфику построения, жесткие требования к надежности и качеству работы систем ЖТР а также одновременно уменьшить материальные затраты на строительство и эксплуатацию.

РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЧАСТОТНО – ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОСВЯЗИ СТАНДАРТА GSM-R

Задачей настоящей главы диссертации является формализация и разработка подходов к решению задачи ЧТП сети GSM-R. Это позволит определить круг наиболее актуальных вопросов, рассмотрению которых будут посвящены последующие главы диссертации.

2.1. Формализация задачи ЧТП сети ЖТР стандарта GSM-R

Исходными данными для планирования сети [27,54] является технические требования и значения совокупности (вектора) требуемых показателей качества K_{min} . Задача ЧТП сети ЖТР заключается в нахождении такой конфигурации сети радиосвязи X' , которая обладает значением вектора показателей качества $K(X')$, удовлетворяющего условию:

$$K(X') \geq K_{min}, \quad (2.1)$$

и при этом имеет минимальные материальные затраты $Mз$ на её создание:

$$Mз(X') \rightarrow \min. \quad (2.2)$$

Если выполняется условие (2.1), то каждый из показателей качества $k_i(X')$, $i = 1 \dots m$, конфигурации сети X' , не хуже, чем требуемое значение $k_{i min}$. Задачу ЧТП можно условно разбить на два этапа - на первом этапе решить задачу нахождения множества возможных конфигураций сети X , при условии выполнения неравенства (2.1), далее на множестве X найти конфигурацию X' имеющую минимальные материальные затраты $Mз(X')$. Поставленная задача является задачей оптимизации с ограничениями, где целевая функция (2.2), а вектор ограничений (2.1). Для решения поставленной задачи, необходимо провести анализ показателей качества,

входящих в вектор K_{min} , а также возможных путей уменьшения материальных затрат M_3 .

2.1.1. Анализ способов уменьшения материальных затрат на создание и эксплуатацию сети GSM-R на ЧТП

В качестве экономического показателя эффективности [23,54] используют затраты на создание и эксплуатацию, в который закладывается коэффициент окупаемости системы. Затраты на создание и эксплуатацию сети определяются как сумма затрат на отдельные элементы сети:

$$M_3 = \sum_{i=1}^N w_i, \quad (2.3)$$

где N - количество элементов, а w_i - затраты на отдельные элементы, которые, определяются выражением:

$$w_i = c_i \cdot e_i + c_{эксн.i}, \quad (2.4)$$

где c_i - затраты на создание (приобретение) i -го элемента сети;

e_i - коэффициент окупаемости i -го элемента (обратно пропорциональный величине срока его окупаемости);

$c_{эксн.i}$ - эксплуатационные затраты на i -тый элемент сети.

Для определения характера зависимости стоимости, каждого элемента сети GSM-R, от конфигурации, необходимо рассмотреть её основные элементы. Упрощенная блочная схема сети стандарта GSM-R, рассмотренная в разделе 1, представлена на рис. 1.1. Все элементы сети GSM-R условно возможно разделить на четыре группы: подсистема коммутации (ПКЦ), подсистема каналов связи (ПКС), подсистема БС (ПБС) и подсистема МС (ПМС). В таком случае выражение (2.3) примет вид:

$$M_3 = \sum_{i=1}^n w_i^{ПКЦ} + \sum_{j=1}^m w_j^{ПКС} + \sum_{k=1}^s w_k^{ПБС} + \sum_{r=1}^q w_r^{ПМС}, \quad (2.5)$$

где $w_i^{ПКЦ}$ - приведенные затраты на i -тую подсистему коммутации;

n - количество центров коммутации;

$w_j^{ПКС}$ - приведенные затраты на j -тый канал связи, а m - их количество;

$w_k^{ПБС}$ - приведенные затраты на k -тую БС, а s - количество БС;

$w_r^{ПМС}$ - приведенные затраты на r -тую МС, а q - количество МС.

Анализ зависимости стоимости каждого элемента системы от конфигурации сети GSM-R дает следующие результаты:

1.) Количество мобильных станций равно количеству абонентов и практически не зависит от конфигурации сети:

$$\sum_{r=1}^q w_r^{ПМС} = F(N_{аб}) \approx \text{const.} \quad (2.6)$$

2.) Стоимость ПКЦ зависит от абонентской нагрузки, которая в сети ЖТР постоянна:

$$\sum_{i=1}^n w_i^{ПКЦ} = F(N_{аб}) \approx \text{const.} \quad (2.7)$$

3.) В общем случае суммарная стоимость каналов связи зависит от конфигурации сети:

$$\sum_{j=1}^m w_j^{ПКС} = F(X). \quad (2.8)$$

Однако в случае сети ЖТР, можно использовать имеющуюся в наличии инфраструктуру цифровых каналов связи, используемых для нужд всех видов связи на железной дороге. Будем полагать, что в качестве транспортной сети (каналы связи БС-КБС, КБС-ПКЦ) для сети стандарта GSM-R будет использована готовая инфраструктура цифровых каналов связи, поэтому:

$$\sum_{j=1}^m w_j^{ПКС} \approx \text{const.} \quad (2.9)$$

4.) Стоимость ПБС зависит как от абонентской нагрузки, так и от способа размещения БС их конфигурации:

$$\sum_{k=1}^s w_k^{ПБС} = F(X, Nab). \quad (2.10)$$

Очевидно, что критерий минимального числа БС стремится минимизировать стоимость системы и организационно-технические мероприятия, проводимые на этапах её внедрения и эксплуатации. **Поэтому основным способом уменьшения материальных затрат, при проектировании сети GSM-R является определение оптимальных мест установки БС.** При этом, для каждой БС, должна быть найдена конфигурация cnf_i , в которую входят следующие характеристики:

- N_{clj} - количество радиосот j -той БС;
- Ant_{ij} – тип антенны i - той радиосоты j -той БС;
- h_{ij} - высота подвеса антенны i - той радиосоты j -той БС;
- $\varphi_{Гij}$ - азимут направления антенны i - той радиосоты j -той БС;
- $\varphi_{Вij}$ - угол вертикального наклона i - той радиосоты j -той БС;
- $N_{прij}$ – количество приемопередатчиков i - той радиосоты j -той БС;
- f_{ijk} – частотное присвоение для k –того приемопередатчика i - той радиосоты j -той БС;

2.1.2. Анализ показателей качества, предъявляемых к сети

Для осуществления ЧТП сети ЖТР стандарта GSM-R необходимо выработать критерии качества (вектор показателей качества) K , с помощью которых производить оценку степени пригодности и эффективности того или иного варианта конфигурации сети. Для этого необходимо выполнить анализ показателей качества, предъявляемых к сети.

Для обеспечения выполнения своих функций, сеть ЖТР должна обладать следующим основными свойствами:

- 1) “обеспечивать надежную двухстороннюю связь” [67], т.е. обеспечивать коэффициент готовности радиосети K_g не ниже требуемого;
- 2) обеспечивать вероятность отказа в обслуживании, вследствие занятости каналов, для абонента данной категории не выше максимально допустимой, при времени ожидания соединения не выше заданного;

3) обладать значением качества передачи речи, на территории обслуживания, не ниже требуемого.

2.1.3. Влияние конфигурации подсистемы БС на структурную надежность сети GSM-R

Надежность является одним из основных показателей качества любой сложной системы, которой является и сеть ЖТР стандарта GSM-R. Согласно [69,4] под надежностью понимают свойство системы сохранять значение всех своих параметров, характеризующих способность выполнять свою основную функцию. Для сети ЖТР, такой функцией является обеспечение заданного качества обслуживания на заданной площади не ниже требуемого. В проблеме анализа надежности ЖТР можно выделить аспекты элементной и структурной надежности. Под элементной надежностью подразумевается свойство, присущее элементам сети, сохранять работоспособность с качеством не хуже заданного на некотором интервале времени. Под структурной надежностью понимают свойство сети ЖТР обеспечивать заданное качество обслуживания на заданной площади не ниже требуемого в случае отказа отдельных элементов сети.

На рис. 2.2 показаны возможные способы повышения структурной надежности сети GSM-R [108]. Случай а (рис. 2.2 а) соответствует участку сети без резервирования радиоканала. В случае отказа одной из БС, возникает зона отсутствия радиосвязи, что недопустимо для сетей ЖТР, как одного из основных средств обеспечивающих безопасность движения поездов. Для повышения структурной надежности ПБС может применяться установка дополнительных БС, таким образом, чтобы зоны обслуживания полностью перекрывались (рис. 2.2 б). Другим вариантом повышения структурной надежности ПБС является установка дополнительных БС, рядом с существующими (рис. 2.2 в).

В тоже время, ввиду ограниченного числа выделенных для GSM-R частотных каналов, увеличение числа сот с перекрывающимися зонами

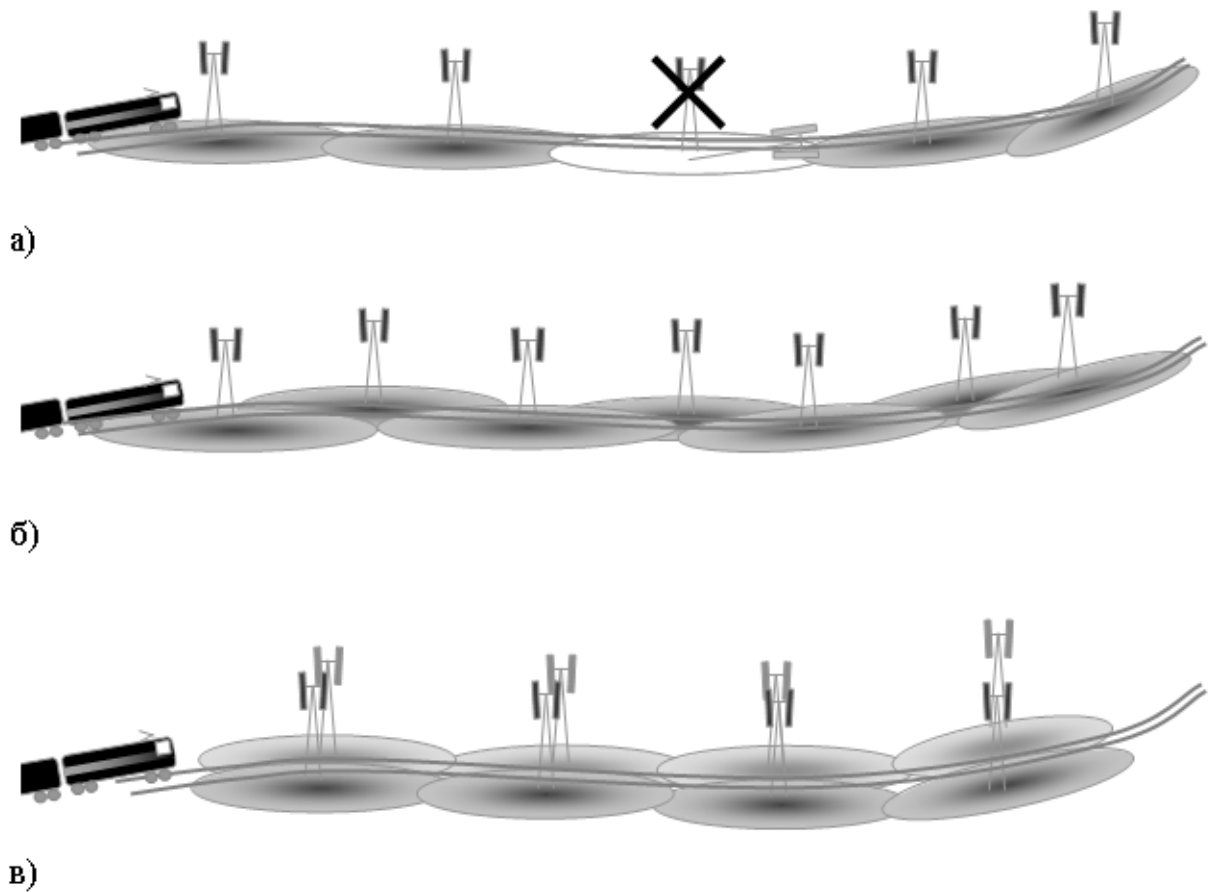


Рис. 2.2 Способы повышения структурной надежности сети GSM-R.

радиопокрытия, ведет к увеличению уровня внутрисистемных помех, что снижает качество работы сети GSM-R.

Одной из важных особенностей сетей ЖТР, является то, что все возможные места установки БС, как правило, находятся на станциях и других железнодорожных объектах. Будем считать, что все они заранее определены и имеют координаты x_{S_i} , y_{S_j} (широта и долгота) и данные о возможной высоте мачт h_n для установки антенн (возможно использование существующих осветительных вышек). Все возможные места установки БС можно записать в виде множества $S_{BC} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, размера n .

В этом случае стоимость ПБС можно найти следующим образом:

$$M_{ПБС} = \sum_{i=1}^m M_{BC}(cnf_i) \cdot s_i, \quad (2.11)$$

где $M_{BC}(cnf_i)$ – стоимость БС, в конфигурации cnf_i .

Другой важной особенностью сетей ЖТР стандарта GSM-R, в отличие от сетей GSM общего назначения, является необходимость обеспечения заданного качества связи только на территории железнодорожных станций и вдоль перегонов. Разбив всю площадь (рис. 2.3), на которой необходимо обеспечить заданное качество связи, на элементарные участки необходимого покрытия (ЭУНП), радиуса R_{el} , в пределах которых ослабление сигнала от БС не может значительно измениться, получим множество $D_{\Pi} = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$. Каждый элемент множества D_{Π} имеет координаты x_{di}, y_{dj} .

Надежность системы радиосвязи характеризуется коэффициентом готовности сети $K_{Г}$, на который, применительно к ПБС, главным образом влияют: вероятность p_{lev} обеспечения необходимого уровня сигнала P_{min} , вероятность безотказной работы оборудования БС p_{bs} , кратность резервирования k_{di} и время восстановления системы. Вероятность p_{ms} организации радиоканала до абонента, который находится в зоне обслуживания ЭУНП:

$$p_{ms} = \frac{\sum_{i=1}^m \left(1 - (1 - p_{lev} \cdot p_{bs})^{k_{di}}\right)}{m}, \quad (2.12)$$

Поскольку к надежности сетей ЖТР предъявляются особые требования ($K_{Г} \geq 0,9995$), возникает необходимость применения резервирования оборудования и радиоканала. В качестве показателя степени резервирования радиоканала целесообразно использование вектора:

$$K_d = \{k_{d1}, k_{d2}, \dots, k_{dm}\}, \quad (2.13)$$

где k_{dj} - количество БС с возможностью организации радиоканала заданного качества к ЭУНП d_j .

$$Kd = \left\{ \sum_{i=1}^n Cv(i,1), \sum_{i=1}^n Cv(i,2), \dots, \sum_{i=1}^n Cv(i,m) \right\}, \quad (2.14)$$

где Cv - матрица покрытия, элемент $Cv(i,j)$ которой равен единице, если возможно организовать двухсторонний радиоканал, с заданным качеством, от i - той БС к j -тому ЭУНП, и 0 в другом случае:

$$Cv(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } Ps_{(i,j)} \geq P_{\min d} \text{ и } Pd_{(i,j)} \geq P_{\min s}; \\ 0, & \text{если } Ps_{(i,j)} < P_{\min d} \text{ и / или } Pd_{(i,j)} < P_{\min s}; \end{cases} \quad (2.15)$$

где $P_{\min s}$ – минимально допустимый уровень сигнала на входе БС, дБм;

$P_{\min d}$ – минимально допустимый уровень сигнала на входе МС, дБм;

Ps - матрица значений уровня сигнала в ЭУНП d_i от БС s_i ;

Pd - матрица значений уровня сигнала на входе БС s_i от МС, которая находится в ЭУНП d_i ;

$$Ps(i, j) = P_{BCi} + Ka_{BC}(i, j) + Ka_{MC}(i, j) - L_{BCi} - L_{MCi} - Lp(i, j) \quad (2.16)$$

$$Pd(i, j) = P_{MCj} + Ka_{BC}(i, j) + Ka_{MC}(i, j) - L_{BCi} - L_{MCi} - Lp(i, j) \quad (2.17)$$

где $Lp(i,j)$ - матрица потерь (рис. 2.3), каждый элемент которой соответствует прогнозируемому значению потерь при распространении сигнала между i -той БС s_j и j -той ЭУНП d_j , дБ;

P_{BCi} – выходная мощность БС s_i , дБм;

P_{MCi} - выходная мощность МС, которая находится в ЭУНП d_i , дБм;

L_{BCi} - величина затухания в фидере БС, дБ;

L_{MCi} - величина затухания в фидере МС, дБ;

$Ka_{BC}(i,j)$ - коэффициент усиления антенны БС s_i , в направлении к j -той ЭУНП d_j , дБи;

$Ka_{MC}(i,j)$ - коэффициент усиления антенны МС, которая находится в ЭУНП d_j в направлении к БС s_i , дБи.

Критерием обеспечения заданной степени резервирования радиоканала является выполнения следующего неравенства:

$$Kd(i) \geq a_{\min}; \quad i = 1, \dots, k. \quad (2.18)$$

где a_{\min} - параметр, который характеризует необходимую кратность резервирования радиоканала.

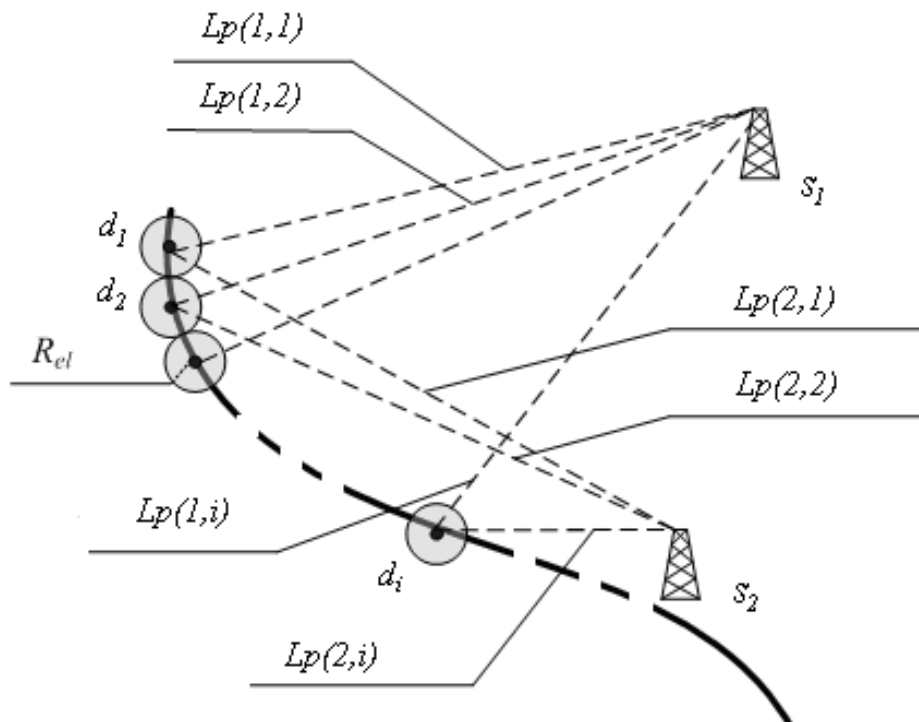


Рис. 2.3 К определению матрицы потерь L_p .

2.1.4. Вероятность отказа абоненту в обслуживании с учетом занятости радиочастотных каналов и наличия приоритетов

Зона обслуживания базовой станции моделируется как отдельная система массового обслуживания с очередью. Каналы базовой станции являются обслуживающими устройствами. Вызовы пользователей моделируются входящим процессом запросов на обслуживание. Время занятия канала радиосвязи представляет собой время обслуживания запроса. Предполагается, что все пользователи действуют независимо друг от друга и каждый создает нагрузку с определённой интенсивностью. Все абоненты системе GSM-R разделены на несколько категорий. Количество различных категорий абонентов определяется различными приоритетами в обслуживании поступающих запросов на соединение (вызовов). Каждый тип пользователей характеризуется соответствующей удельной нагрузкой и допустимыми потерями при установлении соединений ($P_{\text{доп1}}, P_{\text{доп2}}, \dots$).

В анализе сетей подвижной связи с сотовыми структурами можно использовать ряд моделей для получения оценок необходимого числа каналов сотовой системы.

В работе [45] отмечается, что для оценки минимума числа каналов соты, возможно использование модели распределения абонентской нагрузки с двумерным причинно-вырожденным распределением, при котором все абоненты стягиваются в одну точку территории обслуживания.

Абоненты станций и узлов могут быть классифицированы по трем категориям [25]:

1. Лица, непосредственно участвующие в выполнении маневровой и горочной работы и нуждающиеся в оперативной передаче команд, относятся к первой категории. Это руководители - дежурные по горке, по паркам, оператор горки; составитель и исполнители - машинисты маневровых и горочных локомотивов, расцепщики; допустимое время ожидания 5-10 с;

2. Технические работники станции, обеспечивающие обработку составов, но не участвующие непосредственно в маневровой работе, — списчики вагонов, работники пунктов технического и коммерческого осмотра вагонов; приемосдатчики грузовых дворов относятся также к второй категории; допустимое время ожидания 30—40 с;

3. Лица, обеспечивающие технологические процессы в крупных железнодорожных узлах, — узловой, грузовой диспетчеры, машинисты маневровых локомотивов на грузовых и технических станциях, входящих в состав узла, и допускающие ожидание, относятся к третьей категории; допустимое время ожидания 20-30 с.

В работе [25] построены математические модели радиосетей ЖТР. На основе собранных статистических данных о загрузке различных радиоканалов были определены следующие характеристики потоков:

T_{Π} — случайная величина длительности радиопереговоров (время обслуживания заявки);

T_{II} — случайная величина, которая означает для радиосетей I и II типов время нахождения требований в источнике, т. е. паузы, а для радиосети III типа — интервал времени между моментами поступлений требований.

Представляя каждую радиосеть как систему массового обслуживания (СМО) и основываясь на собранном статистическом материале, в [25] построены математические модели радиосетей и определены основные характеристики их функционирования. Математическая модель сети маневровой и горочной радиосвязи представляет собой замкнутую двухприоритетную СМО с ожиданием, абсолютным приоритетом у диспетчера и случайным порядком обслуживания неприоритетных заявок (требований от составителей и машинистов локомотивов). Характеристики эффективности для радиосети I типа: среднее время нахождения в радиосети (в системе) неприоритетных требований W_2 и среднее время ожидания их обслуживания $t_{ож}$ согласно [25,19]:

$$W_2 = N_2 \left[\frac{1}{R} + E(C_2) \right] - \frac{1}{\lambda_2}, \quad (2.19)$$

$$t_{ож} = W_2 - \frac{1}{\mu_2}, \quad (2.20)$$

где N_2 - число неприоритетных требований в радиосети;

λ_2 - интенсивность поступления неприоритетного требования;

μ_2 - интенсивность обслуживания неприоритетного требования;

$$R = \frac{\mu_1}{\mu_1 + \lambda_1} \left\{ N_2 \lambda_2 \sum_{e=0}^{N_2} \frac{1}{\Phi_2(e)} + \lambda_1 \sum_{e=1}^{N_2} \binom{N_2}{e} \left[\frac{1 - F_1(e\lambda_2)}{\Phi_2(e-1)} \right] \right\}, \quad (2.21)$$

$$\Phi_2(e) = \left\{ \prod_{m=1}^e \frac{F_2(\lambda_1 + m\lambda_2)}{1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + m\lambda_2} F_1(m\lambda_2) \cdot |1 - F_2(\lambda_1 + m\lambda_2)|} \right\} \text{ при } e \neq 0. \quad (2.22)$$

Средняя длительность времени между моментами поступления неприоритетного требования на обслуживание и ближайшим моментом, когда это требование покидает систему (средняя длительность цикла обслуживания неприоритетного требования):

$$E(C_2) = \frac{[1 - F_2(\lambda_1)]}{F_2(\lambda_1)} \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\lambda_1} \right), \quad (2.23)$$

где $F_2(\lambda)$ - преобразование Лапласа в точке p плотности распределения длительности обслуживания требований j -го вида;

λ_1 - интенсивность поступления приоритетного требования от диспетчера;

μ_1 - интенсивность обслуживания приоритетного требования.

Длительности обслуживания можно аппроксимировать законом Эрланга.

Математическая модель радиосети, для технических работников станции, [25] представляет собой замкнутую одноканальную СМО с ожиданием, ограниченным источником заявок и случайным порядком их обслуживания. Для радиосети II типа, где T_{II} распределена по закону Эрланга k -го порядка. На основе математического аппарата, разработанного Джейсуолом [19], в работе [25] получено выражение для определения вероятности того, что система свободна:

$$P_0 = \left[1 + N\rho + N\rho \sum_{e=1}^{N-1} \binom{N-1}{e} \prod_{m=1}^e \frac{(\lambda m + k\mu)^k}{(k\mu)^k} \right]^{-1}, \quad (2.24)$$

и вероятность того, что в радиосети находится одно требование,

$$P_1 = \frac{N}{N-1} P_0 \frac{[\lambda(N-1)(k\mu)]^k - (k\mu)^k}{(k\mu)^k}, \quad (2.25)$$

где N — число абонентов в радиосети;

λ - интенсивность поступления требования;

μ - интенсивность обслуживания требования;

$\rho = \lambda / \mu$ - приведенная нагрузка.

В качестве характеристики функционирования радиосети принято среднее время ожидания начала обслуживания, которое определяется формулой [25]:

$$\bar{t}_{ож} = \frac{N}{\mu \left\{ 1 - \left[1 + N\rho + N\rho \sum_{e=1}^{N-1} \binom{N-1}{e} \prod_{m=1}^e \frac{(\lambda m + k\mu)^k - (k\mu)^k}{(k\mu)^k} \right]^{-1} \right\}} - \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\mu}. \quad (2.26)$$

Каждое поступившее в радиосеть сообщение требует для своей передачи определенной продолжительности разговора. Кроме того, оно задерживается в радиосети на непроизводительное время из-за недостаточной эффективности ее работы. В радиосетях I и II типов в качестве непроизводительного времени следует принимать время ожидания освобождения занятого радиоканала.

Особенностью организации радиосети III типа с равнодоступными каналами в крупных железнодорожных узлах является необходимость обслуживания большого числа абонентов. Среди них следует выделить группу диспетчеров, которые имеют усеченный приоритет по отношению к машинистам локомотивов. Для СМО двумя классами требований усеченный приоритет означает, что если занято менее K каналов ($0 < K < n$), то любое поступающее требование берется на обслуживание, в противном случае на обслуживание берутся только приоритетные требования, а неприоритетные покидают систему [19].

В работе [25] установлено, что входные потоки требований приоритетных и неприоритетных являются пуассоновскими с интенсивностями соответственно Λ_1 , Λ_2 , а длительность обслуживания требований обоих видов имеет экспоненциальное распределение со средним значением интенсивности обслуживания μ .

Математическая модель радиосети III типа, согласно [25], представляет собой многоканальную двухприоритетную СМО с неограниченными источниками заявок с отказами или с ожиданием для диспетчеров и случайным порядком обслуживания. Выражения для

определения предельных вероятностей состояний системы и основные характеристики ее функционирования, т.е. вероятности потерь вызовов от диспетчеров:

$$P_{\text{отк}}^{(1)} = \rho^k \frac{\rho_1^{n-k}}{n!} P_0, \quad (2.27)$$

и от машинистов:

$$P_{\text{отк}}^{(2)} = P_0 \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^k \sum_{i=k}^n \frac{\rho_1^i}{i!}, \quad (2.28)$$

где

$$P_0 = \left[\sum_{i=0}^k \frac{\rho^i}{i!} + \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^k \sum_{i=k+1}^n \frac{\rho^i}{i!} \right]^{-1}, \quad (2.29)$$

$$\rho = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu}, \quad \rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu}. \quad (2.30)$$

В случае, когда $n = k$, т. е. все требования имеют одинаковый приоритет:

$$P_{\text{отк}}^{(1)} = P_{\text{отк}}^{(2)} = \frac{\rho^n}{n! \sum_{i=0}^n \frac{\rho^i}{i!}}. \quad (2.31)$$

Рассмотренные математические модели позволяют определять необходимое число частотных каналов для каждой радиосоты, при котором обеспечивается заданный процент отказов для всех требований. Результат расчета необходимого количества частот каждой соты n - сотовой сети, можно записать с помощью n - элементного вектора $U = \{u_1, \dots, u_i, \dots, u_n\}$. Элемент u_i вектора U обозначает число частотных каналов для i - той радиосоты.

2.1.5. Критерий качества передачи речи

На практике существует три показателя качества передачи речи [17,9,2]:

- артикуляция;
- громкость;

- натуральность.

Артикуляция речи - это разборчивость, понятность речи. Определяется относительным количеством (в процентах) правильно принятых элементов (слогов, слов, фраз) артикуляционных таблиц. Артикуляция - основной критерий качества воспроизведения речевого сигнала, который определяет вероятность правильного опознания элементов речевого сигнала.

Натуральность речи (узнаваемость голоса диктора) обусловлена соответствием принятой речи специфике произношения ее тем или иным человеком в зависимости от физиологической структуры его голосового тракта. Натуральность — величина, характеризующая степень сохранения субъективно воспринимаемых индивидуальных признаков голоса диктора в испытуемом тракте.

Поскольку основной функцией ЖТР является неискаженное донесение информации, в данной работе за основной критерий оценки качества речевого канала связи принята артикуляция, то есть, оценка разборчивости речи. Существует пять видов артикуляции [17,9,2]:

- артикуляция фраз (смысловая);
- словесная артикуляция;
- слоговая артикуляция;
- звуковая артикуляция;
- артикуляция формант.

Все пять видов артикуляции подсчитываются в процентном соотношении правильно принятых фраз, слов, слогов, звуков и формант соответственно. В работе [20] приведены результаты экспериментально-теоретического исследования зависимости слоговой разборчивости русской речи S_r от процента битовых ошибок на входе речевого кодека стандарта GSM при использовании полноскоростного кодирования (рис. 2.4).

В свою очередь, уровень битовых ошибок на входе речевого кодека зависит от соотношения уровня полезного сигнала к уровню помех. Поскольку в сети GSM-R применяется принцип повторного использования

частот, то основным источником внутрисистемных помех являются сигналы от БС, использующих одинаковые частоты или вызывающие мешающее воздействие по основному и побочным каналам приема. Исходя из этого, следует, что для обеспечения требуемой слоговой разборчивости речи, необходимо, при проектировании сети, обеспечить уровень внутрисистемных помех не выше некоторых значений. Это требует проведения соответствующего теоретико-экспериментального исследования влияния разных типов помех на уровень битовых ошибок в радиоканале GSM-R, а также разработки эффективного метода назначения частотных присвоений.

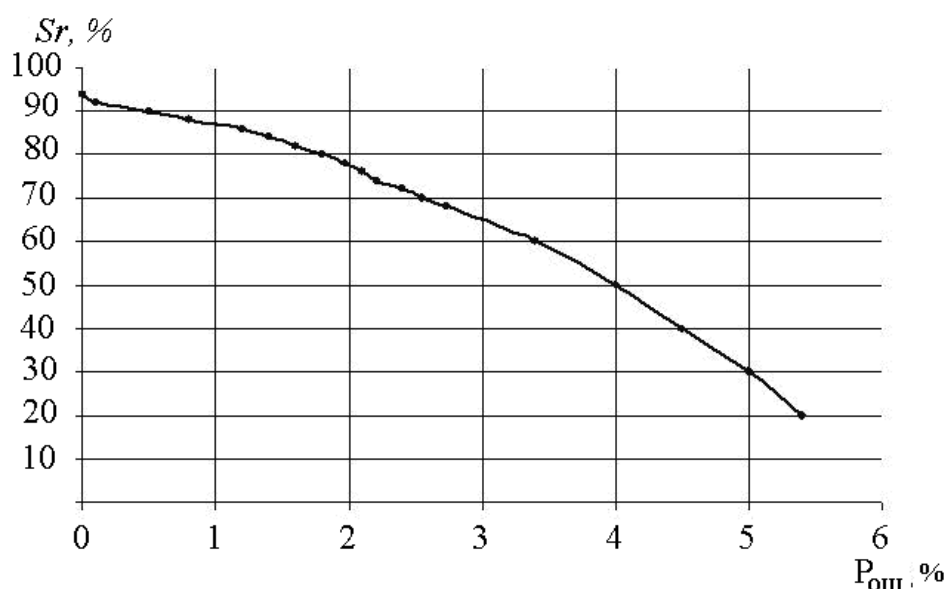


Рис. 2.4 Зависимость слоговой разборчивости русской речи Sr от процента битовых ошибок $P_{ош}$ в канале связи стандарта GSM при использовании полноскоростного кодирования.

2.2. Формализация задачи обеспечения ЭМС сети GSM-R

Решение задачи назначения частот должно производиться в рамках ограничений электромагнитной совместимости (ЭМС).

При этом рассматриваются такие ограничения [1,7,53,70,106], как:

- ограничения из-за помех по основному каналу приема;

- ограничения из-за помех по соседнему каналу приема;
- ограничения из-за помех, обусловленных совместным расположением (несущие используемые в одной соте, должны иметь необходимый разнос по частоте и быть интермодуляционно - совместимыми);

Общий вид задачи распределения каналов в произвольной неоднородной n - сотовой радиосети описываются с помощью матрицы размером $n \times n$, которую называют матрицей совместимости C_s [91]. Каждый недиагональный элемент c_{ij} матрицы C_s представляет собой расстояние минимального разнесения в частотной области (выраженное в каналах) между частотой, присваиваемой i -й соте и частотой, присваиваемой j -й соте. Ограничения из-за помех по соседнему каналу могут быть записаны как $c_{ij} = 1$. Запись $c_{ij} = 2$ указывает на то, что частоты, смежные в частотной области не могут присваиваться смежным сотам, а значение $c_{ij} = 0$ - на то, что сотам i и j разрешается использовать одну и ту же частоту. Каждый диагональный элемент c_{ij} в C_s обозначает расстояние минимального разнесения между двумя любыми частотами, присваиваемыми i -й ячейке.

Обозначая через f_{ik} k -ю частоту, присваиваемую i -й соте, ограничения по ЭМС можно записать следующим образом:

$$|f_{ik} - f_{jl}| \geq c_{ij}, \quad (2.32)$$

для $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, d_i$ и $l = 1, \dots, d_j$, исключая $i = j$, $k = l$.

Обеспечение уровня помех не выше максимально допустимых значений, выполняется с помощью процедуры формирования групп частотных присвоений сотам сети, при этом количество необходимых частотных каналов N_f не должно превышать количество частотных каналов N_{fGSM-R} , выделенных для сети GSM-R [156]:

$$N_f(S) \leq N_{fGSM-R} = 18. \quad (2.33)$$

2.3. Формализация и анализ задачи ЧТП сети GSM-R

Согласно вышеизложенному, задачу ЧТП сети GSM-R можно представить следующей формулировкой: необходимо найти подмножество БС S' , входящее во множество S_{BC} , и конфигурацию каждой БС cnf_i , при выполнении условий (2.18) и (2.33), при этом суммарная стоимость сети $M_{ПБС}$, должна быть минимальной:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n M_{bc}(cnf_i) \cdot s_i \mid Kd(i) \geq a_{\min}; N_f(Cs) \leq N_{f_{max}}, s_i \in \{0,1\}, cnf_i \in Cf_{BC}, j = \overline{1, n} \right\}. \quad (2.34)$$

где $M_{bc}(cnf_i)$ - стоимость БС в конфигурации cnf_i ,

Cf_{BC} - множество возможных конфигураций БС.

Анализ сформулированной задачи показывает, что она относится к задачам дискретной оптимизации об обобщенном (многократном) покрытии множеств с дополнительными ограничениями [63]. Из теории известно, что эта задача принадлежит к NP - полным, т.е. точные методы ее решения имеют экспоненциальную сложность. Более того, дополнительное ограничение (2.33) значительно усложняет поиск решения, поскольку нахождение функции $N_f(S)$ относится к классу задач о раскраске взвешенного графа наименьшим числом цветов [66,53], которая также является NP - полной задачей.

2.3.1. Анализ размера пространства поиска решений, задачи ЧТП сети стандарта GSM-R

Как было показано ранее, основным способом уменьшения материальных затрат, при проектировании сети GSM-R является определение оптимальных мест установки БС. Для чего необходимо спрогнозировать возможную зону покрытия каждой потенциальной БС, что в свою очередь ставит задачу определения необходимой конфигурации cnf_i для каждой БС s_i .

В общем случае поставленная задача имеет размер пространства поиска:

$$Nr(n_{BC}, n_{АНТ}, n_{СОТ}) = \left(1 + \sum_{i=1}^{n_{СОТ}} \binom{C^i}{(n_{АНТ} + i - 1)} (|\Phi_G| \cdot |\Phi_B| \cdot |H_A|)^i \right)^{n_{BC}} ; \quad (2.35)$$

где $n_{СОТ}$ - максимальное возможное количество радиосот одной БС,

$n_{АНТ}$ - число различных типов антенн,

$|\Phi_G|$ - мощность множества возможных азимутов направления антенн БС,

$|\Phi_B|$ - мощность множества возможных углов вертикального наклона антенн БС,

$|H_A|$ - мощность множества возможных вариантов высот подвеса антенн БС.

Например, пространство поиска задачи (2.34), при количестве потенциальных мест установки БС $n_{bs} = 10$, $n_{СОТ} = 3$, $n_{АНТ} = 3$, $|\Phi_G| = 72$ (от 0° до 355° с шагом 5°), $\varphi_{Aiq} = 10$ (от -15° до 5° с шагом 2°), $h_{ai} = 14$ (от 10 до 80 метров с шагом 5 метров):

$$Nr(10,3,3) \approx 10^{130};$$

а при количестве потенциальных мест установки БС $n_{bs} = 100$:

$$Nr(1000,3,3) \approx 10^{13000};$$

Очевидно - размер пространства поиска решений даже при малых размерностях исходных данных, не позволит, при существующих вычислительных мощностях, использовать методы прямого перебора для нахождения минимума целевой функции за разумное время.

2.4. Разработка методики решения задачи ЧТП сети GSM-R

Поскольку анализ размера пространства поиска решений, позволил сделать вывод о практической невозможности решения задачи ЧТП точными методами, единственным путем к решению поставленной задачи является применение приближенных методов поиска решения.

Для уменьшения вычислительной сложности поставленной задачи, возможно применение метода декомпозиции, который заключается в разбиении исходной задачи на ряд частных задач меньшей сложности. Особенности построения сетей ЖТР позволяют найти пути к упрощению поиска решения рассмотренной задачи, а именно предлагается следующие действия:

1. Предварительное нахождение множества конфигураций БС Cnf_{opt} , которые, являются близкими к оптимальным, с дальнейшим их уточнением в процессе работы основного цикла поиска решения. Т.е., для каждой потенциальной БС, находится количество антенн - q_i , их тип - Ant , а также азимуты направления φ_{Γ} и углы вертикального наклона $\varphi_{\text{В}}$, для организации радиоканала к максимальному количеству ЭУНП d_i :

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^m d_i \left| Ka_p(Ant_p, (\varphi_{G(i,p)} - \varphi_{A(i,j)}), (\varphi_{V(i,p)} - \varphi_{H(i,j)})) \geq P_{\min} - P_A + Lp_{(i,j)}; p = \overline{1, n_{COT}} \right. \right\}, \quad (2.36)$$

где $\varphi_{A(i,j)}$ - азимут направления, $\varphi_{H(i,j)}$ - угол вертикального наклона от i -той БС s_i к j -той ЭУНП d_j . Для уменьшения количества расчетов можно ограничить, для отдельной БС, все находящееся на расстоянии более R_{\max} , - величины максимально возможной дальности связи (для системы GSM $R_{\max} = 35$ км), вместо значения подставить величину большого ослабления.

Используя рассчитанную ранее матрицу потерь Lp , зная максимальную выходную мощность БС P_{A_i} и величину затухания в фидере L_{ϕ_i} , определим необходимый коэффициент усиления антенны в данном направлении для получения в каждом ЭУНП d минимально допустимого уровня полезного сигнала (по спецификации GSM-R [88] $P_{\min} = -95$ дБм):

$$K_{IA(i,j)} = P_{\min} - P_{A_i} + L_{\phi_i} + Lp_{(i,j)}, \quad (2.37)$$

где $i = 1, \dots, n$; $j = (1, \dots, k) \in R_{\max}$.

Каждая i -тая строка полученной матрицы $K_{IA}(n, m)$ будет представлять собой идеализированную диаграмму направленности для БС s_i необходимую

для обеспечения минимально-допустимого уровня во всем радиусе R_{\max} . В большинстве случаев она имеет достаточно сложную форму и может содержать значения достаточно большого (>30 дБ) усиления. Данную диаграмму направленности необходимо частично синтезировать из нескольких (практически не более четырех) имеющихся в базе данных типов антенн. т.е. представить в виде набора минимального числа заранее известных функций усиления антенны $K_a(\text{Ant}, \varphi_G, \varphi_B)$, дБи.

Размера пространства поиска решений данной подзадачи для каждой БС, можно найти следующим образом:

$$Nr_1(n_{\text{АНТ}}, n_{\text{СОТ}}) = \sum_{i=1}^{n_{\text{СОТ}}} \left(C_{(n_{\text{АНТ}}+i-1)}^i \right) \left(|\Phi_G| \cdot |\Phi_B| \cdot |H_A| \right)^i; \quad (2.38)$$

Что при $n_{\text{СОТ}} = 3, n_{\text{АНТ}} = 3$, дает пространство поиска:

$$Nr_1(3,3) \approx 10^{13}.$$

Если учесть, что в случае с железнодорожными системами радиосвязи, за счет заранее известных направлений зон обслуживания БС, возможно сужение области поиска возможных азимутов и углов направления а также высоты установки антенн БС в несколько раз ($|\Phi_G|=1 \div 5, |\Phi_B|=1 \div 5, |H_A|=1 \div 5$):

$$Nr_1(3,3) \approx 10^2 \div 10^6$$

Можно сделать вывод, что данная подзадача может быть решена довольно быстро, даже методом прямого перебора.

2. Использование найденных конфигураций, в качестве исходных данных, для поиска оптимального размещения БС, с использованием локальной оптимизации конфигурации БС. Поиск при этом осуществляется согласно выражению:

$$\min \left\{ \sum_{i=1} M_{\text{бс}}(\text{cnf}_i) \cdot s_i \mid Kd(i) \geq 2, s_i \in \{0,1\}, \text{cnf}_i \in \text{Cnf}_{\text{opt}}, j = \overline{1, n} \right\}; \quad (2.39)$$

Размера пространства поиска решений данной подзадачи можно найти следующим образом:

$$Nr_2(n_{BC}, Cnf_{opt}) = \prod_{i=1}^{n_{BC}} (1 + |Cnf_{opt}(i)|). \quad (2.40)$$

Если каждая из БС будет иметь всего одну возможную конфигурацию $|Cnf_{opt}(i)|=1$, размер пространства поиска решений будет определяется выражением $Nr_2 = 2^{n_{BC}}$, что при большом количестве мест установки БС (>20) не позволяет использовать точные методы поиска решений.

3. Формирование групп частотных присвоений сотам сети, после нахождения множества R_{opt} квазиоптимальных вариантов их возможного расположения, отсортированных в порядке уменьшения значения материальных затрат. В случае если количество нужных частотных каналов, превышает число каналов выделенных для GSM-R, выбирается следующее возможное решение.

Блок-схема предлагаемой методики решения задачи ЧТП представлена на рис. 2.5. Вышеописанные действия выполняются на этапах 3,10,11,13.

Этап 4 необходим для проверки условия достаточности исходного множества S_{BC} для получения требуемого резервирования радиоканала (2.13). Например вектор $Kd = \{1,0,0,1,4,5,8,1,3,2,1,1,\dots,2\}$ говорит об отсутствии необходимого уровня сигнала в ЭУНП d_2, d_3 и наличии избыточности покрытия в ЭУНП d_5, d_6, d_7 . Необходимым условием обеспечения заданной степени резервирования является выполнение неравенства (2.18).

В случае, если проверка условия (2.18) показала, что имеющихся мест установки БС S_{BC} недостаточно, алгоритм переходит на этап 5, где формируется множество V ЭУНП, в которых не обеспечивается заданная степень резервирования a_{min} . На основании этих данных принимается решение о добавлении новых мест возможной установки БС.

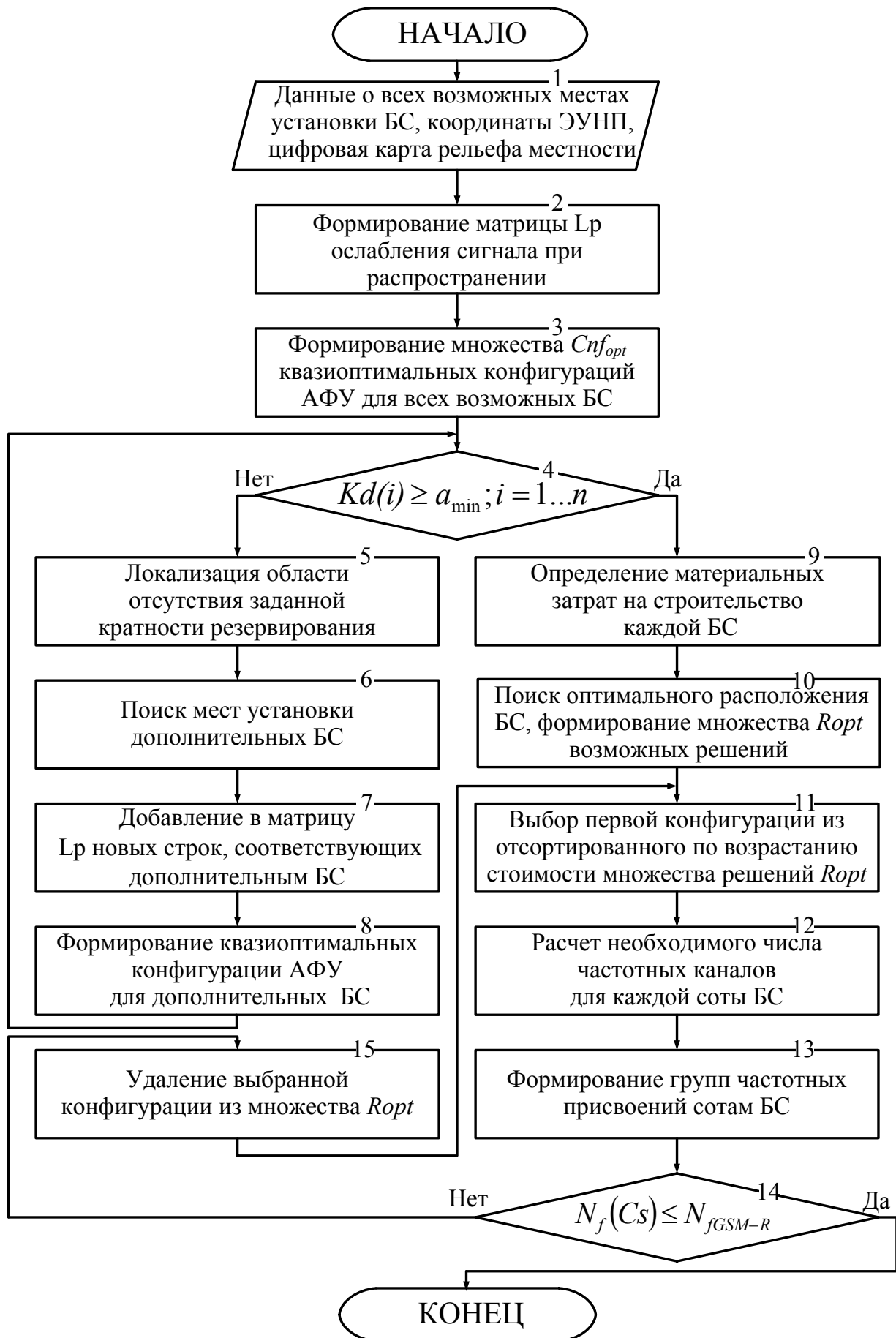


Рис. 2.5 Блок-схема предложенной методики решения задачи ЧТП сети GSM-R.

Целью этапов 5-8 является сформировать множество S_{BC} , достаточного для возможности организации сети с заданным качеством радиопокрытия и необходимой степенью резервирования.

При выполнении условия (2.18) следует переход к девятому этапу, на котором проводится предварительная оценка стоимости, для каждой потенциальной БС (с учетом стоимости полученной конфигурации cnf), и записывается в виде вектора M размера n , $M = \{M_{BC1}, M_{BC2}, \dots, M_{BCn}\}$. Суммарная стоимость подсистемы БС:

$$M_{ПВС} = \sum_{i=1}^n M_{BCi} \quad (2.41)$$

Этап 10. Выполняется поиск оптимального, по критерию минимальной стоимости, размещения БС, с использованием локальной оптимизации конфигураций БС, в процессе которого формируется множество вариантов возможных решений, близких к оптимуму.

На этапе 11 полученное множество решений сортируется по возрастанию стоимости и из него выбирается вариант конфигурации сети с наименьшей стоимостью.

На этапе 12, для обеспечения вероятности отказа абоненту в обслуживании, за счет занятости каналов, не выше максимально-допустимой, выполняется расчет необходимого числа частотных каналов для каждой радиосоты всех БС.

Этап 13. Для выполнения условия обеспечения ЭМС выполняется присвоение частот приемопередатчикам БС.

Этап 14. Выполняется проверка условия достаточности имеющихся частотных каналов N_{fGSM-R} .

На основании рассмотренного выше алгоритма, можно выделить перечень задач требующих решения в процессе ЧТП сети GSM-R и определяющих технико-экономические характеристики:

- Задача прогнозирования потерь при распространении радиосигнала между i - той БС_{ij} и j - той ЭУНП множества $D_{П}$, и оценка влияния погрешности прогноза на точность получаемых решений;
- задача выбора оптимального размещения БС, для обеспечения заданной структурной надежности, по критерию минимальной стоимости;
- задача присвоения частот приемопередатчикам БС для обеспечения внутрисистемной и межсистемной электромагнитной совместимости с учетом требований к качеству работы сетей ЖТР.

Выводы по второму разделу

1. Выполнена формализация задачи ЧТП сети GSM-R в виде задачи дискретной оптимизации с ограничениями, где целевая функция – материальные затраты на строительство сети, вектор ограничений – требуемые показатели качества работы сети.

2. Для определения возможных путей уменьшения материальных затрат на строительство сети GSM-R, выполнен анализ влияния её составных подсистем и их конфигурации на общую стоимость сети. Сделан вывод, что основным способом уменьшения материальных затрат является определение оптимальных мест установки БС.

3. На основе нормативных документов и известных теоретических положений выполнен анализ основных показателей и критериев качества, которые выдвигаются к сетям ЖТР и основных путей их достижения. Сделан вывод что основными способом достижения требуемых показателей качества является обеспечение заданной кратности резервирования радиоканала и оборудования в каждом ЭУНП, а также обеспечение ЭМС при использовании органичного количества выделенных частотных каналов.

4. Показано, что рассматриваемая задача ЧТП сети ЖТР стандарта GSM-R, содержит в себе две подзадачи: задачу дискретной оптимизации о

взвешенном обобщенном (многократном) покрытии множеств и задачу раскраски взвешенного графа наименьшим числом цветов. Поскольку указанные задачи являются NP – полными, размер пространства поиска решений не позволяет использовать точные методы для нахождения минимума целевой функции за разумное время.

5. Для уменьшения вычислительной сложности поставленной задачи применен метод декомпозиции и разработана методика приближенного решения, которая состоит из нескольких этапов:

- предварительного нахождения конфигурации для каждой БС, которая является близкой к оптимальной;

- поиск множества возможных вариантов размещения БС, с использованием в качестве исходных данных ранее найденных конфигураций и применением локальной оптимизации конфигураций БС;

- формирование групп частотных присвоений сотам сети GSM-R, для отсортированных в порядке уменьшения величины материальных затрат, ранее найденных конфигураций сети. В случае выполнения условия достаточности имеющихся частотных каналов для обеспечения ЭМС, текущая конфигурация выбирается в качестве окончательного решения.

6. На основании рассмотренной методики, выделен перечень задач, нуждающихся в анализе и решении:

- задача прогнозирования ослабления радиосигнала на трассе распространения, в диапазоне частот 900 МГц, с учетом влияния инфраструктуры железных дорог;

- задача нахождения оптимального, по критерию минимальных материальных затрат, размещения БС, для обеспечения требуемых показателей качества и заданной структурной надежности сети;

- задача формирования групп частотных присвоений приемопередатчикам БС для обеспечения ЭМС, с учетом специфики построения сетей ЖТР.

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ К МЕТОДУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОСИГНАЛА НА ЧАСТОТЕ 900 МГц, В УСЛОВИЯХ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

3.1. Постановка задачи

Прогнозирование потерь при распространении радиосигнала является одной из наиболее важных и сложных задач, решаемых при проектировании сетей подвижной радиосвязи [3]. На основе результатов этого расчета определяются требуемые характеристики радиооборудования, типы антенн, места размещения БС [3]. Это требует разработки метода, позволяющего с необходимой точностью, прогнозировать потери при распространении радиосигнала, в условиях инфраструктуры железных дорог, для решения задачи ЧТП сети GSM-R.

Существует достаточно большое количество подходов к прогнозированию потерь при распространении радиосигнала. Одни из них являются узкоспециальными, другие — пригодны для решения большого круга задач. В работе производится сравнительный анализ нескольких методик, разработанных для расчетов, как радиоканалов железнодорожной радиосвязи, так и каналов иного назначения. Определяются достоинства и недостатки каждого способа расчета.

На основании экспериментальных исследований, в диссертации разработаны рекомендации к методу прогнозирования потерь при распространении радиосигнала, учитывающий влияние инфраструктуры железных дорог. Важным вопросом становится возможность автоматизации данных расчетов.

3.2. Разработка метода оценки влияния погрешности прогнозирования потерь при распространении радиосигнала, на стоимость получаемых конфигураций подсистемы БС сети GSM-R

Условием обеспечения возможности организации двухсторонней радиосвязи, между i -той БС и МС находящейся в j -том ЭУНП, является выполнение условия 1 в выражении (2.15), что равносильно одновременному выполнению следующих неравенств:

$$P_{BCi} + Ka_{BC}(i, j) + Ka_{MC}(i, j) - L_{BCi} - L_{MCi} - Lp(i, j) \geq P_{mind}, \quad (3.1)$$

$$P_{MCj} + Ka_{BC}(i, j) + Ka_{MC}(i, j) - L_{BCi} - L_{MCi} - Lp(i, j) \geq P_{mins}. \quad (3.2)$$

Если выполняется условие сбалансированности радиоканалов от БС к МС, и в обратном направлении:

$$P_{BCi} - P_{mind} = P_{MCj} - P_{mins}, \quad (3.3)$$

то условием обеспечения возможности организации двухсторонней радиосвязи будет неравенство:

$$Lp(i, j) \leq L_{maxij}, \quad (3.4)$$

где L_{maxij} – максимально допустимое ослабление радиосигнала на трассе распространения между i -той БС и МС находящейся в j -том ЭУНП.

Существующие статистические методы расчета ослабления радиосигнала на трассе распространения [2,3] позволяют прогнозировать его медианное значение, что соответствует вероятности $\rho = 0,5$ непревышения полученного значения ослабление радиосигнала. Для увеличения вероятности ρ , необходимо введение запаса L_d на медленные замирания (МЗ). Если в качестве единиц измерения использовать дБ, то МЗ имеют нормальный закон распределения [2,3,6], со среднеквадратичным отклонением σ_p . Величину запаса L_d можно определить следующим образом:

$$L_d = \alpha \cdot \sigma_p \quad (3.5)$$

где α – коэффициент (табл. 1), определяемый с помощью нормированной функции обратного нормального распределения, и зависящий от значения вероятности ρ .

Таблица 1

Значение коэффициента α для разных вероятностей ρ

ρ	0,5	0,9	0,92	0,95	0,98	0,99
α	0	1,28	1,4	1,65	2,05	2,32

Влияние величины σ_p на точность получаемых решений поиска расположения БС, можно определить как отношение математического ожидания необходимого количества БС n'_{BC} в конфигурации сети X' с учетом введенного запаса L_d на МЗ ($p_s = 0,95$), к математическому ожиданию количества БС n''_{BC} в конфигурации сети X'' , без учета МЗ:

$$\mu(\sigma_p, p_s) = \frac{M[n_{BC}(X'(\rho = p_s))]}{M[n_{BC}(X''(\rho = 0,5))]}, \quad (3.6)$$

Предположим, что исходные данные проектируемой сети заданы в виде множества S_{BC} размера n_{BC} , $D_{ЭУНП}$ размера $m_{ЭУНП}$, а также известно среднее количество ЭУНП, которые покрывает одна БС. Вероятность p_{tmp} организации радиоканала от случайно выбранной БС к случайному ЭУНП:

$$p_{tmp} = \frac{1}{m_{ЭУНП}}. \quad (3.7)$$

В этом случае вероятность $P_{(k_m=a_{min}, n_{BC})}$ события $k_j = a_{min}$, при количестве БС n_{BC} , можно определить по формуле Бернулли [11]:

$$P_{(k_j=a_{min})} = \frac{n_{\delta c}!}{a_{min}!(n_{\delta c} - a_{min})!} \cdot p_{tmp}^{a_{min}} (1 - p_{tmp})^{n_{\delta c} - a_{min}}, \quad (3.8)$$

а, вероятность, что $k_j \geq a_{min}$:

$$P_{(k_j \geq a_{min})} = \sum_{i=a_{min}}^{n_{\delta c}} \left(\frac{n_{\delta c}!}{i!(n_{\delta c} - i)!} \cdot p_{tmp}^i (1 - p_{tmp})^{n_{\delta c} - i} \right). \quad (3.9)$$

Учитывая тот факт, что:

$$\sum_{i=0}^{n_{\delta c}} \left(\frac{n_{\delta c}!}{i!(n_{\delta c} - i)!} \cdot p_{tmp}^i (1 - p_{tmp})^{n_{\delta c} - i} \right) = 1, \quad (3.10)$$

выражение (3.9) можно записать как:

$$P_{(k_j \geq a_{\min})} = 1 - \sum_{i=0}^{a_{\min} - 1} \left(\frac{n_{\delta c}!}{i!(n_{\delta c} - i)!} \cdot p_{tmp}^i (1 - p_{tmp})^{n_{\delta c} - i} \right). \quad (3.11)$$

Вероятность выполнения условия (2.18) :

$$P_{Kd} = (P_{(k_j \geq a_{\min})})^m = \left(1 - \sum_{i=0}^{a_{\min} - 1} \left(\frac{n_{\delta c}!}{i!(n_{\delta c} - i)!} \cdot p_{tmp}^i (1 - p_{tmp})^{n_{\delta c} - i} \right) \right)^m. \quad (3.12)$$

Плотность распределения вероятности ξ ожидаемого количества БС в полученной конфигурации [5]:

$$\xi(n_{BC}, p_{tmp}, m, a_{\min}) = (P_{(Kd, n_{BC})})^m - (P_{(Kd, n_{BC} - 1)})^m, \quad (3.13)$$

Используя выражения (3.12) и (3.13) можно записать распределения вероятности ξ ожидаемого количества БС в полученной конфигурации [5]:

$$\xi(n_{BC}, p_{tmp}, m, a_{\min}) = \left(1 - \sum_{i=0}^{a_{\min} - 1} Bin(i, n_{\delta c}, p_{tmp}) \right)^m - \left(1 - \sum_{i=0}^{a_{\min} - 1} Bin(i, (n_{\delta c} - 1), p_{tmp}) \right)^m, \quad (3.14)$$

где $Bin(i, n, q)$ - функция биномиального распределения (i – количество успехов в серии с n испытаний, с достоверностью успеха q в каждом испытании).

Если аппроксимировать железнодорожные участки, примыкающие к станции где расположена БС, прямыми линиями, то влияние значения среднеквадратичного отклонения σ МЗ на вероятность p_{tmp} организации радиоканала, от БС к случайной ЭУНП:

$$p_{tmp}(\sigma_p, p_s) = \frac{n_p \cdot R(P_{\min d}, P_{BC}, Ka_{BC}, Ka_{MC}, \sigma_p, p_s)}{m \cdot R_{el}}, \quad (3.15)$$

где n_p – среднее количество путей следования поездов со станции, где установлена БС;

$R(P_{\min d}, P_{BC}, Ka_{BC}, Ka_{MC}, \sigma, \rho)$ - максимальная прогнозируемая дальность радиосвязи, в направлении максимума усиления диаграммы направленности антенны БС.

Влияние погрешности прогнозирования потерь при распространении радиосигнала, на точность получаемых решений поиска размещения БС, можно записать следующим образом:

$$\mu(\sigma_p, p_s) = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot \xi(i, q_d(p_s), m, a_{\min})}{\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot \xi(i, q_d(0,5), m, a_{\min})} \quad (3.16)$$

3.3. Анализ существующих методик прогнозирования потерь при распространении радиосигнала и возможности их модификации с целью использования для расчета дальности радиосвязи ЖТР

3.3.1. Методика расчета дальности радиосвязи, основанная на модели распространения радиоволн в свободном пространстве

Самая простая модель распространения радиоволн [3]. Для определения напряженности электромагнитного поля, создаваемого передатчиком с заданной мощностью в некоторой случайной точке, удаленной от передатчика на определенное расстояние используется формула:

$$E_{mV/m} = 173 \frac{\sqrt{P_{kW}}}{d_{km}}, \quad (3.17)$$

где $E_{mV/m}$ – напряженность электромагнитного поля, мВ/м;

P_{kW} – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность, кВт;

d_{km} – расстояние до передатчика, км.

3.3.2. Методика расчета зоны обслуживания Окамуры - Хата

В основу методики расчета дальности радиосвязи положены эмпирические уравнения Хата, составленные на основе базовых кривых

распространения, полученных Окамура [96]. Согласно этой методики, основные потери сигнала при распространении, в городских условиях (процент застройки $a = 15\%$):

$$L_r = 69,55 + 26,16 \cdot \log f - 13,82 \cdot \log h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \cdot \log h_b) \cdot \log R, \quad (3.18)$$

где f - рабочая частота, МГц;

h_b - высота подвеса антенны БС, м ;

h_m - высота антенны МС, м ;

R - расстояние между БС и МС, км ;

$a(h_m)$ — поправочный коэффициент для высоты расположения антенны МС, отличной от 1,5 м:

$$a(h_m) = (1,1 \cdot \log f - 0,7) \cdot h_m - (1,56 \cdot \log f - 0,8). \quad (3.19)$$

Для определения основных потерь при распространении радиоволн в пригородной зоне в выражение (3.18) вводятся дополнительные слагаемые:

$$L_{II} = L_r - 0,023 - 7,327 \cdot \log R. \quad (3.20)$$

Изменения L_{II} при $a \neq 15\%$ можно учесть с помощью поправки S , дБ, определяемой следующим образом:

$$S = 30 - 25 \lg(\alpha) \text{ при } 5\% < \alpha < 50\%;$$

$$S = -15,6 \lg(\alpha) + 0,19 \lg(\alpha) + 20 \text{ при } 1\% < \alpha < 5\%;$$

$$S = 20 \text{ при } \alpha < 1\%.$$

3.3.3. Методика расчета зоны обслуживания на основе рекомендации МСЭ Р.370

Более универсальная методика расчета напряженности электромагнитного поля предложена в рекомендации Международного союза электросвязи Р.370 [116]. Вот некоторые характеристики этой модели. Расчет напряженности электромагнитного поля основан на кривых распространения радиоволн. Кривые представляют собой полученные экспериментальным путем значения напряженности поля, превышаемые в 50% мест для различных значений процента времени. Кривые охватывают полосы частот $30 \div 250$ МГц и $450 \div 1000$ МГц и расстояния от 10 до 1000 км. Эффективная

высота передающей антенны может быть равна 37.5, 75, 150, 300, 600, 1200 м., высота приемной антенны – 10 м. Значение эффективной излучаемой мощности передатчика принимается 1 кВт. В Рекомендации учитываются три типа путей распространения радиоволн: суша, море, холодное море.

Для значений параметров, отличных от стандартных, значение напряженности корректируется. Значение высоты передающей антенны, используемое для расчета напряженности поля, принимается равной эффективной высоте, определяемой как высота над поверхностью земли, усредненная на участке от 3 до 15 км от места установки передатчика в направлении приемника. Это означает, что эффективная высота антенны может быть отрицательной. Такая ситуация возможна, когда средняя высота рельефа, окружающего место установки передатчика, превышает высоту подвеса передающей антенны над уровнем земли. В этом случае расчет напряженности поля основывается на использовании коррекции, которая зависит от величины угла просвета местности. Угол просвета (для передатчика) рассчитывается как угол между горизонталью, проходящей на высоте подвеса передающей антенны и прямой, устраняющей все препятствия в направлении приемной антенны. Кривые позволяют рассчитывать значение напряженности поля для трасс, проходящих над сушей либо над поверхностью моря. Если путь распространения радиоволн проходит над участками с различными характеристиками распространения рекомендация предлагает метод расчета напряженности поля, учитывающий этот фактор.

3.3.4. Методика расчета зоны обслуживания на основе модели Уолфиш-Икегами

Модель Уолфиш-Икегами [46] может применяться в случаях, когда антенна БС расположена как выше, так и ниже линии уровня крыш городской застройки. В совокупность эмпирических факторов, учтенных расчетной формулой входят высоты антенн МС и БС, ширина улиц,

расстояния между зданиями, высота зданий и ориентация улиц относительно направления распространения сигнала.

Ослабление сигнала на трассе распространения сигнала, согласно этой модели, рассчитываются по формуле:

$$L = L_s + L_{rts} + L_{ms}, \quad (3.21)$$

где L_s - ослабление сигнала в свободном пространстве;

L_{rts} - потери сигнала при дифракции и рассеяние на крышах зданий;

L_{ms} - потери сигнала вызванные многократной дифракцией от рядов зданий.

$$L_s = 32,4 + 20 \log R + 20 \log f \quad (3.22)$$

Данная модель широко используется для расчетов зон обслуживания БС в условиях городской застройки и небольших расстояний. Ее можно применять в следующих диапазонах параметров: $800 < f < 2000$ МГц; $4 \text{ м} < h_{\text{БС}} < 50 \text{ м}$; $1 \text{ м} < h_{\text{МС}} < 3 \text{ м}$; $0,02 \text{ км} < R < 5 \text{ км}$.

3.3.5. Сравнительная характеристика рассмотренных методов расчета зоны обслуживания

Модель распространения радиоволн в свободном пространстве (3.17) может служить основой для детерминированных методов. При ее использовании необходимы значительные дополнительные коррекции результата, что делает её непригодной для использования в чистом виде.

Преимущество методики расчета канала поездной радиосвязи, рекомендуемая инструкцией ЦШ 4818 [67], рассмотренной в первом разделе, заключается в удобстве и простоте проведения расчетов для диапазонов 150 и 330 МГц. Это объясняется ее узкоспециальной направленностью. Причем для среднeperесеченной местности результаты расчетов достаточно близки к реальной картине напряженности поля [16]. Функции распределения БЗ и МЗ получены по результатам исследований реальных железнодорожных участков, поэтому имеют достаточно высокую точность при расчете

железнодорожных трасс. Применение данной методики для местности с глубиной закрытия трассы более 20 м может привести к ошибке 10 — 20 дБ, что связано с применением единого способа нахождения медианы вдоль всей трассы без учета реального расположения препятствий. Диапазон применения методики ограничен верхним пределом в 330 МГц, что делает ее непригодной для расчета радиосетей в диапазоне частот 900 МГц.

Автоматизация методики расчета зоны обслуживания БС на основе рекомендации МСЭ Р.370 затруднена, поскольку основана на использовании кривых распространения радиоволн. Кроме того, ограничения, присущие этой модели препятствуют её применению для расчета зон обслуживания БС сети ЖТР стандарта GSM-R.

Применение модели Уолфиш-Икегами целесообразно только в условиях городской застройки, небольших расстояний ($R < 5$ км) и сравнительно низкого расположения антенны МС ($h_{МС} < 3$ м).

Преимуществом метода Окамуры - Хата является использование рекомендованных Группой Радио Международного Союза Электросвязи механизмов учета влияния на характер распространения радиоволн различных факторов. Данная методика определения дальности радиосвязи наиболее удобна из рассмотренных для автоматизации расчетов, поскольку в ней вместо базовых кривых прогнозирования уровня напряженности поля используется эмпирическое уравнение Хата, универсальное для разных диапазонов частот и высот установки антенн радиостанций. В методике предложен механизм учета плотности застройки населенных пунктов, для которых проводится расчет, позволяющий оценивать уровни сигнала как в крупных городах так и в сельской местности.

К недостаткам всех рассмотренных методов следует отнести слабый аппарат учета неровностей местности, не позволяющий детально оценивать рельеф трассы радиосвязи. Нет специальных поправок и на такие факторы, как растительность, переходы суша-вода, рефракция радиоволн.

3.4. Экспериментальное исследование особенностей распространения сигнала, диапазона частот 900 МГц, на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов

В рамках настоящей работы выполнено экспериментальное исследование особенностей распространения сигнала, диапазона частот 900 МГц, на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов. Для проведения измерений использовался специализированный измерительный комплекс TEMS производства компании Ericsson и NetTek Y400 Analyzer производства Tektronix прошедший метрологическую проверку. В качестве источников радиосигналов использовались предварительно отобранные БС стандарта GSM-900 оператора мобильной связи, расположенные недалеко от железнодорожных станций и имеющие антенны, направленные вдоль перегонов. Высоты подвеса антенн БС 25-55 м, ширина лепестка диаграммы направленности в горизонтальной плоскости 65° по уровню 3 дБ. На приемной стороне использовалась антенна с усилением 1,5 дБ относительно полуволнового вибратора и круговой диаграммой направленности, установленная на крыше локомотива ($h_{MC} = 4\text{м}$). Для уменьшения погрешности оценки затухания сигнала на трасе распространения, было выполнено предварительное измерение выходной мощности и коэффициента стоячей волны АФУ БС.

Измерения проводились с помощью вагона - лаборатории связи Донецкой железной дороги. Эксперимент проводился на 5 участках железной дороги (общее количество точек измерений - около 2.3 млн., при общей протяженности более 200 км). Полученные данные были подвергнуты обработке на ЭВМ, в результате чего были построены гистограммы плотности распределения быстрых замираний (БЗ) сигнала, а также графики изменения уровня принимаемого сигнала (с усреднением по быстрым замираниям), которые частично представлены в приложении А.

3.4.1. Экспериментальное исследование быстрых замираний сигнала на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов

В рекомендуемых методиках расчета дальности радиосвязи [67] влияние инфраструктуры железной дороги предлагается учитывать с помощью отдельных поправочных коэффициентов. Коэффициенты получены в результате экспериментальных исследований для диапазонов 160 и 330 МГц. Данные документы были разработаны до появления стандарта GSM-R и для диапазона частот 900 МГц никаких поправок в рекомендациях [67] не приводится. В работе [35] получены распределения огибающей результирующего сигнала для радиотрасс, соответствующих одностороннему и двухстороннему размещению опор контактной сети. Полученные распределения зависят от соотношения между амплитудами отдельных составляющих сигнала. Амплитуды являются вероятностными величинами, закон распределения которых определяется распределением расстояний до переизлучающих радиоволны опор при движении локомотива по перегону, а также значением коэффициентов отражения опор. Таким образом, в условиях постоянного изменения соотношения амплитуд взаимодействующих сигналов, задача теоретического получения численных значений функции распределения сигнала становится крайне сложной и из-за громоздкости получаемых выражений практически нереализуемой. Поэтому для определения значений поправочных коэффициентов, учитывающих флуктуации сигналов на перегонах и станциях, необходимы экспериментальные исследования. Известно [75], что при наличии преобладающего по амплитуде прямого незамирающего луча распределение мгновенных значений огибающей сигнала удовлетворительно аппроксимируется законом Рэля-Райса:

$$P(s/\bar{s}) = \frac{x}{\sigma_x^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp(-K) \cdot I_0\left(\frac{x}{\sigma_x} \sqrt{2K}\right), \quad x \geq 0, \quad (3.23)$$

где $I_0()$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;

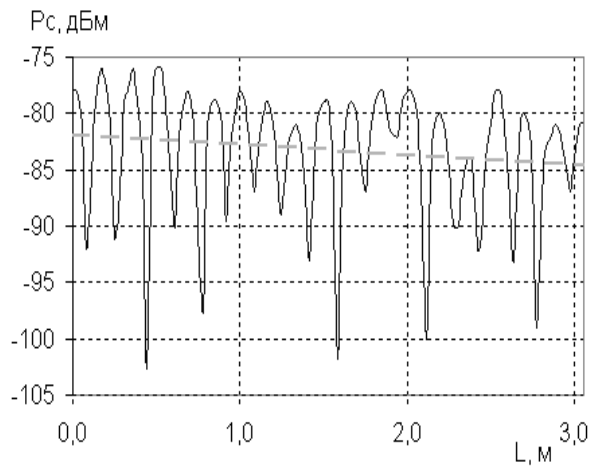
K – параметр, характеризующий отношение энергии прямого луча к суммарной энергии рассеянных сигналов.

В случае, когда между приемником и передатчиком отсутствует прямая видимость ($K = 0$), распределение Рэлея-Райса переходит в распределение Релея:

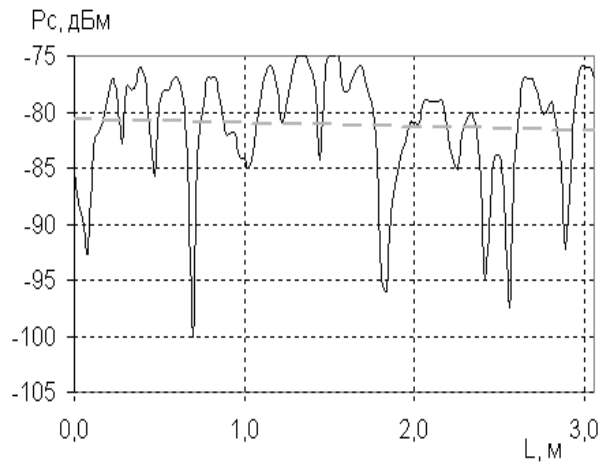
$$w(x) = \frac{x}{\sigma_x^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad x \geq 0. \quad (3.24)$$

Для установления закона распределения БЗ в диапазоне частот 900 МГц в условиях инфраструктуры железной дороги, использованы результаты проведенного экспериментального исследования. Фрагменты записи уровня сигнала в различных условиях приведены на рис. 3.1.

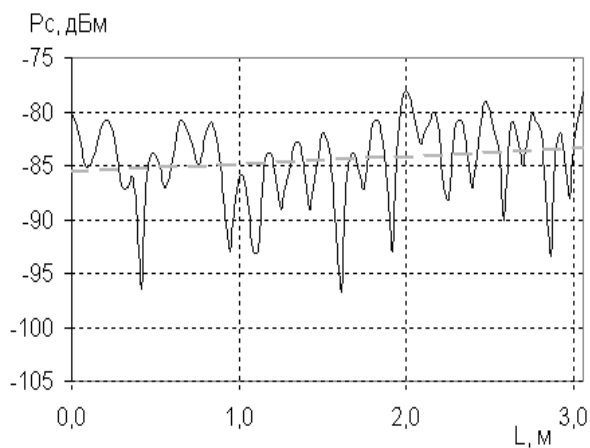
По результатам измерений построены гистограммы плотности распределения БЗ и в соответствии с методикой, изложенной в [47], было подтверждено согласие опытного распределения с распределением Релея-Райса. После аппроксимации опытного распределения, формулой (3.23) получены значения параметра K для разных условий приема радиосигналов (таблица 3.1). Графики интегрального распределения БЗ (рис. 3.2) на станциях, электрифицированных и неэлектрифицированных участках, существенно различаются. Это экспериментально подтверждает наличие влияния инфраструктуры железных дорог, которое выражается в увеличении глубины БЗ сигнала, что особенно проявляется при наличии прямой видимости между передатчиком и приемником. При этом установлено, что глубина БЗ, во всех рассмотренных случаях, не выше, чем в модели Релея (рис. 3.2).



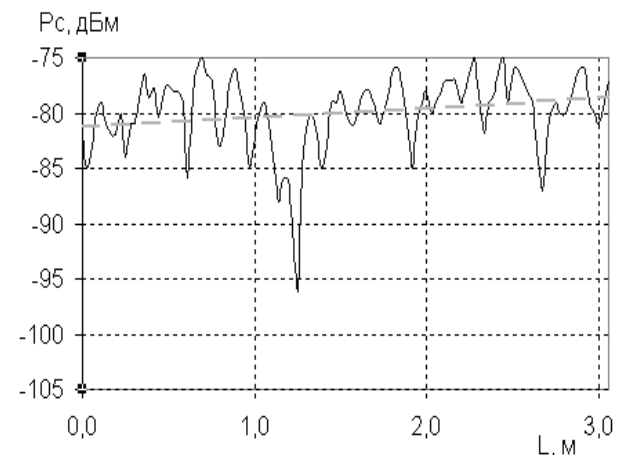
а) станция, состав на смежном пути



б) станция



в) электрифицированный участок



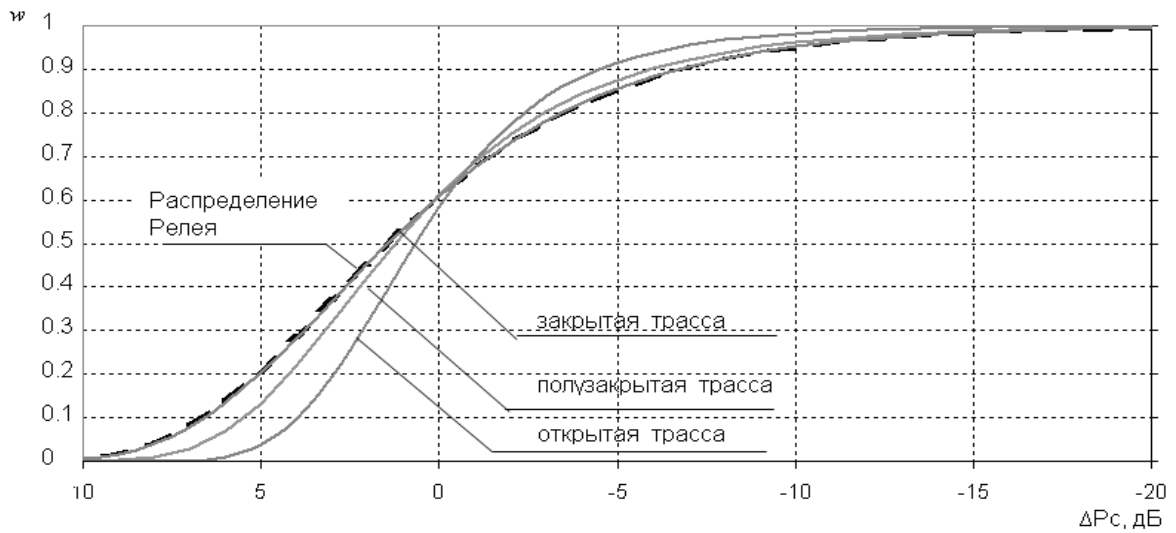
г) не электрифицированный участок

Рис. 3.1 Фрагменты записей уровня сигнала от БС на полузакрытой трассе в различных условиях.

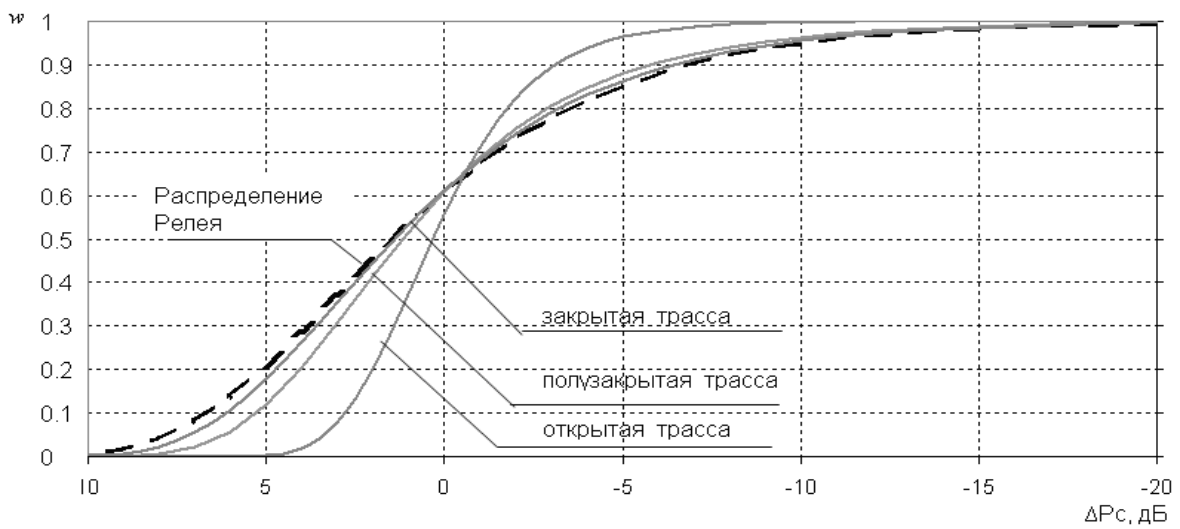
Таблица 3.1.

Значения параметра K для различных условий, полученные экспериментально

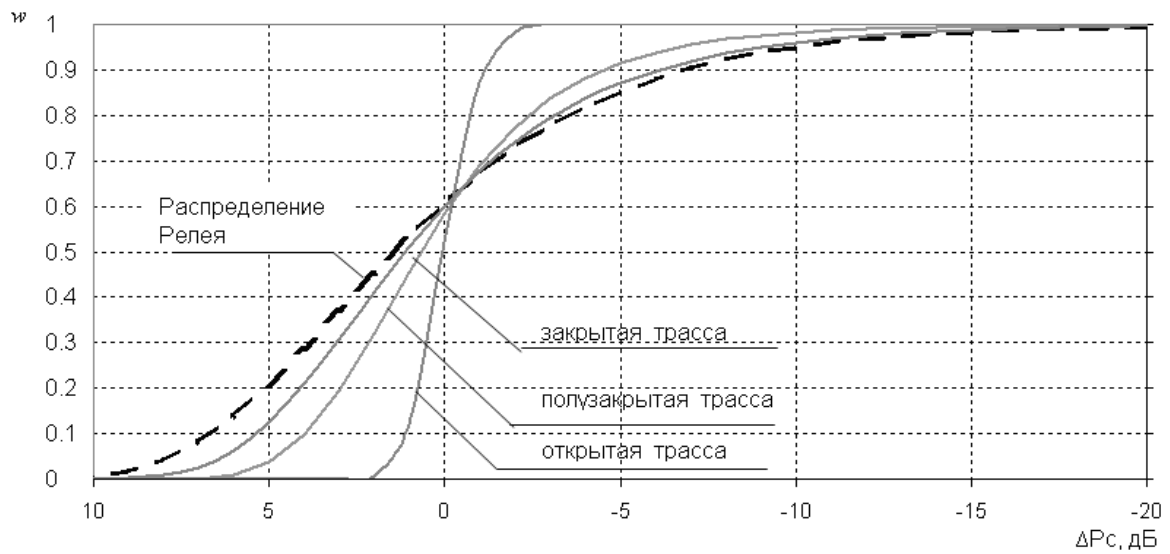
	станция	Электрифици- рованный участок	Неэлектрифици- рованный участок
открытый участок	1.27	2.14	4.7
полузакрытый участок	0.79	0.875	1.25
Закрытый участок	0.625	0.68	0.73



а) станция.



б) перегон, электрифицированный участок.



г) перегон, неэлектрифицированный участок.

Рис. 3.2 Интегральное распределение величины быстрых замираний в различных условиях.

3.4.2. Исследование медленных замираний сигнала на территории железнодорожных объектов и вдоль перегонов

Данные, полученные в результате расчета потерь сигнала при распространении методом Окамуры-Хата, сравнивались с данными экспериментальных исследований, выполненных в условиях инфраструктуры железных дорог на частоте 900 МГц.

Для каждого участка был выполнен расчет изменения медиального значения уровня сигнала по методике Окамуры-Хата с учетом изменения коэффициента усиления антенны БС в горизонтальной и вертикальной плоскости относительно положения приемной антенны. Далее была рассчитана величина Y :

$$Y = P_{\text{ИЗМ}} - P_{\text{О-Х}}, \quad (3.25)$$

где $P_{\text{О-Х}}$ – величина медианного уровня сигнала от БС, рассчитанного по методике с применением формулы Окамура-Хата, дБм;

$P_{\text{ИЗМ}}$ – величина измеренного значения уровня сигнала, дБм.

Фактически величина Y равна сумме мгновенного значения медленного замирания сигнала и погрешности расчета медианного значения уровня сигнала по формуле Окамуры-Хата. При аппроксимации плотности распределения величины Y нормальным распределением были получены значения величины стандартного отклонения D' (таблица 3.2). Также обнаружено смещение среднего значения Y относительно 0 дБ (таблица 3.4), что позволило определить поправку K , необходимую для учета влияния инфраструктуры железной дороги.

Таблица 3.2.

Стандартное отклонение величины Y , (D')

Тип Участка		большие станции и узлы	станции	Эл.участок	Не эл. участок
Город	$5\% < \alpha < 50\%$	8,3 дБ	7,6 дБ	5,8 дБ	5,6 дБ
Пригород	$1\% < \alpha < 5\%$	-	6,2 дБ	5,5 дБ	4,9 дБ
Открытая местность	$\alpha < 1\%$	-	-	4,8 дБ	4,6 дБ

Таблица 3.3.

Значение коэффициента А для разных вероятностей р

<i>p</i>	0,9	0,92	0,95	0,98	0,99	0,1*	0,05*	0,01*
<i>A</i>	1,28	1,4	1,65	2,05	2,32	-1,28	-1,65	-2,32

*Значения вероятностей 0,1-0,01 используются в случае, когда необходимо оценить зону возможных помех от БС.

Таблица 3.4.

Среднее значение величины Y для различных условий (К)

Тип Участка		большие станции и узлы	станции	Эл.участок	Не эл. участок
Город	$5\% < \alpha < 50\%$	2,4 дБ	2,2 дБ	1,8 дБ	<1 дБ
Пригород	$1\% < \alpha < 5\%$	-	2,5 дБ	2,5 дБ	<1 дБ
Открытая Местность	$\alpha < 1\%$	-	-	2,7 дБ	1,3 дБ

Также в некоторых случаях были обнаружены большие значения стандартного отклонения величины Y, которые объясняется наличием на пути распространения естественных и искусственных препятствий вызывающих значительное ослабление сигнала. В качестве наглядной иллюстрации приведены фрагменты записи уровня сигнала (рис. 3.3) и рельефа местности с одного из исследуемых участков (рис. 3.4).

Как видно из рис. 3.3 разница значений уровня сигнала Y достигает 20 дБ при протяженности этой зоны более километра. Данный эффект объясняется наличием террикона, попадающего в профиль трассы.

Результаты оценки точности метода Окамуры-Хата показали, что он позволяет производить расчет зон покрытия и в большинстве случаев даёт хорошие результаты, однако не учитывает всех факторов, оказывающих существенное влияние на результирующий сигнал в точке приема, и может использоваться лишь при построении начального приближения сети стандарта GSM-R. Оценка дальности связи при высоких требованиях к вероятности обеспечения минимального уровня (95 - 99%) вызывает

необходимость вводить большой запас на медленные замирания сигнала (15 - 25 дБ). Что в большинстве случаев приводит к существенному занижению оценки дальности связи и как следствие увеличивает стоимость проектируемой сети GSM-R.



Рис. 3.3 Фрагмент записи уровня сигнала от БС.

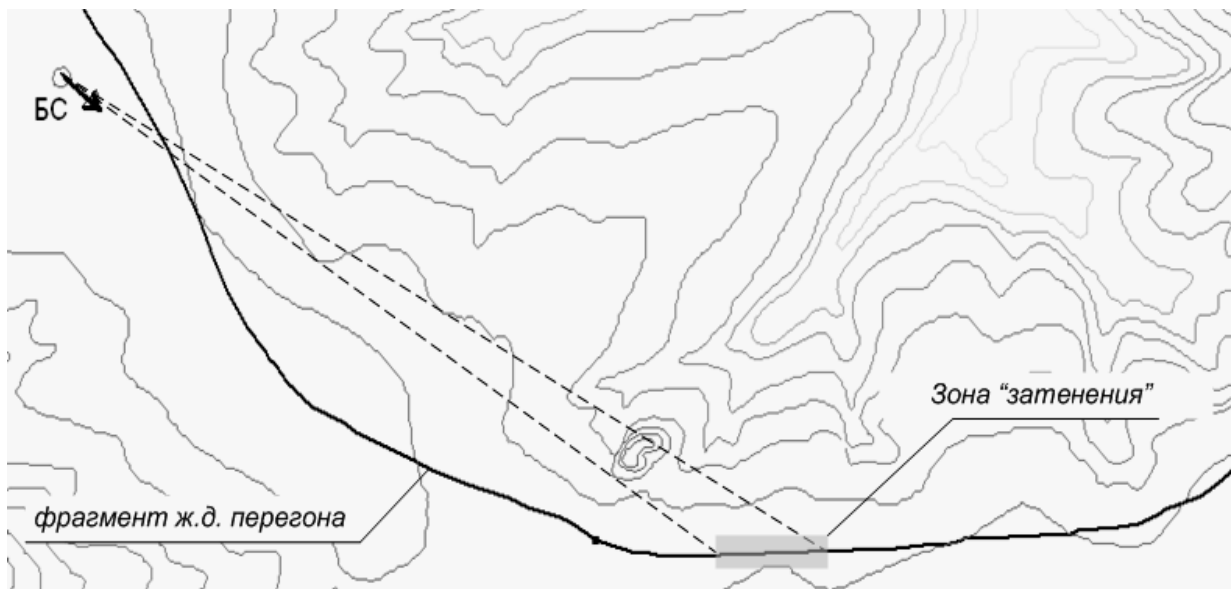


Рис. 3.4 Фрагмент карты рельефа местности с исследуемым участком и местом расположения БС (пунктиром обозначены проекции от антенны БС на участок перегона с заниженным уровнем сигнала).

На рис. 3.5 показана зависимость изменения уровня сигнала ΔP при медленном замирании относительно его медианного значения от глубины зазора d_{\min} до наивысшей точки профиля трассы.

Для увеличения точности прогноза ослабления сигнала на трассе распространения, необходима разработка метода, сочетающего в себе статистический и детерминированный подходы. Последнее становится возможным при использовании цифровых карт рельефа местности и учета дополнительных потерь.

3.5. Метод учёта рельефа местности при расчете потерь распространения радиоволн

Приведенный пример говорит о необходимости использовании данных рельефа местности для прогнозирования части медленных замираний, что в свою очередь приведет к уменьшению дисперсии величины Y .

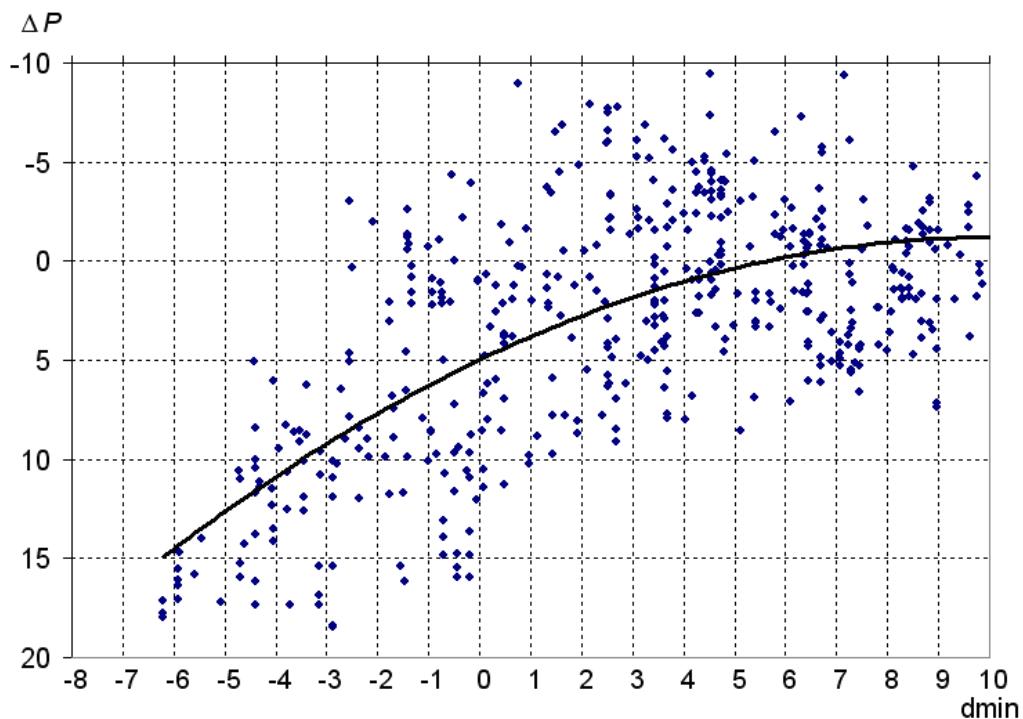


Рис. 3.5 Зависимость изменения уровня сигнала ΔP при медленном замирании относительно его медианного значения, от глубины зазора d_{\min} до наивысшей точки профиля трассы.

Поскольку при расчетах методом Окамуры-Хата влияние рельефа максимально упрощают, используя некоторые параметры, характеризующие среднюю неровность местности, для учета влияния этих факторов необходимо ввести в формулу (3.18) дополнительный коэффициент ослабления сигнала.

При автоматизации прогнозирования потерь сигнала на трассе распространения наиболее сложной задачей является учет влияния на величину ослабления реального рельефа местности [6]. В рекомендации МСЭ-526-4 [85] представлен метод расчета дополнительного затухания сигнала при распространении над неровной местностью с учетом влияния реальных препятствий. В качестве профиля трассы берется вертикальный разрез местности между заданными БС и ЭУНП со всеми высотными отметками, включая растительность и строения [6].

При построении профилей местности используется параболический масштаб и прямоугольные координаты. По оси абсцисс откладываются значения расстояний, по оси ординат - высоты. В этом случае линия, изображающая на профиле трассы условный нулевой уровень, от которого откладываются все высоты, является параболой [85, 6]:

$$y_0(R_i) = \frac{R_0^2}{2r_{cq}} k(1-k), \quad (3.26)$$

где $k=R_i/R_0$ - относительная координата заданной точки;

R_0 - расстояние между БС и МС,

R_i - расстояние до текущей точки, м;

r_{cq} - эквивалентный радиус Земли, м.

Понятие эквивалентного радиуса Земли r_{eq} вводят для приближенного учета рефракции и находят по формуле [85]:

$$r_{eq} = \frac{r_{geom}}{\left(1 + \frac{r_{geom} \cdot g}{2}\right)}, \quad (3.27)$$

где $r_{geom} = 6,37 \cdot 10^6$ - геометрический радиус Земли;

g - вертикальный градиент диэлектрической проницаемости атмосферы, 1/м.

Затухание, вносимое рельефом местности, существенно зависит от геометрии препятствий [85,6], и для его определения необходимо идеализировать форму препятствий. Используется аппроксимация остроконечной вершиной треугольника (клином) или сферой с определенным радиусом кривизны [85]. Реальные препятствия имеют большое разнообразие форм, поэтому одним из первых этапов в оценке препятствий должна быть их классификация, т. е. отнесение к первому или второму типу и во втором случае определение радиуса кривизны [6]. Чтобы классифицировать препятствие, необходимо определить его ширину, под которой понимается его протяженность, измеренная на определенном уровне и отнесенная ко всей длине трассы: $p = r_{\text{bar}}/R_0$, где r_{bar} - ширина препятствия [6].

Основная энергия сигнала передается в пределах первой зоны Френеля или минимальной области распространения [85]. Поэтому за уровень определения протяженности препятствия можно принять нижнюю границу минимальной области распространения (НГОР).

Минимальная область распространения - это условная область, представляющая собой эллипсоид вращения с фокусами в точках передачи и приема, для которого разность хода периферийных и прямого лучей равна $\lambda/6$, где λ - длина радиоволны.

Радиус поперечного сечения минимальной области распространения для i -й точки j -го участка трассы [85]:

$$H_{0ij} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot R_{0j} \cdot \lambda k_j (1 - k_j)}, \quad (3.28)$$

где $k_j = R_{ij}/R_{0j}$ - относительная координата точки на j -м участке трассы;

R_{0j} - расстояние между предполагаемыми точками передачи и приема на j -м участке трассы;

R_{ij} - расстояние до текущей точки в интервале расстояния R_{0j} , - на j -м участке трассы.

Протяженность препятствия $r_{\text{преп}}$ - это расстояние которое определяются пересечением профиля трассы с НГОР, рассматриваемой на промежуточных участках: между БС и вершиной первого препятствия, между вершинами соседних препятствий, между вершиной последнего препятствия и МС (рис. 3.6) [89].

Если между двумя соседними препятствиями относительное расстояние δ_{1-2} меньше или равно 0,05, то данные препятствия необходимо рассматривать как одно, а вершиной препятствия будет точка пересечения касательных, проведенных к этим препятствиям из точек передачи и приема соответственно [89]:

$$\delta_{1-2} = d_{1-2}/R_0, \quad (3.29)$$

где d_{1-2} - расстояние между ближайшими точками пересечения соседних препятствий с НГОР.

Если относительная протяженность препятствия меньше или равна 0,05, то препятствие можно считать клиновидным [85]. В противном случае предполагается, что препятствие широкое и его можно аппроксимировать сферой определенного радиуса.

Точки, являющиеся выборкой из профиля трассы и лежащие выше НГОР, считаются препятствиями, влияние которых должно учитываться при расчете множителя ослабления. Принцип селекции препятствий показан на рис. 3.7. Вершиной предполагаемого препятствия будет его верхняя точка. Если все точки профиля трассы лежат ниже НГОР, то полагают, что на трассе нет препятствий, существенно влияющих на распространение радиоволн, и трасса является открытой.

Для исключения препятствий, которыми можно пренебречь при расчете множителя ослабления, трассу разбивают на участки между БС и M_0 , двумя соседними препятствиями, $M-i$ и МС, где N - число предполагаемых препятствий.

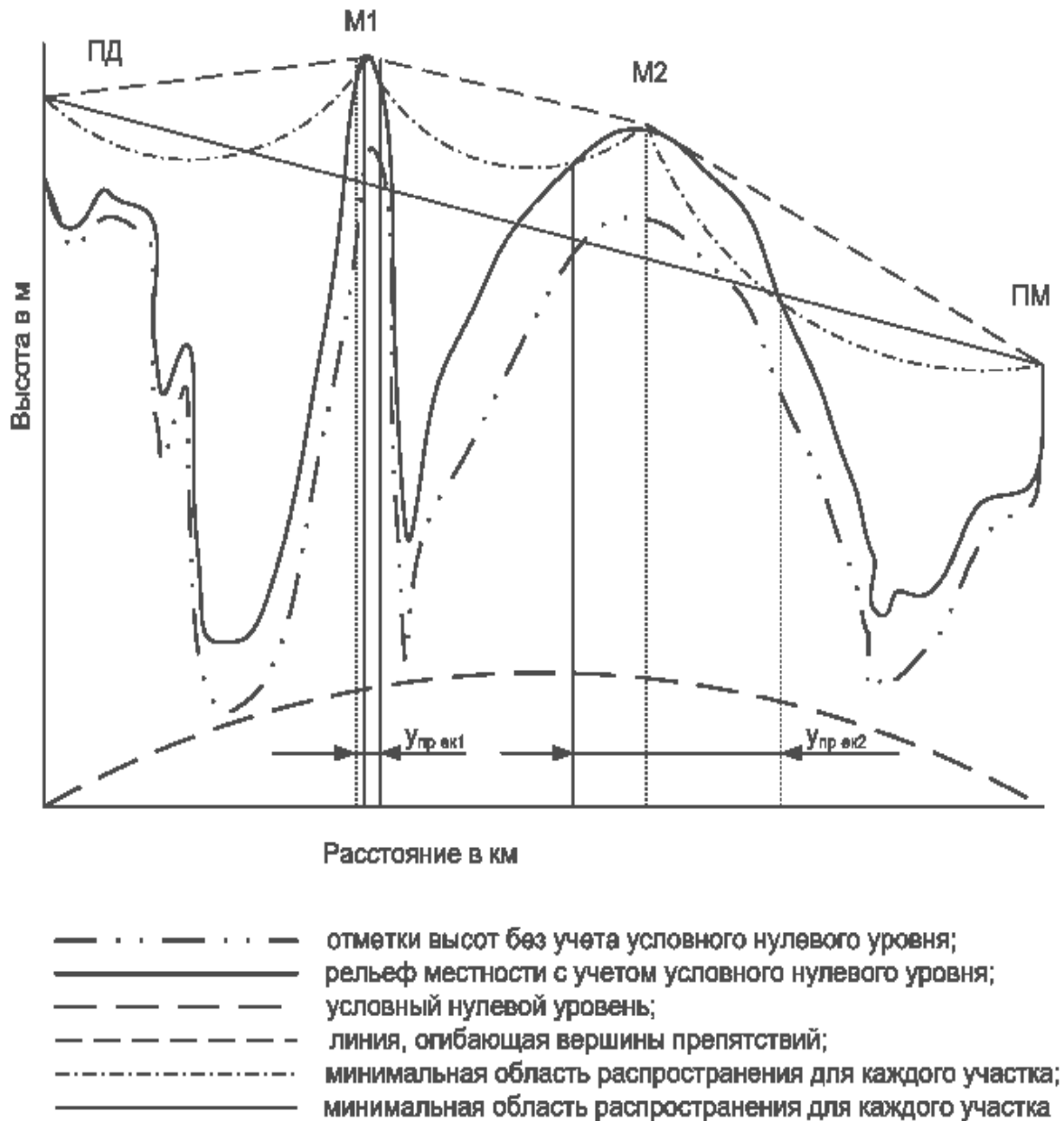


Рис. 3.6 Пересечение профиля трассы с НГОР для каждого участка.

Между БС и M_1 проводят линию НГОР и проверяют препятствие M_0 . Если M_0 не превышает эту линию, то потерями на препятствии M_0 можно пренебречь, и его исключают из рассмотрения. Тогда проводят линию между БС и M_2 и аналогично проверяют препятствие M_1 . Если препятствие M_0 превышает линию НГОР на участке БС- M_1 , то потери на нем необходимо учитывать. Передатчик переносят в точку M_0 , проводят линию НГОР между M_0 и M_2 и проверяют препятствие M_1 .

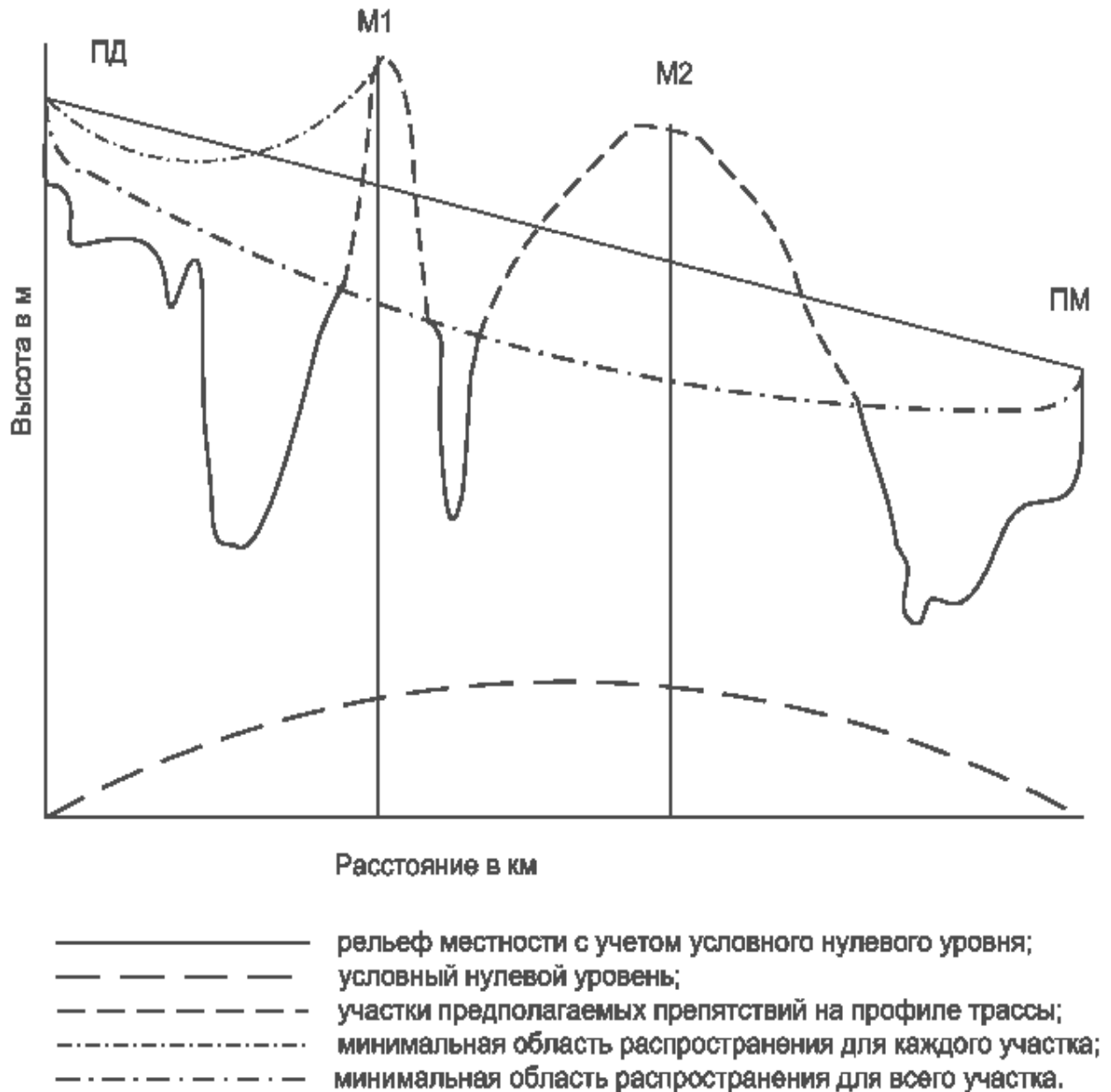


Рис. 3.7 Пересечение профиля трассы с НГОР всего участка.

Если препятствие M_0 превышает линию НГОР на участке $BC-M_1$, то потери на нем необходимо учитывать. Передатчик переносят в точку M_0 , проводят линию НГОР между M_0 и M_2 и проверяют препятствие M_1 .

Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будут исключены все препятствия, не влияющие на величину множителя ослабления.

В работе [6] предложен метод автоматизации анализа рельефа местности, состоящий из следующих этапов:

1. Ввод исходных данных (координаты БС, МС, профиль рельефа местности, высоты подвеса передающей $h_{\text{пд}}$, приемной $h_{\text{пм}}$ антенн, климатические условия).

2. Определение участков, являющихся предполагаемыми препятствиями, и вершин этих препятствий: $h_i \geq h_{\text{ПД-ПМ}i} - H_{0i}$ где h_i - высоты точек рельефа местности, $h_{\text{пд-пм}}$ - точки линии прямой видимости между БС и МС, H_{0i} - радиус минимальной области распространения в данной точке.

3. Проведение прямой линии между вершинами через одно препятствие. Если на данном участке выборка точек не превышает НГОР, то это предполагаемое препятствие можно не учитывать. Кроме того, исключаются препятствия, вносимым затуханием которых можно пренебречь. Эту процедуру повторяют до тех пор, пока не будут исключены все препятствия, влиянием которых можно пренебречь.

4. Определение условной ширины каждого из отобранных препятствий и их классификация.

5. Определение параметров препятствий, аппроксимируемых сферой (радиус аппроксимирующей сферы).

Данный метод анализа профиля трассы обеспечивает возможность проведения расчетов ослабления сигнала при распространении с учетом реального рельефа местности, однако практическая программная реализация выше приведенного метода оказывается достаточно сложной и требует больших вычислительных ресурсов при сложном профиле трассы.

3.6. Разработка гибридной модели прогнозирования ослабления сигнала при распространении

Как показано в ранее, существующие методики расчета ослабления сигнала на трассе распространения, учитывают не все факторы, оказывающие существенное влияние на уровень напряженности электромагнитного поля в

диапазоне 900 МГц, а способы учета влияния этих факторов достаточно сложны при практической реализации в виде программного обеспечения. Поэтому необходимо разработать методику, в которой будут устранены перечисленные недостатки. При разработке следует особое внимание уделять возможности автоматизации расчетного процесса. Искомая методика расчета канала радиосвязи должна содержать механизмы учета особенностей распространения радиоволн в условиях инфраструктуры железных дорог.

Прежде всего, необходимо разработать метод учёта рельефа местности. В ряде работ [113, 112] приведены результаты исследования возможности применения нейронных сетей (НС) для распознавания типа профиля рельефа местности и формирования поправки для учета дополнительного затухания сигнала. В работе [112] проведен анализ результатов применения НС для аппроксимации формулы Книфа-Эджа [85] для учета ослабления при дифракции на клине.

Предлагаемый метод автоматизации учёта рельефа местности при расчете потерь распространения радиоволн, основан на использовании НС. В качестве метода прогнозирования медианного значения потерь сигнала при распространении (рис. 3.8), используется модель Окамура-Хата, а в качестве метода прогнозирования величины МЗ сигнала предлагается использовать предварительно обученную НС.

3.6.1. Анализ возможности использования многослойного персептрона для прогнозирования величины медленного замирания сигнала

Многослойный персептрон [26] является прямонаправленной нейронной сетью, характеризующейся передачей информации от входного уровня через один или несколько дополнительных скрытых слоёв к выходному слою. В стандартной структуре многослойного персептрона каждый i -тый узел в k -том слое соединяется посредством синоптических весов W_{ij} со всеми узлами предыдущего слоя.

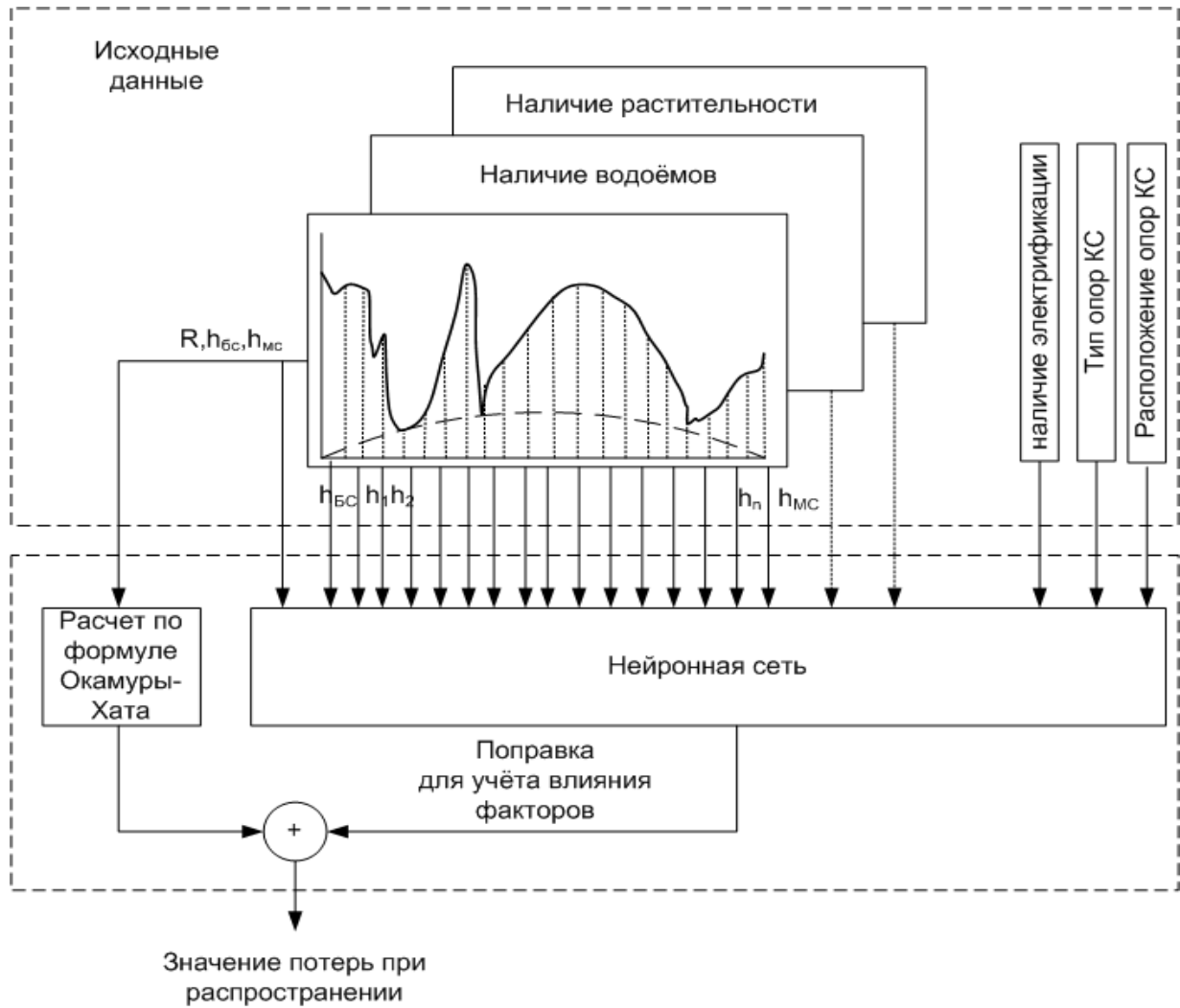


Рис. 3.8 Гибридная модель прогнозирования потерь при распространении радиоволн.

Выходные сигналы рассчитываются следующим образом:

в скрытом слое:

$$Y'_i = f\left(\sum_{j=1}^N W_{ij} x_j - \theta_j\right), \quad (3.30)$$

в выходном слое:

$$Y_i = f\left(\sum_{j=1}^N W'_{ij} Y'_j - \theta'_j\right), \quad (3.31)$$

где θ_j, θ'_j - величины смещения;

$x_j (j = 1, 2, \dots, N)$ - входные сигналы;

W_{ij}, W'_{ij} - синоптические веса;

$f\left(\sum_{j=1}^N W_{ij} x_j\right)$ - активационная функция.

Каждый слой НС рассчитывает нелинейное преобразование от линейной комбинации сигналов предыдущего слоя [43]. В качестве нелинейности в скрытых слоях чаще всего используется сигмоидальная функция или гиперболический тангенс. Многослойный персептрон может формировать на выходе произвольную многомерную функцию при соответствующем выборе количества слоев, диапазона изменения сигналов и параметров нейронов. Многослойный персептрон признан универсальным аппроксиматором функций, что подтверждено в многочисленных исследованиях [26,39,43].

Для моделирования нейронных сетей в работе использовался программный пакет Statistica Neural Networks [8], который является одним из наиболее современных по технологии и по рабочим характеристикам среди нейронно-сетевых пакетов, предлагаемых сейчас на рынке программного обеспечения. Главные преимущества этого программного пакета - это прежде всего такие возможности, как "интеллектуальный исследователь задач" – автоматизированная система построения архитектуры НС. Этот пакет включает в себя средства для создания, редактирования, обучения, оптимизации и анализа НС, а также решения разнообразных задач, среди которых и задача классификации. Модуль IPS - "интеллектуальный исследователь задач" используется на этапе конструирования нейронной сети, позволяет автоматически выбрать тип сети, архитектуру и способ обучения, рассматривая поиск лучшего варианта как оптимизационную задачу. Процесс изменения ошибки ϵ аппроксимации во время обучения НС показан на рис. 3.9.

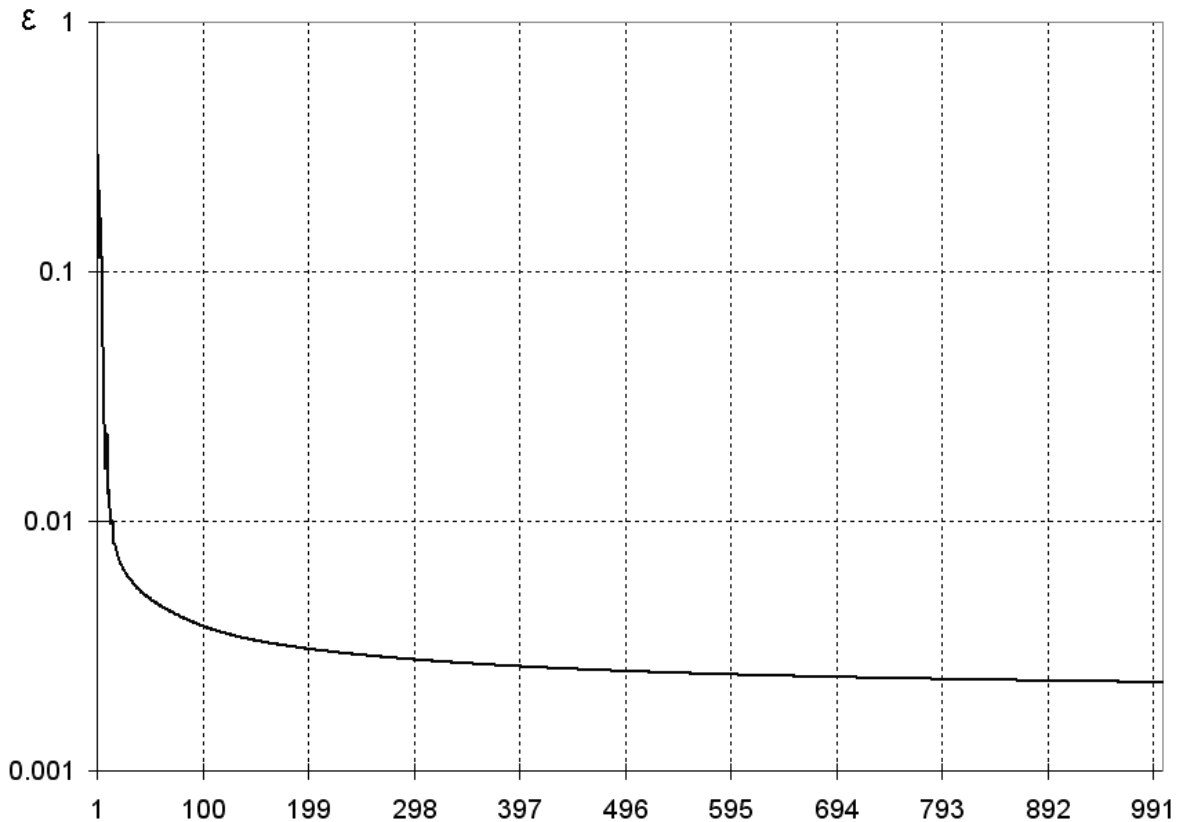


Рис. 3.9 Изменение ошибки аппроксимации ϵ во время обучения сети.

На рис. 3.10 и рис. 3.11 показаны фрагменты записи уровня сигнала и значение, спрогнозированное предложенным гибридным методом, для данных, соответственно входящих, и не входящих в обучающую последовательность.

Данный метод анализа профиля трассы позволил автоматизировать процесс учета реального рельефа, при проведении расчетов напряженности поля радиосигналов. К достоинствам описанного метода следует отнести возможность минимизации расчетов при сохранении достаточной точности конечных результатов.

На рисунке 3.17 представлены гистограммы распределения ошибки прогноза уровня сигнала методом Окамуры-Хата и предложенным гибридным методом, уменьшение среднеквадратичного значения ошибки прогноза составило 2,6 дБ.

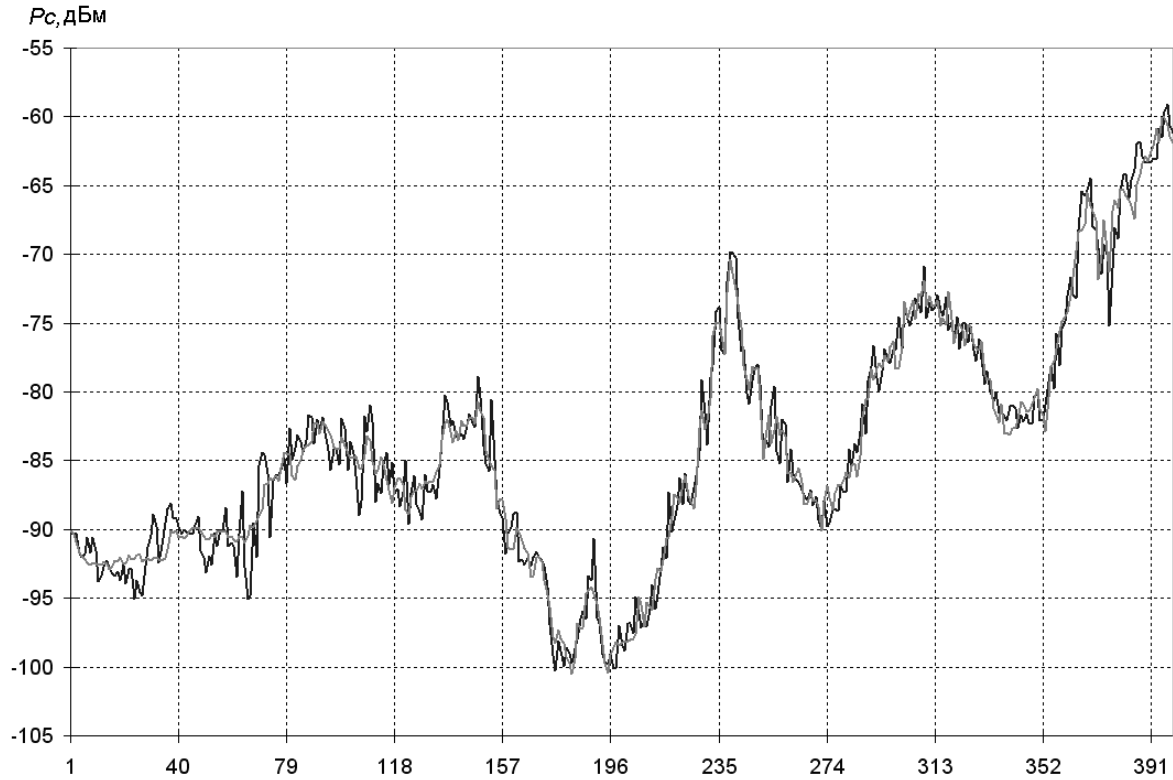


Рис. 3.10 Фрагмент записи уровня сигнала и спрогнозированное значение для данных, входящих в обучающую последовательность.



Рис. 3.11 Фрагмент записи уровня сигнала и спрогнозированное значение для данных, не входящих в обучающую последовательность.

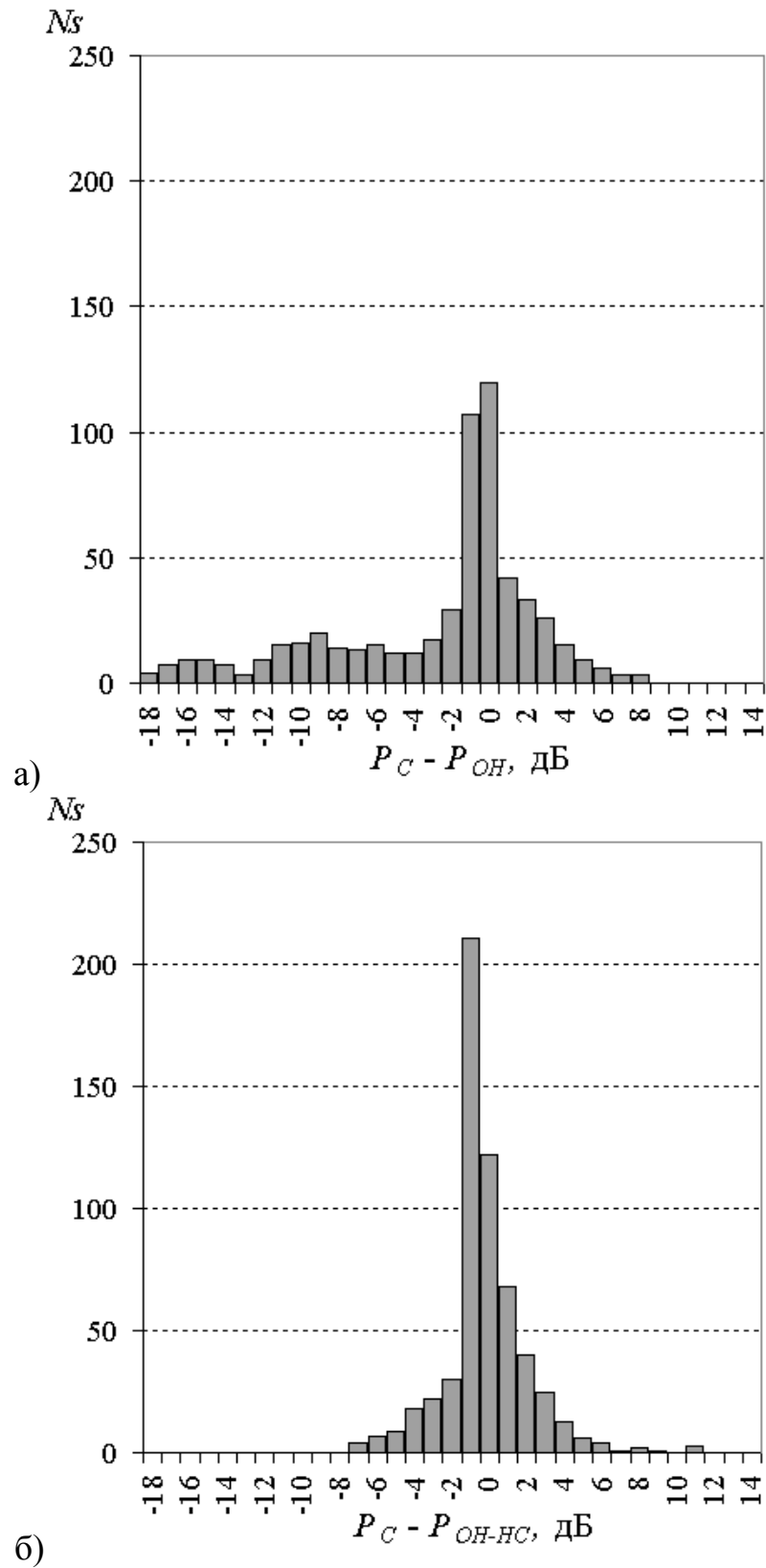


Рис. 3.12 Гистограммы распределения ошибки прогноза уровня сигнала методом Окамуры-Хата, (а) и гибридным методом (б).

3.7. Влияние погрешности прогнозирования потерь при распространении радиосигнала, на точность получаемых решений поиска расположения БС

При использовании метода Окамури-Хата, максимальная дальность радиосвязи определяется выражением:

$$R(P_{\min d}, \sigma, \rho) = 10^{\left(\frac{P_{\min d} - P_{\text{БС}} - K a_{\text{БС}} - K a_{\text{МС}} + S - K - AD - 69,55 - 26,16 \cdot \lg(f) - 13,82 \cdot \lg(h_1) - a(h_2)}{44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_1)} \right)} \quad (3.32)$$

Полученная зависимость влияния среднеквадратичного отклонения σ МЗ, на точность μ метода определения оптимальных мест установления БС, для разных уровней вероятности p_s обеспечение минимального уровня сигнала P_{\min} показана на рис. 3.13.

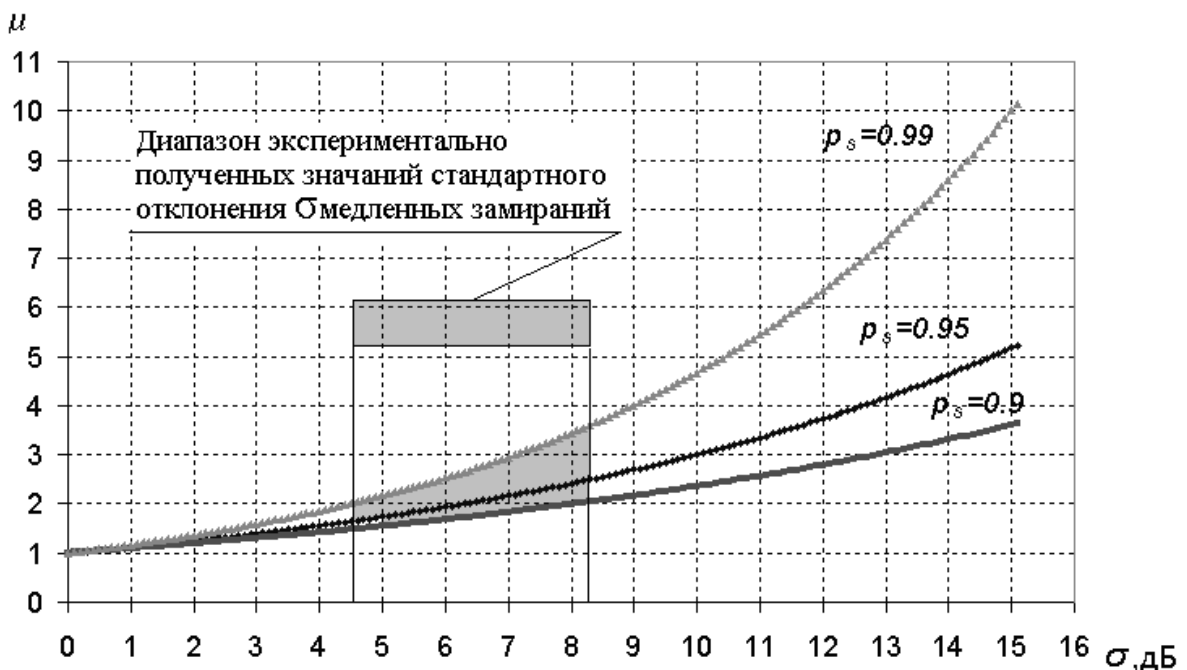


Рис. 3.13 Зависимость влияния среднеквадратичного отклонения σ МЗ, на точность получаемых решений поиска расположения БС μ .

Результаты оценки точности метода Окамуры-Хата показали, что он позволяет осуществлять расчет зон покрытия, и в большинстве случаев дает удовлетворительные результаты, однако не учитывает многих факторов, которые имеют значительное влияние на результирующий сигнал в точке

приема, и может использоваться лишь при построении начального приближения частотного – территориального плана сети стандарта GSM-R. Оценка дальности связи при высоких требованиях к вероятности обеспечения минимального уровня сигнала p_s (0.95 – 0.99), приводит к значительному (2-3 раза) увеличению количества нужных БС, которая увеличивает стоимость сети GSM-R.

В случае применения НС, для автоматизированного прогнозирования величины МЗ в зависимости от профиля рельефа местности, можно ожидать уменьшения количества необходимых БС на 30 %.

Выводы по третьему разделу

1. Выполнено экспериментальное исследование, в результате которого получены эмпирические значения статистических характеристик медленных и быстрых замираний сигнала в диапазоне частот 900 МГц в условиях инфраструктуры железных дорог, а также графики медианного значения уровня сигнала от БС вдоль железнодорожного перегона. Установлено следующее:

- влияние инфраструктуры железной дороги сильнее всего проявляется на электрифицированных участках, лежащих в открытой местности;
- закон распределения быстрых замираний сигнала, в условиях инфраструктуры железных дорог, не выше, чем в модели Релея.

2. Анализ известных статистических методов прогнозирования ослабления радиосигнала на трассе распространения показал, что наиболее пригодный в данном случае, есть известный метод Окамуры-Хата, который позволил прогнозировать медианное значение уровня сигнала с отклонением не более чем 3 дБ в 80% случаев.

3. Получено аналитическое выражение зависимости ожидаемого количества необходимых БС сети GSM-R, на основе которого разработан метод оценки влияния погрешности прогнозирования потерь при

распространении радиосигнала, на точность получаемых решений. Это позволило провести анализ влияния погрешности прогнозирования ослабления радиосигнала на трассе распространения на эффективность ЧТП сетей подвижной радиосвязи с нерегулярной сотовой структурой и линейной формой зон обслуживания.

4. Результаты оценки погрешности прогнозирования ослабления радиосигнала на трассе распространения методом Окамуры-Хата показали, что в большинстве случаев даёт хорошие результаты, однако не учитывает многих факторов, оказывающих существенное влияние на результирующий сигнал в точке приема, и может использоваться лишь при построении начального приближения сети стандарта GSM-R. Погрешность прогнозирования ослабления радиосигнала на трассе распространения, при высоких требованиях к вероятности ($0,95 \div 0,99$) обеспечения минимального уровня сигнала, приводит к значительному (2-3 раза) увеличению количества необходимых БС.

5. Предложен способ увеличения точности прогноза метода Окамуры-Хата, введением дополнительных экспериментально определенных коэффициентов ослабления сигнала, для учета влияния инфраструктуры железной дороги.

6. На основе экспериментальных данных, показана значительная корреляция между величиной медленных замираний и особенностью профиля рельефа между БС и МС. Сделан вывод о возможности увеличения точности прогнозирования ослабления сигнала при распространении, за счет частичного прогнозирования величины МЗ, которое становится возможным при использованные цифровых карт рельефа местности. В работе экспериментально показана возможность применения нейронной сети для автоматизированного прогнозирования величины МЗ в зависимости от профиля рельефа местности. Полученные результаты показали уменьшение среднеквадратичного отклонения МЗ сигнала с 5,8 до 3,6 дБ, что уменьшает ожидаемое количество необходимых БС на 30 %.

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ГРУПП ЧАСТОТНЫХ ПРИСВОЕНИЙ СОТАМ СЕТИ ЖТР СТАНДАРТА GSM-R ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС

4.1. Классификация технических характеристик, влияющих на электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств

В условиях постоянно возрастающей потребности в радиочастотном ресурсе особо актуальной становится задача высокоэффективного распределения частот при обеспечении внутрисистемной и межсистемной ЭМС РЭС [12].

Радиосети ЖТР строившиеся в диапазонах частот не выше 330 МГц, проектировались по соответствующим правилам и рекомендациям [36,37,67]. В диссертационной работе анализируются способы обеспечения ЭМС РЭС, проектируемых по этим документам.

Поскольку сети ЖТР строятся по линейному принципу, обеспечене ЭМС в сетях ЖТР требует применения специальных методов, способных учитывать особенности их построения [49]. БС сети GSM-R устанавливаются вдоль железнодорожного участка, эта особенность построения сети не позволяет использовать принцип регулярной кластерной структуры, применяемый в сотовых сетях общего пользования. Более того, методы формирования групп частотных присвоений, применяемые в сотовых сетях общего пользования, решают задачу распределения частот, при котором среднестатистическое значение помех по основному и соседнему каналу приема минимально. Однако в этом случае имеют место области с заниженным, относительно минимального значения, соотношения сигнал/помеха, что недопустимо в сетях ЖТР.

Разработка метода обеспечения внутрисистемной ЭМС РЭС проектируемой сети является одной из основных задач настоящей главы диссертационной работы.

Обеспечение ЭМС РЭС является сложной многопараметрической задачей, до сих пор не имеющей универсального формализованного решения [73]. Особенность этой задачи заключается в большом количестве факторов, влияющих на качество ее решения, а также в недостаточной изученности взаимного влияния отдельных видов РЭС.

Основными группами внеполосных радиоизлучений являются [10]: излучения на гармониках и субгармониках, комбинационное и интермодуляционное излучения. Причина появления этих сигналов - способ формирования сетки рабочих частот и нелинейные явления в трактах передатчика.

Приемник характеризуется как основным каналом приема [10,64], так и побочными каналами на промежуточных, зеркальных, комбинационных частотах. Из-за воздействия мешающих сигналов по основному и побочным каналам приема возникают нелинейные явления, такие как блокирование, перекрестные искажения, интермодуляция. Степень защищенности полезного сигнала от влияния мешающих сигналов оценивается с помощью избирательности приемника по соответствующему каналу приема.

Для выполнения условий обеспечения внутрисистемной ЭМС сети GSM-R, согласно [1,3,88,106] необходимо учитывать:

1. Помехи по основному каналу, возникающие при воздействии на приемный тракт сигналов с одинаковыми частотами от разных источников (С/По);
2. Помехи по соседнему каналу, возникающие при воздействии на приемный тракт сигналов с частотами каналов, являющихся соседними с основным (С/Пс);
3. Интермодуляционные помехи.

4.2. Экспериментально - теоретическое исследование влияния внутрисистемных помех на качество функционирования сети GSM-R

4.2.1. Постановка задачи исследования

Частотное планирование сети GSM-R заключается в назначении частотных присвоений БС, при которых обеспечивается ЭМС. Критерием оптимальности частотного планирования является использование минимального частотного ресурса при обеспечении ЭМС. Для выполнения частотного планирования с заданным качеством необходимо определить минимально-допустимое соотношение сигнал/помеха по основному и соседнему каналам, при котором обеспечивается необходимое качество связи. В свою очередь качество передачи речи, согласно [2], в сети GSM-R зависит от типа применяемого речевого кодека и процента битовых ошибок в радиоканале.

4.2.2. Теоретическое исследование влияния помех по основному и соседнему каналам

Для грубой оценки вероятности ошибки GMSK (BT=0.3) сигнала в канале связи без замираний при некогерентном приёме можно использовать выражение, полученное в работе [100]:

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(0,949\sqrt{C/P_o}), \quad (4.1)$$

График зависимости $P_{\text{ош}}$ от соотношения C/P_o выраженного в дБ представлен на рисунке 4.1

В реальных условиях работы, канал радиосвязи подвержен замираниям [102], поэтому уровень сигнала и уровень помехи является случайными величинами, соотношение сигнал/помеха C/P_o также будет являться случайной величиной. Используя метод прогнозирования уровня сигнала на входе приёмника, можно рассчитать медианное значения уровня полезного сигнала m_d и внутрисистемной помехи (т.е. уровень сигнала от другой БС). В

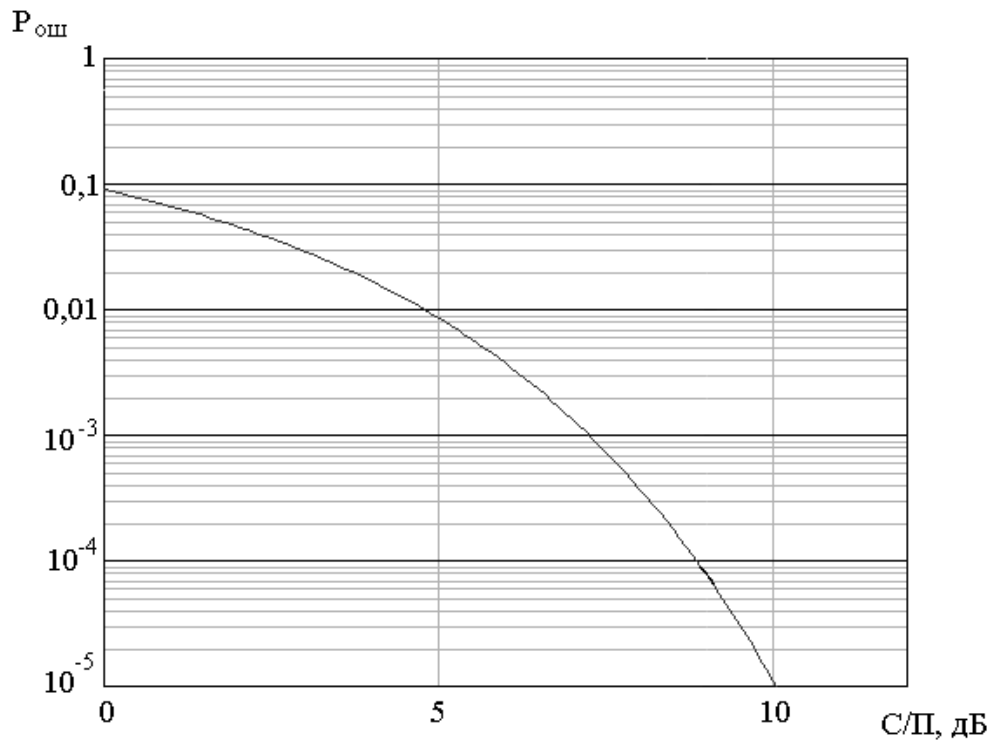


Рис. 4.1 Зависимость вероятности ошибки GMSK (BT=0.3) сигнала в канале связи без замираний при некогерентном приёме [100].

разделе 3 были исследованы основные статистические характеристики МЗ и БЗ в диапазоне частот 900 МГц в условиях инфраструктуры железных дорог.

Согласно [102], а также результатов проведенного экспериментального исследования, МЗ сигнала, выраженного в дБм, имеют нормальный закон распределения:

$$P(\bar{s}_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(\bar{s}_d - m_d)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4.2)$$

где m_d – среднее значение мощности полезного сигнала, дБм

σ – среднеквадратичное отклонение, дБм.

Как показано в третьем разделе, БЗ имеют распределение, близкое к распределению Релея:

$$P(s/\bar{s}) = \frac{\pi \cdot s}{2\bar{s}^2} \exp\left[-\frac{\pi \cdot s^2}{4\bar{s}^2}\right]. \quad (4.3)$$

В реальном радиоканале величина s является случайной величиной, и будет иметь распределения по закону композиции законов распределения МЗ и БЗ:

$$P(s) = \int_{-\infty}^{\infty} P(s/\bar{s}_d) d\bar{s}_d = \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s}{s^{-2}} \exp\left[-\frac{\pi s^2}{4s^{-2}}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\bar{s}_d - m_d)^2}{2\sigma^2}\right] d\bar{s}_d \quad (4.4)$$

Выполнив замену s на $10^{\text{sd}/20}$ ($s_d = 20\log_{10}(s)$) получим:

$$P(s) = \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s}{10^{\bar{s}_d/10}} \exp\left[-\frac{\pi \cdot s^2}{4 \cdot 10^{\bar{s}_d/10}}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\bar{s}_d - m_d)^2}{2\sigma^2}\right] d\bar{s}_d \quad (4.5)$$

Вероятность что $s_1 \leq rs_2$:

$$P(s_1 \leq rs_2) = \int_0^{\infty} P(s_1 = x) \cdot P\left(s_2 \geq \frac{x}{r}\right) dx, \quad (4.6)$$

где r – величина защитного интервала, при котором вероятность ошибки в канале связи не превышает максимально допустимую.

Первый элемент подынтегрального произведения:

$$P(s_1 = x) = \sqrt{\frac{\pi}{8\sigma_1^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x}{10^{(\bar{s}_{d1})/10}} \cdot \exp\left[-\frac{\pi \cdot x^2}{4 \cdot 10^{(\bar{s}_{d1})/10}}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\bar{s}_{d1} - m_{d1})^2}{2\sigma_1^2}\right] d\bar{s}_{d1}. \quad (4.7)$$

Второй элемент подынтегрального произведения:

$$P\left(s_2 \geq \frac{x}{r}\right) = \sqrt{\frac{\pi}{8\delta_2^2}} \int_{x/r}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s}{10^{(\bar{s}_{d2})/10}} \cdot \exp\left[-\frac{\pi \cdot s^2}{4 \cdot 10^{(\bar{s}_{d2})/10}}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\bar{s}_{d2} - m_{d2})^2}{2\delta_2^2}\right] d\bar{s}_{d2} ds. \quad (4.8)$$

Подставив выражения (4.7) и (4.8) в (4.6) получим:

$$P(s_1 \leq rs_2) = \frac{\pi}{8\delta_1\delta_2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x}{10^{(\bar{s}_{d1})/10}} \cdot \exp\left[-\frac{\pi \cdot x^2}{4 \cdot 10^{(\bar{s}_{d1})/10}}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\bar{s}_{d1} - m_{d1})^2}{2\delta_1^2}\right] d\bar{s}_{d1} \right] \cdot \left[\int_{x/r}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s}{10^{(\bar{s}_{d2})/10}} \exp\left[-\frac{\pi \cdot s^2}{4 \cdot 10^{(\bar{s}_{d2})/10}}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\bar{s}_{d2} - m_{d2})^2}{2\delta_2^2}\right] d\bar{s}_{d2} ds \right] dx \quad (4.9)$$

На рис. 4.2 представлены графики распределение вероятности превышения отношения сигнал/помеха в канале с замираниями при величине защитного интервала $r = 0$ дБ.

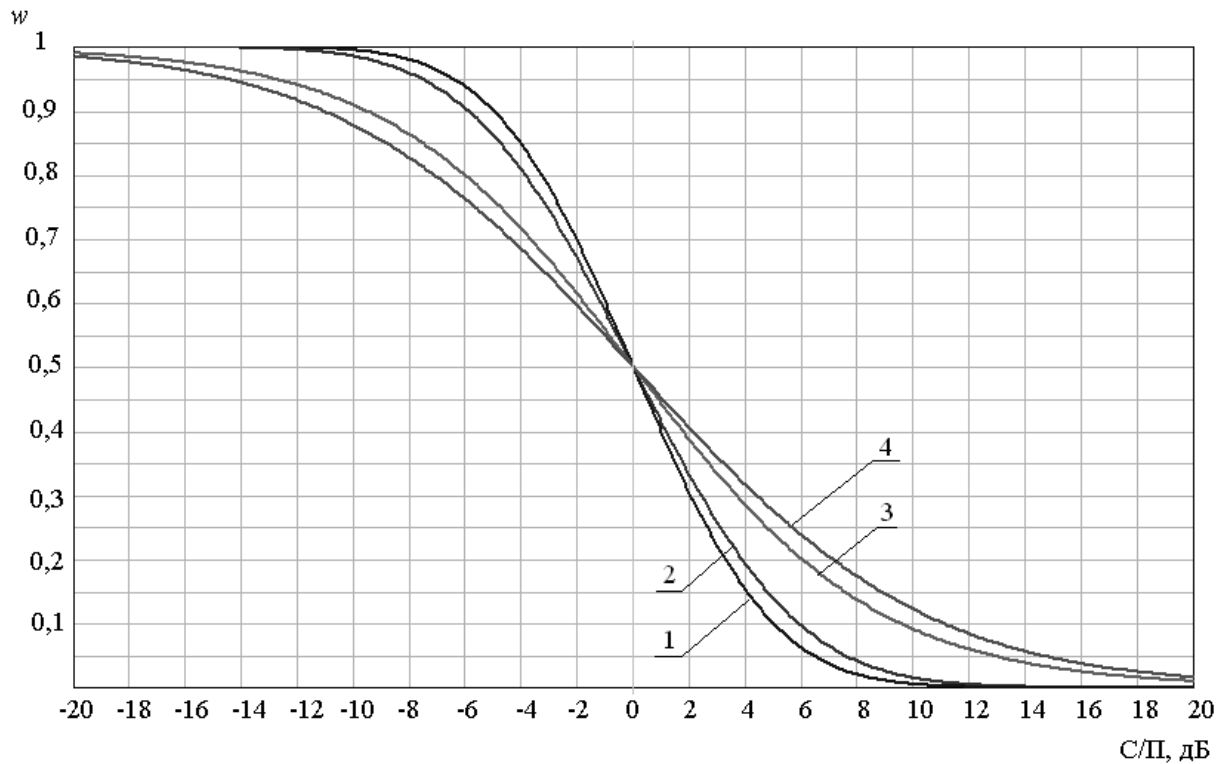


Рис. 4.2 Интегральное распределение вероятности превышения отношения сигнал/помеха в канале с замираниями:

- 1 - с учетом МЗ при $\sigma = 5,8$ дБ;
- 2 - с учетом МЗ при $\sigma = 8,3$ дБ;
- 3 - с учетом БЗ Релея и МЗ при $\sigma = 5,8$ дБ;
- 4 - с учетом БЗ Релея и МЗ при $\sigma = 8,3$ дБ.

На рис. 4.3 представлено интегральное распределение вероятности непревышения заданного процента битовых ошибок $P_{\text{ош}}$ в канале с МЗ, на рис. 4.4 - МЗ и БЗ Релея.

Следует учесть, что полученные зависимости получены без учета влияния адаптивного эквалайзера, разнесенного приёма, перемежения и многих других методов, применяемых для улучшения качества приёма в стандарте GSM [86,46]. Для получения точных оценок необходимо построить математическую модель, описывающую работу радиоканала и приемопередающих устройств GSM, либо получить статистические данные методом имитационного моделирования или измерениями в реальных условиях.

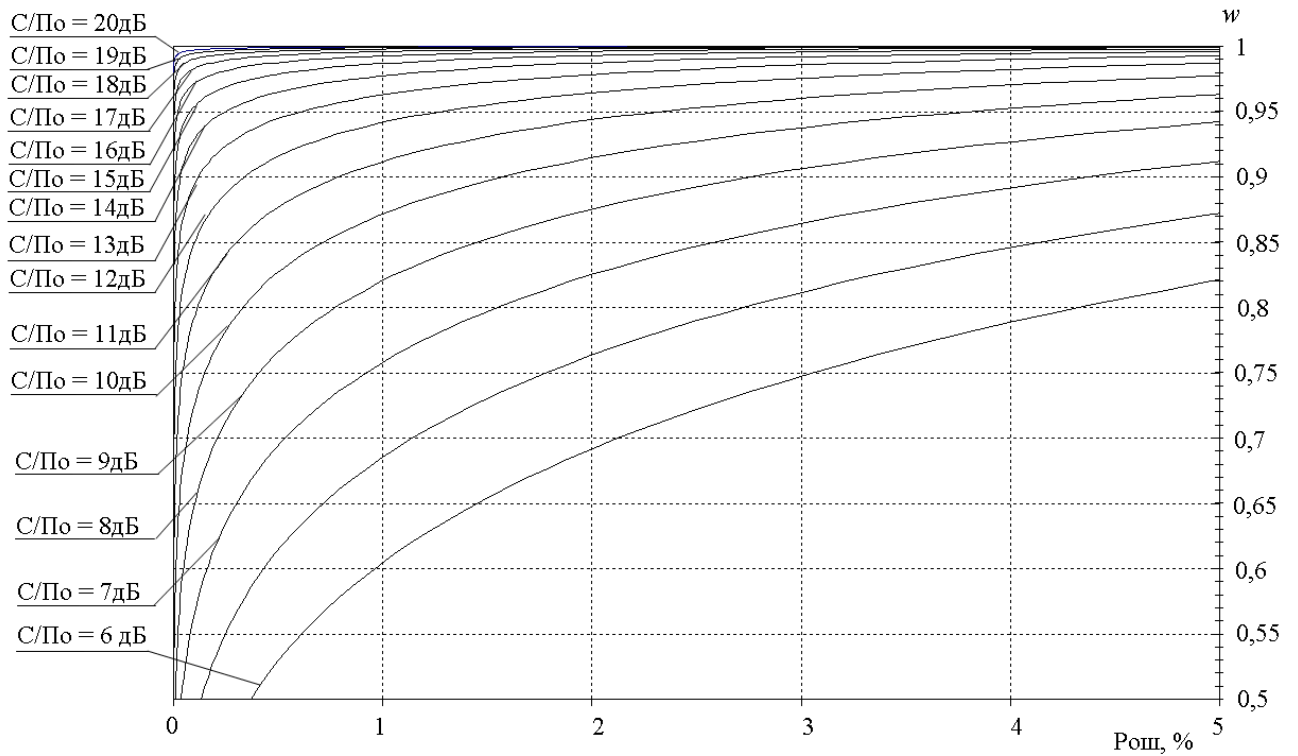


Рис. 4.3 Интегральное распределение вероятности не превышения процента битовых ошибок в канале с медленными замираниями $\sigma = 8.3$.

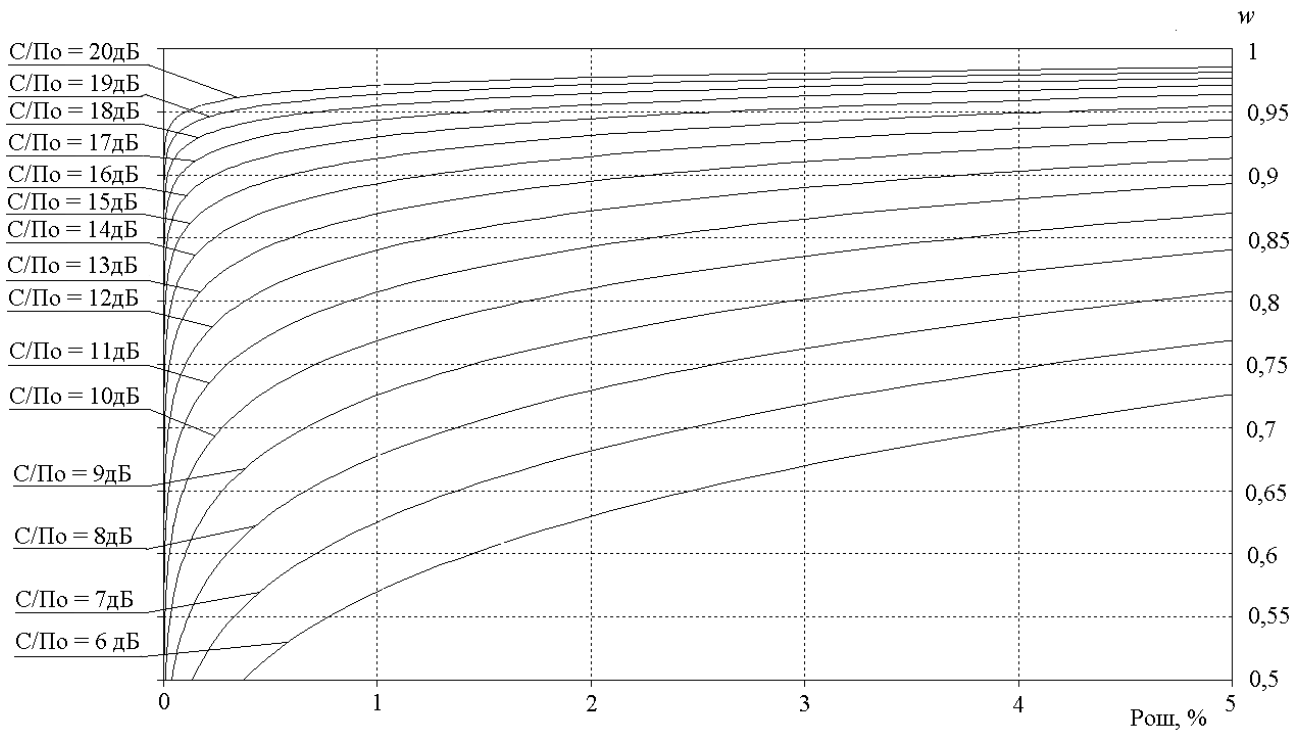


Рис. 4.4 Интегральное распределение вероятности не превышения процента битовых ошибок в канале с медленными замираниями ($\sigma = 8.3$) и быстрыми замираниями Релея.

Трудность теоретического определения зависимости процента битовых ошибок от соотношения сигнал/помеха по основному и соседнему каналу также заключается в невозможности учёта всех факторов, реальная вероятность ошибок зависит также от схемотехнических решений, применённых в приёмном тракте мобильных терминалов и БС, условий работы радиоканала. Поэтому было решено установить экспериментально основные зависимости между вероятностью битовых ошибок и соотношением сигнал/помеха по основному каналу приема.

4.2.3. Экспериментальное исследование влияния соотношения сигнал/помеха по основному каналу приема, на уровень битовых ошибок в радиоканале

Было выполнено экспериментальное исследование в реальных условиях для установления минимального соотношения сигнал-интерференция при заданном качестве на основе статистических данных. Для проведения измерений использовался специализированный измерительный комплекс TEMS производства компании Ericsson и NetTek Y400 Analyzer производства компании Tektronix. Результаты измерений сведены в трёхмерную гистограмму представленную на рис. 4.5. Где V_p – процент ошибочно принятых бит в тестовой последовательности, C/P_o – соотношение рассчитанного уровня сигнал/помеха по основному каналу приёма, выраженное в дБ.

На рис. 4.6 представлены аппроксимированные кривые интегрального распределения вероятности распределения процента битовых ошибок в принятой тестовой последовательности от соотношения сигнал – помеха. Полученные плотности распределения на отрезке 6-20 дБ хорошо аппроксимируется гамма-распределением.

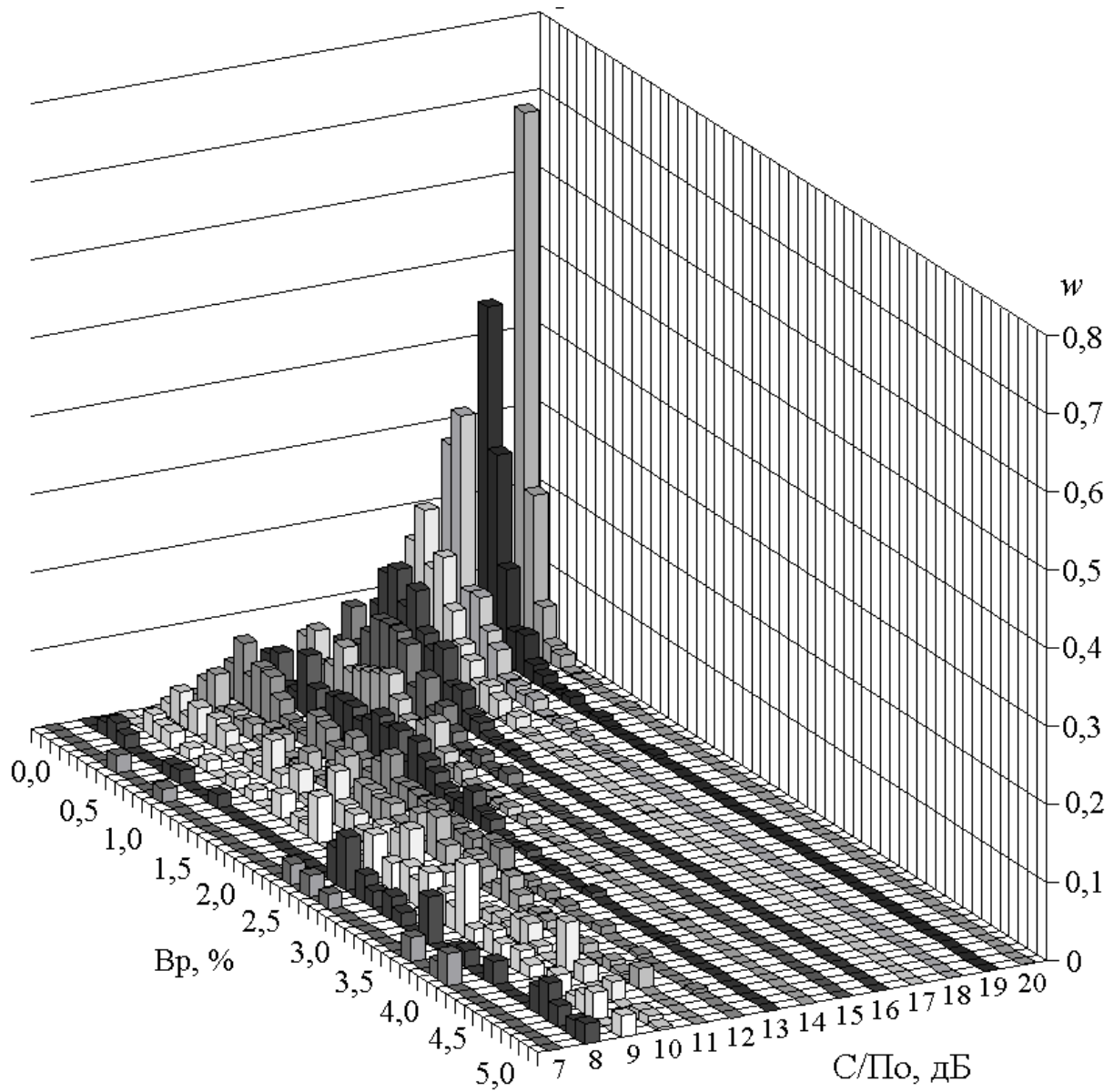


Рис. 4.5 Гистограммы распределения процента битовых ошибок $Вр$ в принятой тестовой последовательности от соотношения сигнал/помеха по основному каналу приема $С/По$ (гистограммы 7,8,9,10,11 показаны частично).

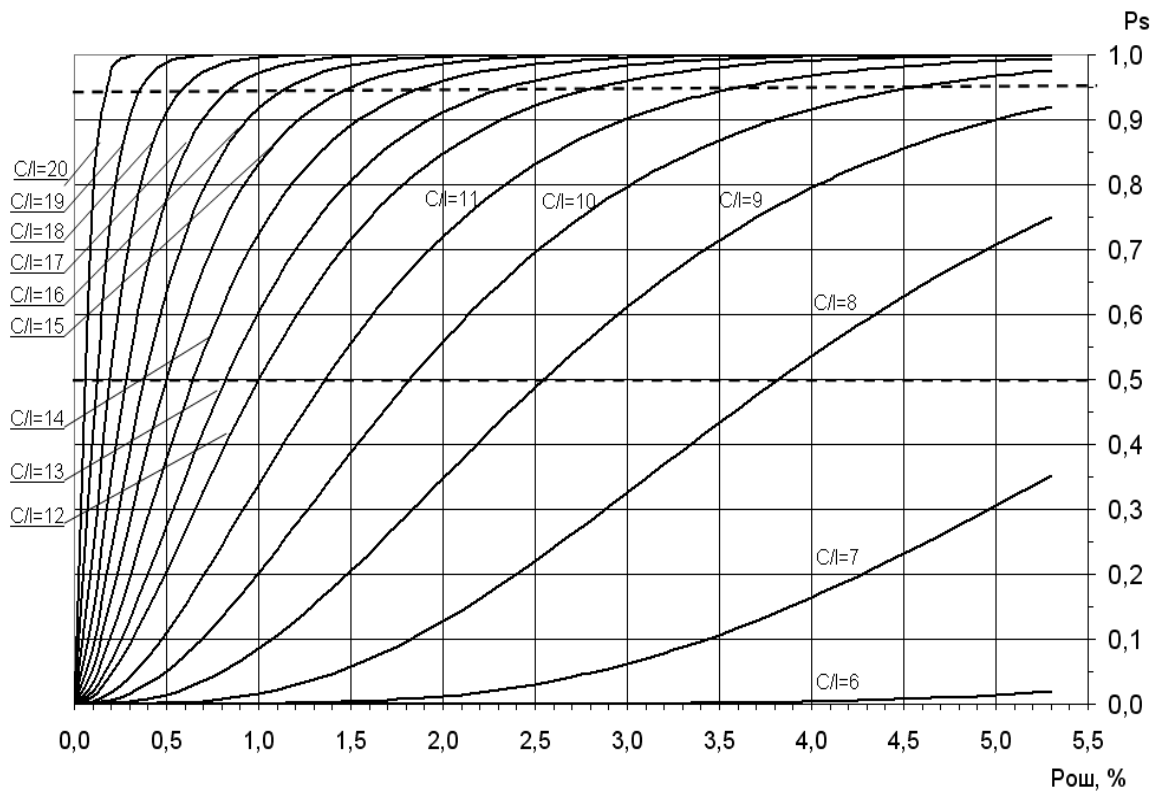


Рис. 4.6 Кривые аппроксимации интегрального распределения вероятности не превышения заданного процента битовых ошибок.

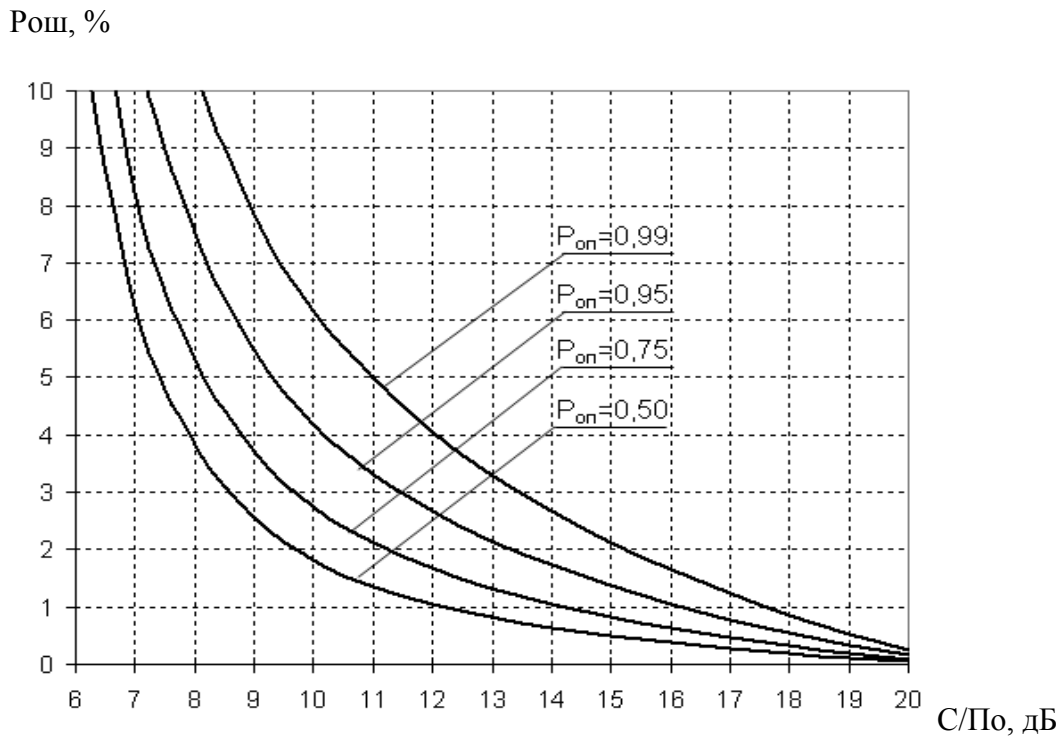


Рис. 4.7 Зависимость процента ошибочно принятых бит от соотношения сигнал/помеха при заданном уровне вероятности $P_{он}$.

4.2.4. Исследование влияния помех по соседнему каналу приема

Причиной возникновения помех по соседнему каналу составляют два фактора:

- побочные излучения передатчика;
- неидеальность устройств селекции приемного устройства.

В документе [106] для сети GSM, установлено следующее значение минимально-допустимого значения сигнал/помеха на входе приемника равное -9 дБ.

Экспериментально полученные данные представлены на рис. 4.8.

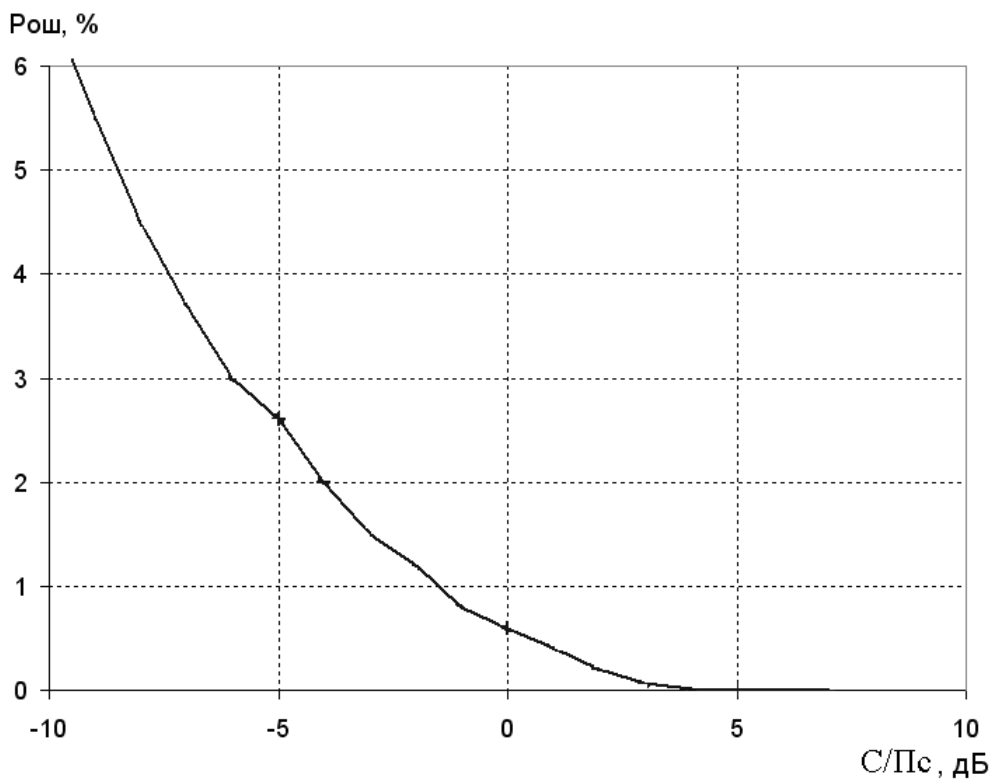


Рис. 4.8 Зависимость процента ошибочно принятых бит $P_{ош}$ от соотношения сигнал/помеха по соседнему каналу приема C/P_c .

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

Для оценки минимально допустимого значения сигнал/помеха по соседнему каналу можно воспользоваться результатами, опубликованными в работе [20]. Результаты этого исследования представлены на рис. 2.4.

В разделе 1 были определены основные требования к качеству передачи речи, критерий – слоговая разборчивость, для систем ЖТР – не менее 80%. Задавшись уровнями вероятности 0.99, 0.95, 0.5, были построены графики зависимости слоговой разборчивости речи S от соотношения сигнал/помеха (рис. 4.9), по которому определено минимально допустимое соотношение S/P_0 по основному каналу – 10, 14, 16 дБ соответственно.

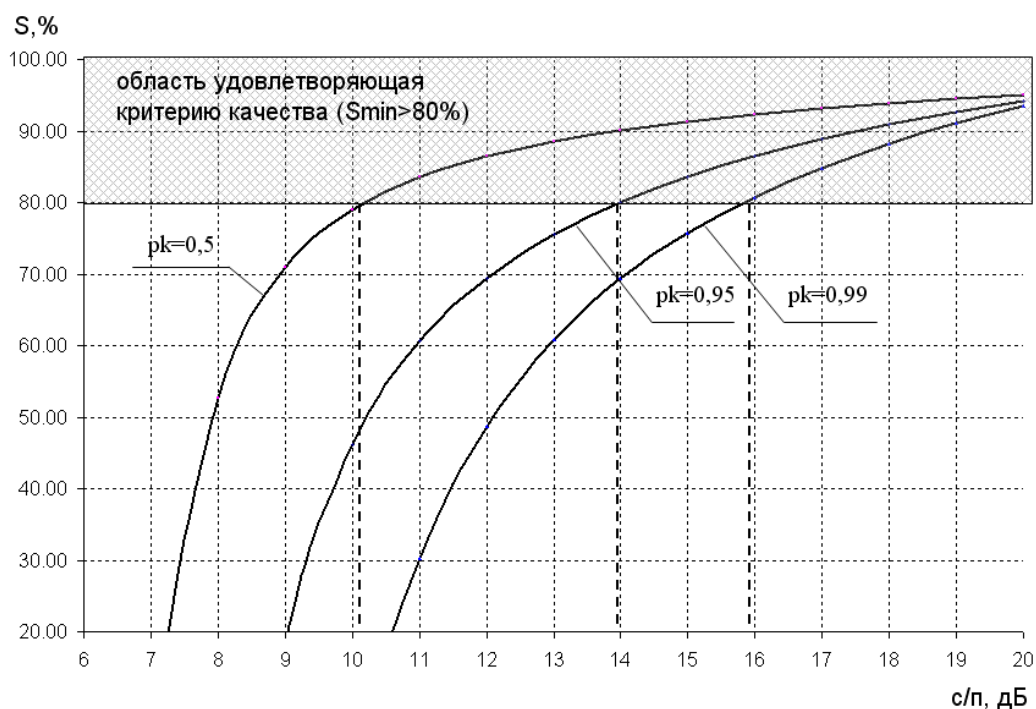


Рис. 4.9 Зависимость слоговой разборчивости, при использовании полноскоростного кодирования, от соотношения сигнал – помеха по основному каналу приема.

Для системы связи на основе стандарта GSM-R эта величина составила 14 дБ при уровне вероятности (обеспечения слоговой разборчивости S не ниже 80%) – 0,95. И, 10 дБ при уровне вероятности (обеспечения слоговой разборчивости не ниже 80%) – 0,5 (Минимально – допустимая величина по спецификации GSM – 9дБ [106], по рекомендациям фирмы Ericsson – 12 дБ [95]).

С учетом требования обеспечения минимально-допустимого уровня сигнала в зоне обслуживания -95 дБм [88], максимально допустимый

расчетный уровень помехи по основному каналу не должен превышать -109 дБм.

4.3. Разработка автоматизированного метода оптимального присвоения частот сети ЖТР стандарта GSM-R

Задача распределения каналов относится к математическим задачам, связанным с раскраской графов [62,66]. Из теории [33] известно, что время необходимое для нахождения решения, экспоненциально увеличивается с увеличением размерности задачи (с ростом числа БС), задача *NP*-сложная.

Многообразие задач присвоения частот и требований к ним не позволяет разработать универсальный метод присвоения частот, так как многие известные методы обладают ограничениями либо по размерности задачи, либо по точности получаемых результатов. Для разработки практически пригодных методов необходим учет особенностей постановки задач для различных случаев и поиск рациональных алгоритмов оптимизации, приемлемых по быстродействию и точности [70]. Поэтому актуальной становится оценка возможности применения различных алгоритмов оптимального присвоения частот при различных условиях для разработки методов частотного планирования, пригодных для реализации [62].

Используя найденные значения C/P_0 и C/P_c , можно записать матрицу влияний по основному каналу приема:

$$Cz_0(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } (Ps_{(i,j)} \geq P_{\min d} + P_{C/P_0}) \wedge (Pd_{(i,j)} \geq P_{\min s} + P_{C/P_0}); \\ 0, & \text{если } (Ps_{(i,j)} < P_{\min d} + P_{C/P_0}) \vee (Pd_{(i,j)} < P_{\min s} + P_{C/P_0}). \end{cases} \quad (4.10)$$

И матрица влияний по соседнему каналу приема:

$$Cz_1(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } (Ps_{(i,j)} \geq P_{\min d} + P_{C/P_c}) \wedge (Pd_{(i,j)} \geq P_{\min s} + P_{C/P_c}); \\ 0, & \text{если } (Ps_{(i,j)} < P_{\min d} + P_{C/P_c}) \vee (Pd_{(i,j)} < P_{\min s} + P_{C/P_c}). \end{cases} \quad (4.11)$$

Используя матрицы Cv , Cz_0 и Cz_1 , матрицу внутрисистемной ЭМС Cs можно получить следующим образом:

$$Cs(q, l) = \begin{cases} 0, & \text{если } \forall d_i \in \{D_{\text{III}} \mid Cv(q, i) = 1\}, (Cz_0(l, i) = 0) \wedge (Cz_1(l, i) = 0); \\ 1, & \text{если } \exists d_i \in \{D_{\text{III}} \mid Cv(q, i) = 1\}, (Cz_0(l, i) = 1) \wedge (Cz_1(l, i) = 0); \\ 2, & \text{если } \exists d_i \in \{D_{\text{III}} \mid Cv(q, i) = 1\}, (Cz_0(l, i) = 1) \wedge (Cz_1(l, i) = 1); \\ 3, & \text{если } q = l. \end{cases} \quad (4.12)$$

Представленная модель (рисунок 4.10) использует ненаправленный взвешенный граф, матрицей связности которого является Cs . Каждая вершина графа соответствует одной радиосоте. Две вершины соединены ребром, если возможно возникновение мешающего влияния. В данной модели каждому ребру соответствует число, представляющее собой минимальный разнос по частоте (или количеству каналов), т.е. граф является взвешенным.

В матричной форме, матрица ЭМС фрагмента сети представленного на рисунке 4.10, будет иметь следующую запись:

$$Cs = \begin{pmatrix} 3 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 3 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 3 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 3 \end{pmatrix}. \quad (4.13)$$

Точные алгоритмы обеспечивают минимизацию числа используемых частотных каналов, но имеют низкое быстродействие, не позволяющее даже на современных ЭВМ производить частотное планирование при количестве радиосот более 20 [74,65]. Приближенные алгоритмы не гарантируют достижения минимума числа используемых частот, но имеют существенно большее быстродействие, позволяющее планировать частотные присвоения для большого числа радиосот (до 1000 и более) [74,65].

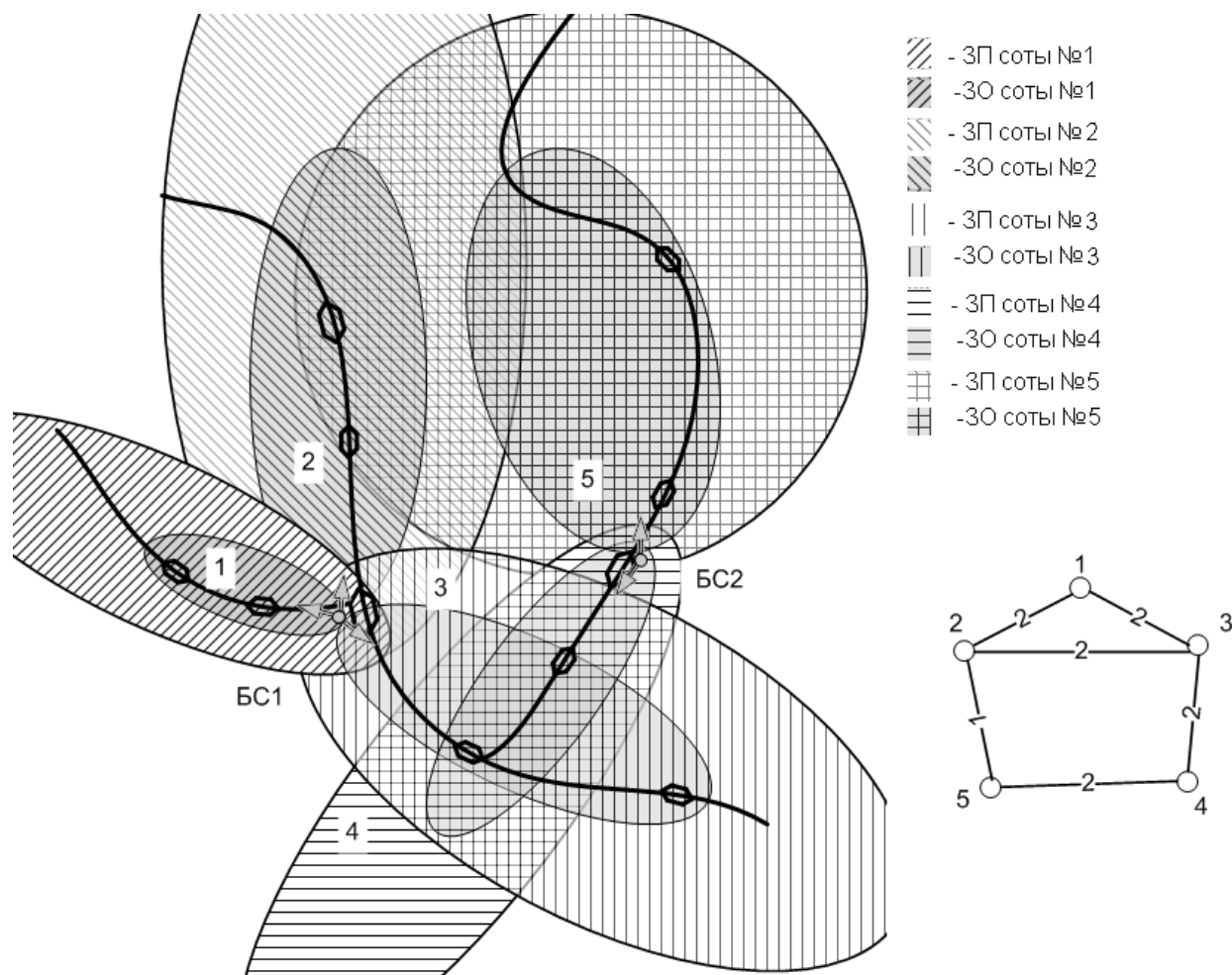


Рис. 4.10 Участок сети GSM – R с эллиптическими сотами и соответствующий ему граф ЭМС.

4.3.1. Краткий обзор существующих методов формирования групп частотных присвоений для радиосетей, использующих принцип повторного использования частот

Методы решения задачи присвоения частот с помощью приближенных алгоритмов можно разбить на несколько категорий [66,62,75]:

1. Метод регулярной кластерной структуры. Группа сот с различными наборами частотных каналов получила название кластера (рис. 4.11). Определяющим параметром кластера является количество частот используемых в соседних сотах. Размерность кластера может варьироваться

от 3 до 19 . Во всех случаях расположение частот кластере должно допускать простое каскадирование, т. е. формирование регулярной структуры.

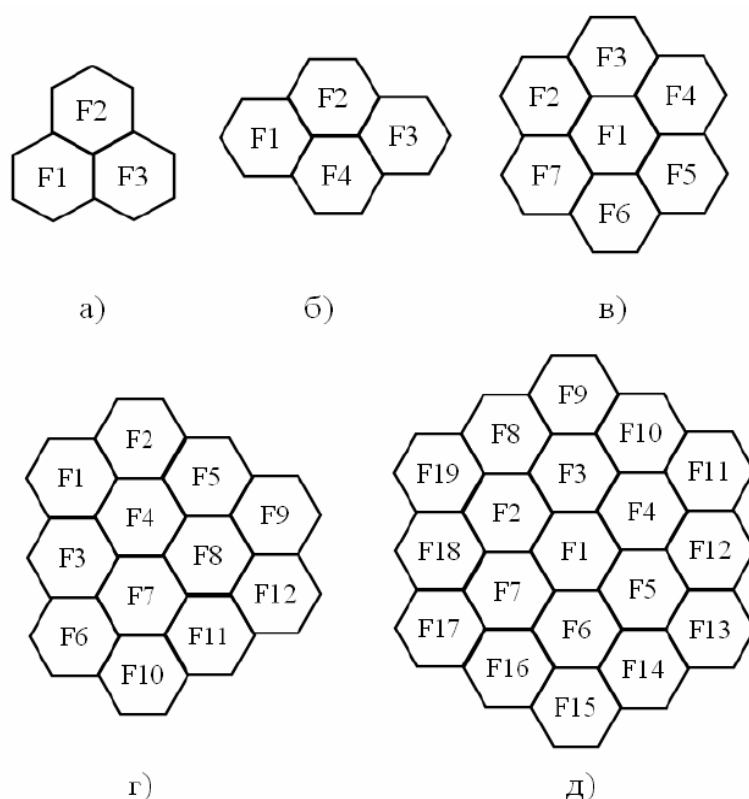


Рис. 4.11 Построение многоэлементных кластеров:

- а) 3-элементного;
- б) 4-элементного;
- в) 7-элементного;
- г) 12-элементного;
- д) 19-элементного.

2. Эвристические методы. Задача формирования групп частотных присвоений тесно связана с задачей раскраски взвешенного графа минимальным числом цветов [33,66], для которой разработано множество различных эвристических методов поиска решения, например различные модификации «жадных» эвристик [73,87].

3. Методы присвоения частот основанные на использовании искусственных НС. В работе [99] впервые предложено использовать модель

НС Хопфилда для решения задачи распределения каналов в сотовой радиосети. В этой работе рассмотрены ограничения из-за помех по соседнему каналу и установлен предел для ограничения по расстоянию минимального разнесения между двумя любыми частотами, присваиваемыми i - и ячейке $c_{ij} = 2$. Однако, модель предложенная в [99] имеет несколько недостатков. Прежде всего, он использует "медленную" сигмоидальную активационную функцию. Кроме этого, в используемой функции энергии не учитываются особенности решаемой задачи.

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

«Жадные» алгоритмы [63] являются интуитивными эвристиками, в которых на каждом шаге принимается решение, являющееся наиболее выгодным в данный момент, без учета того, что происходит на последующих шагах поиска. Блок-схема метода формирования групп частотных присвоений на основе “жадного” алгоритма показана на рис. 4.12.

На первом этапе алгоритма формируется список запросов частотных присвоений: $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_s\}$, где x_m – m -тый передатчик i – той радиосоты, а величина s равна суммарному количеству передатчиков БС в сети. Далее работа алгоритма происходит следующим образом: выбирается m -тый элемент из списка запросов частотных присвоений. Для этого элемента формируется вектор запрещенных частот с учетом матрицы ЭМС C_s . Затем элементу x_m присваивается разрешенный частотный канал ch с наименьшим индексом. Данная процедура выполняется до тех пор, пока не будут назначены частоты всем элементам x_m списка X . “Жадный” алгоритм за s шагов находит допустимое решение, не гарантирует его оптимальность по критерию минимума необходимых частотных каналов.

Недостатком этого метода является зависимость полученного решения от способа формирования списка запросов частотных присвоений X . Это подтверждается экспериментальными данными, полученными при решении

задачи частотного планирования сети GSM-R состоящей из 1000 радиосот, с использования “жадного” алгоритма и случайном формировании списка запросов частотных присвоений. В таблице 1 приведены численные значения полученного результата. Всего было произведено 65535 (2^{16}) запусков алгоритма, из них только 0.22 % содержали решение с минимальным количеством необходимых каналов N_{ch} , при этом вероятность существования лучшего решения остается высокой.

В работе [66], для увеличения вероятности нахождения оптимального решения, рекомендуется формировать список запросов частотных присвоений в порядке уменьшения степеней соответствующего графа. Степень вершины графа вычисляется по формуле:

$$d_i = \left(\sum_{j=1}^n m_j c_{ij} \right) - c_{ij}, \quad 1 \leq i \leq n. \quad (4.14)$$

Таблица 4.1

Количество необходимого каналов, при решении задачи присвоения частот сети GSM-R методом на основе “жадного” алгоритма, при разных вариантах списка запросов частотных присвоений

N_{ch}	26	25	24	23	22	21	20	19	18
W	38	408	2295	6068	12689	21096	18271	4527	143
%	0.06	0.62	3.50	9.26	19.36	32.19	27.88	6.91	0.22

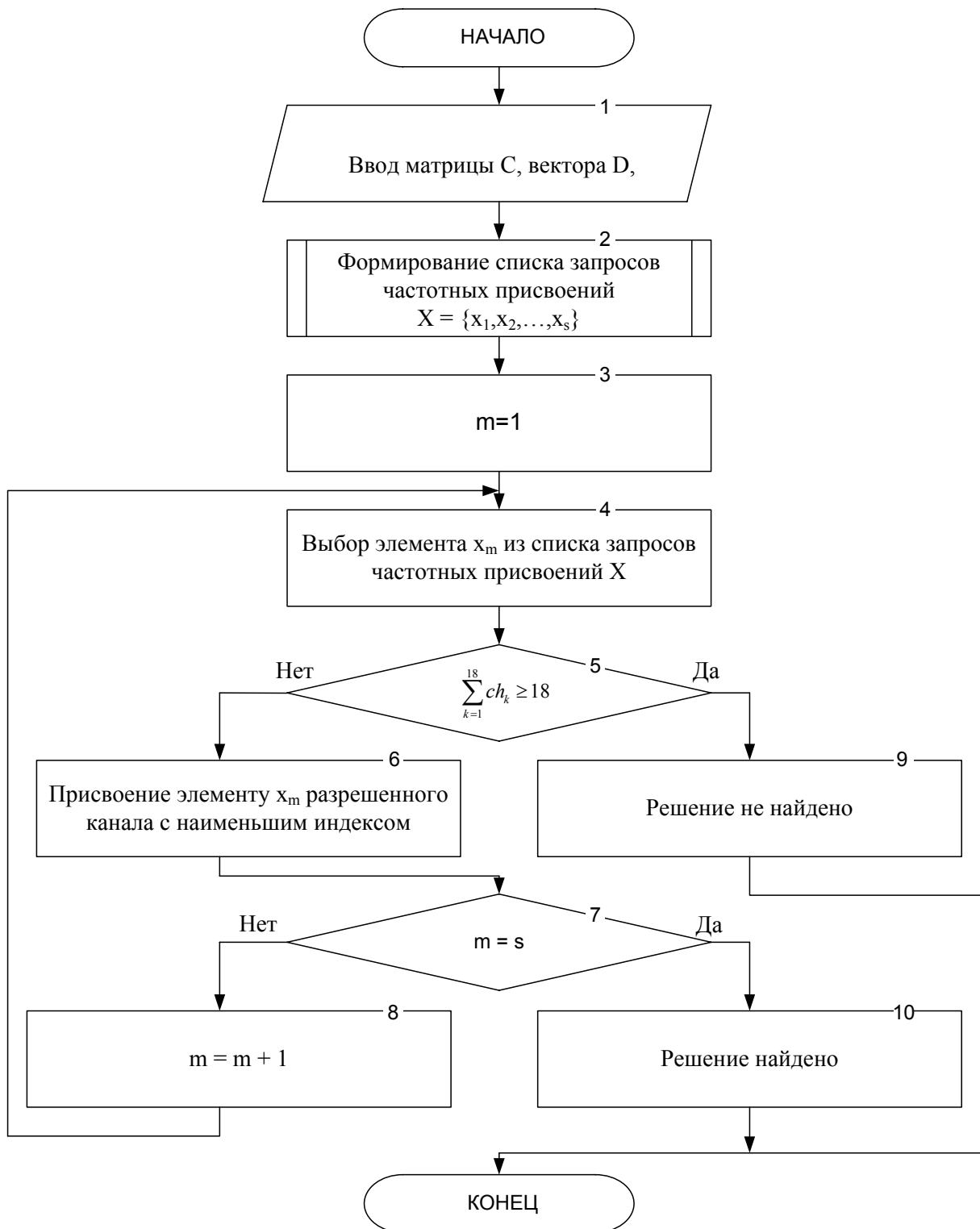


Рис. 4.12 Блок-схема метода формирования групп частотных присвоений сотам сети GSM-R на основе “жадного” алгоритма.

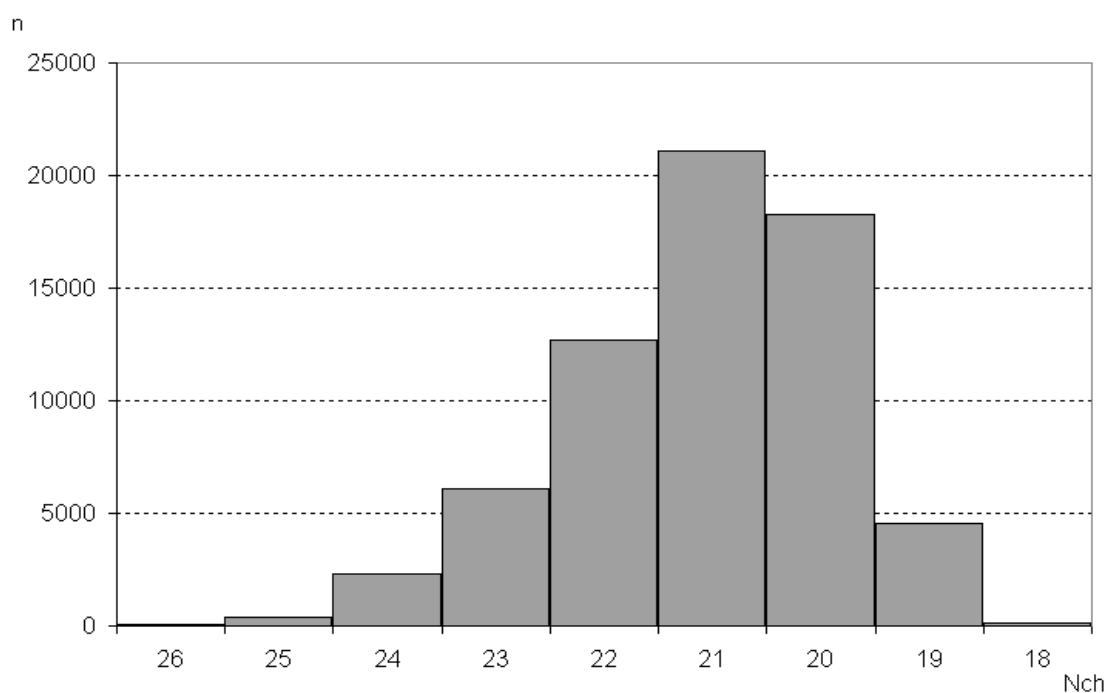


Рис. 4.13 Гистограмма распределения количества частотных каналов N_{ch} , при решении задачи присвоения частот сети GSM-R методом “жадного” алгоритма, при разных вариантах списка запросов частотных присвоений.

Существенно увеличить вероятность нахождения лучшего решения, выше описанным методом, можно применением мултистарта [28] с использованием случайного поиска или адаптивных поисковых процедур. В работе предложен комбинированный метод, сочетающий в себе “жадный” алгоритм, случайный и адаптивный поиск.

4.3.3. Разработка комбинированного метода формирования групп частотных присвоений сотам сети GSM-R

В дискретной оптимизации для функций, заданных алгоритмически, широкое распространение получили случайный поиск [40,48,117] и адаптивные поисковые процедуры [61,44].

Был разработан комбинированный метод [53], сочетающий в себе “жадный” алгоритм, случайный и адаптивный поиск. Для увеличения вероятности нахождения решения поставленной задачи использован мултистарт [28], т.е. многократный запуск алгоритма с последующим

выбором наилучшего решения. При этом формирование списка запросов частотных присвоений при каждом новом запуске можно производить как случайным образом, так и используя информацию, полученную на предыдущем шаге. Были реализованы и испытаны оба способа. В первом случае список запросов частотных присвоений формировался случайным образом. Во втором случае способ формирования списка запросов частотных присвоений был следующий (рис. 4.14): после завершения работы процедуры “жадного” алгоритма из исходного списка выбирался элемент с максимальным присвоенным номером канала и обменивался со случайно выбранным элементом списка. Позиция выбора элемента из списка запросов частотных присвоений с максимальным присвоенным номером канала обусловлена тем, что в данном варианте частотного плана он имеет наибольшие ограничения по количеству доступных каналов, т.е. имеет ключевую значимость в процессе выполнения частотных присвоений. Перестановка данного элемента потенциально должна дать качественно новое решение. Для проверки данного предположения было выполнено экспериментальное исследование, в ходе которого было сгенерировано шесть групп конфигураций ПБС, типичных для сети GSM-R. Каждая группа включала конфигурации сети состоящие из 25, 50, 100, 250, 500, 1000 радиосот соответственно. Далее из каждой группы было отобрано 100 конфигураций ПБС, которые, при решении задачи присвоения частот на основе “жадного” алгоритма с формированием списка запросов частотных присвоений в порядке уменьшения степеней соответствующего графа, требуют более 18 частотных каналов. Далее к этим конфигурациям было применено два метода, - мультистарт со случайным формированием списка запросов частотных присвоений и мультистарт с предложенным комбинированным способом формирования списка запросов частотных присвоений. Полученные результаты зависимости среднего числа необходимых частотных каналов S_k , при разном числе запусков алгоритма (кратного 2^n) представлены на рис. 4.15.

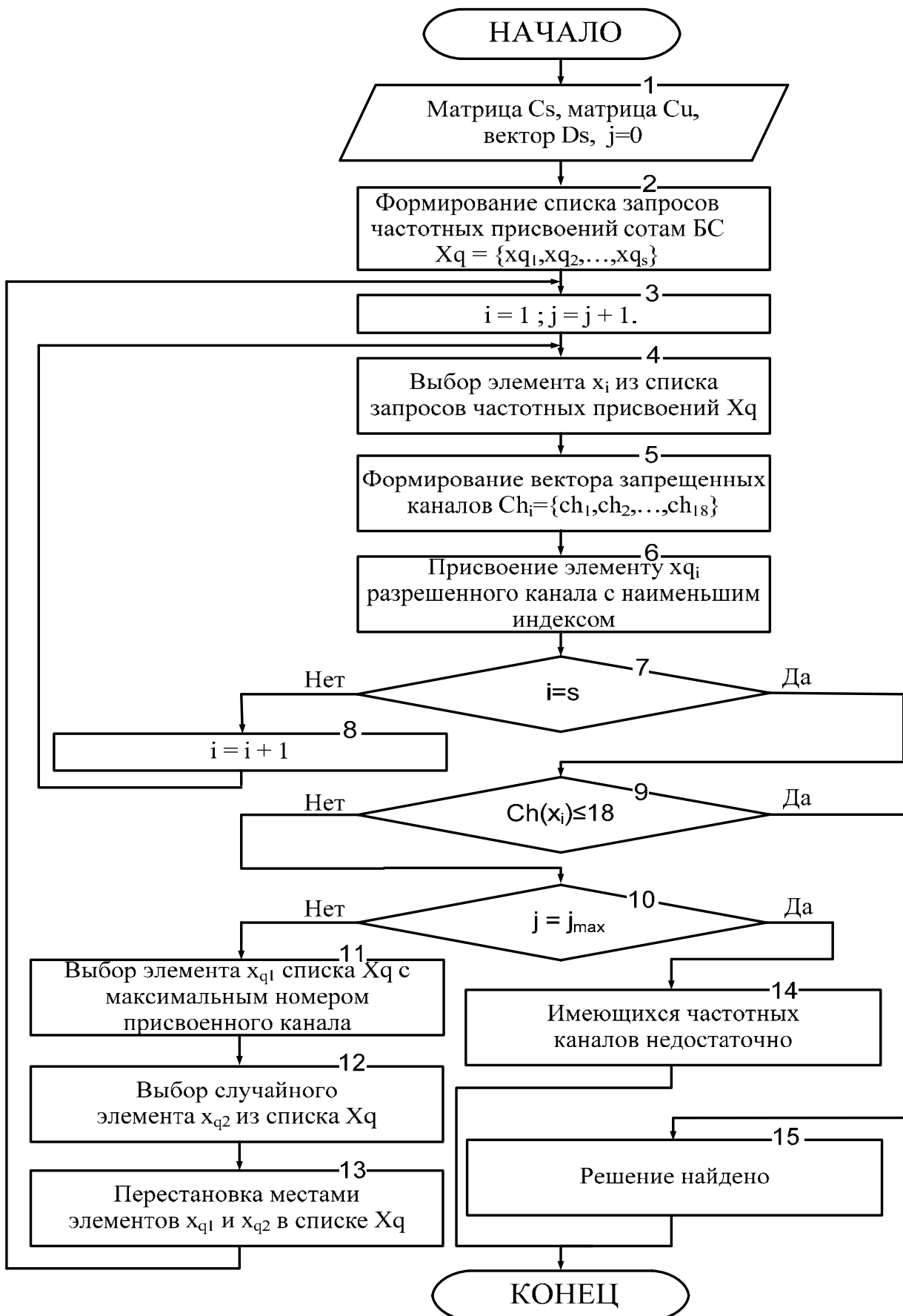


Рис. 4.14 Блок-схема предложенного комбинированного метода формирования групп частотных присвоений сотам сети GSM-R.

Анализ полученных зависимостей показывает, что предложенный метод имеет значительно более высокую градиентность уменьшения числа необходимых частотных каналов, по сравнению с методом формирования списка запросов частотных присвоений случайным образом.

На основе полученных статистических данных построены зависимости вероятности p уменьшения числа необходимых каналов на величину Z за счет мультистарта, от числа n запусков алгоритма, для случайного (рис. 4.16 а) и предложенного (рис. 4.16 б) способа формирования списка запросов частотных присвоений. Определено оптимальное значение числа запусков предложенного алгоритма, для задачи присвоения частот сети состоящей из 1000 сот, которое составляет 2^{17} , при этом время решения задачи составило 40 минут. Работа производилась с использованием ПЭВМ Pentium 4 3,0 ГГц.

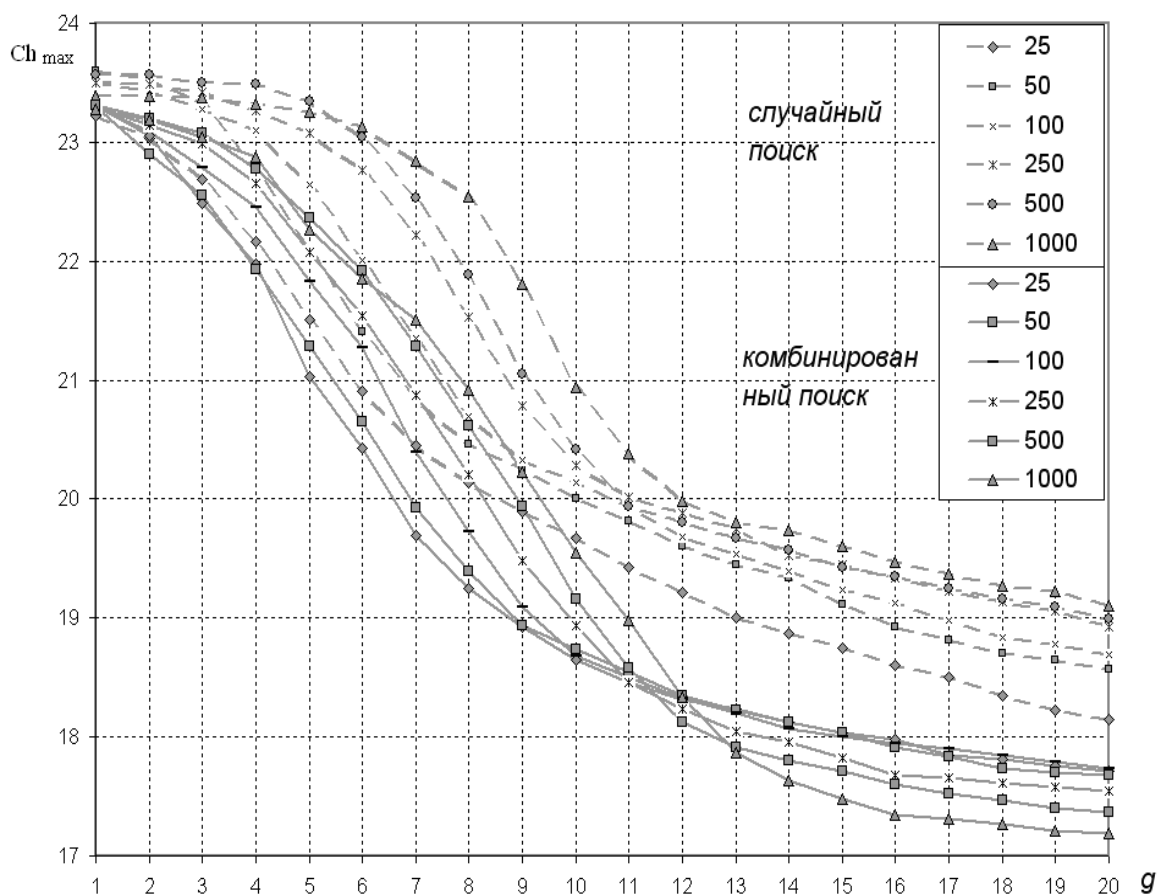
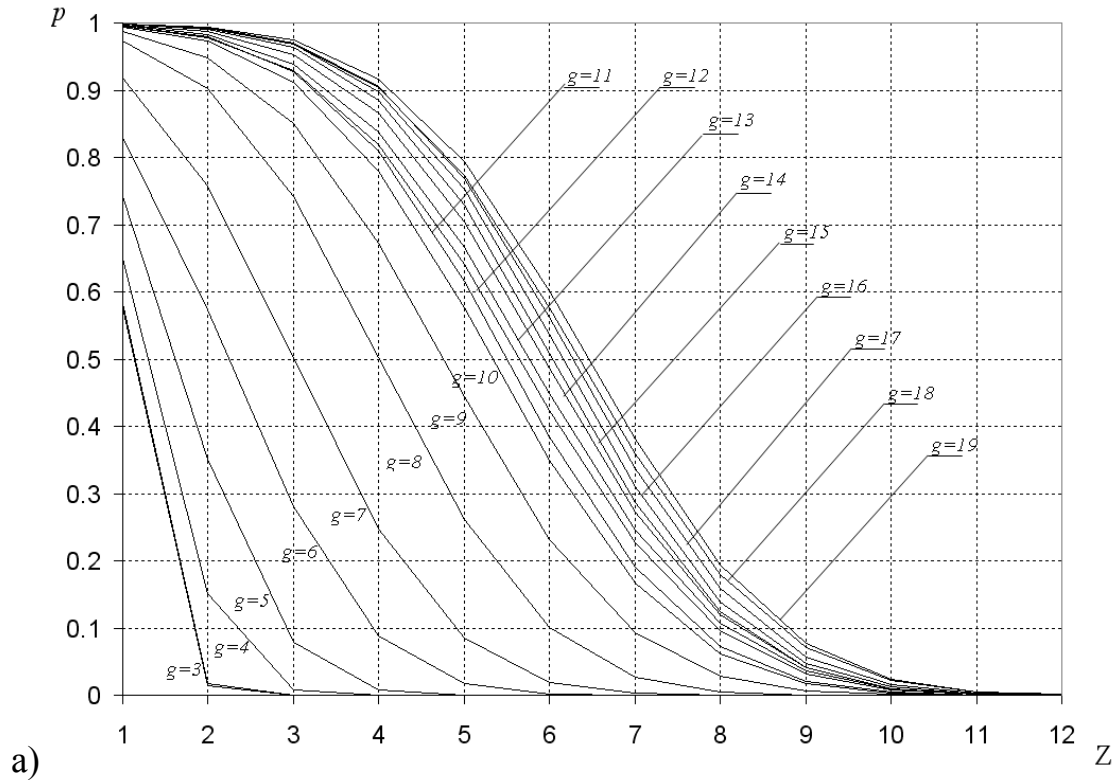
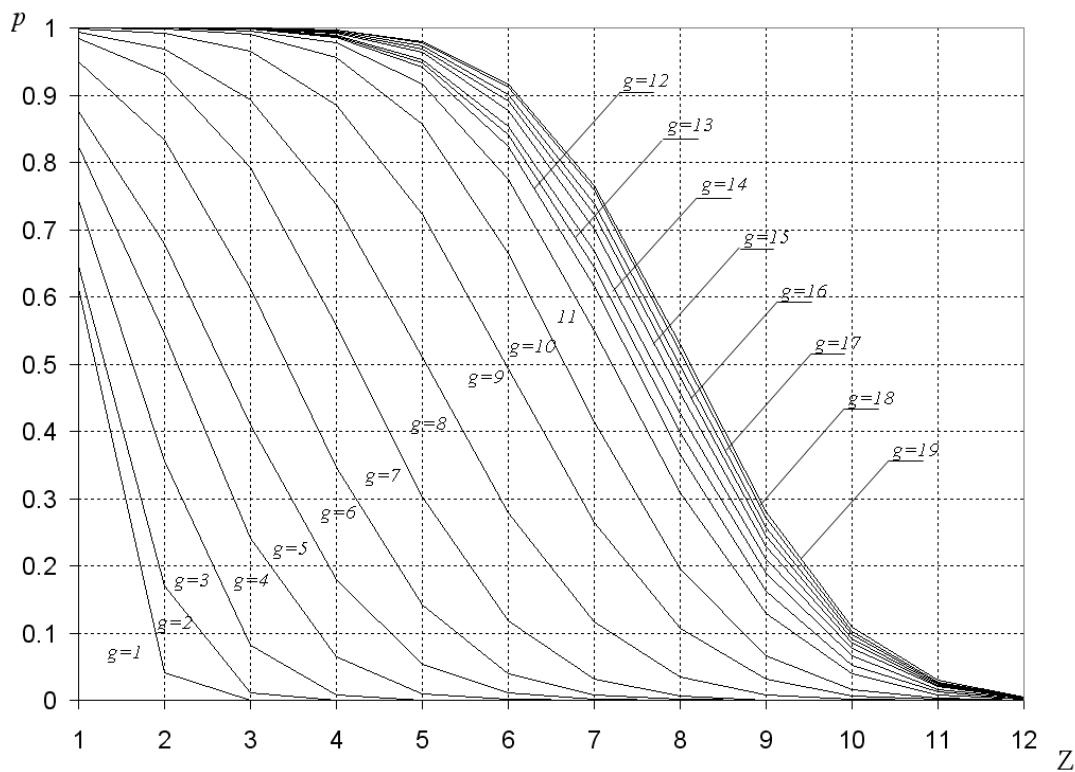


Рис. 4.15 График зависимости изменения среднего числа каналов при формировании списка запросов частотных присвоений разными способами, для разного числа сот, от количества запусков алгоритма $N=2^g$.



а)



б)

Рис. 4.16 Зависимость вероятности p уменьшения числа необходимых каналов на величину z за счет мультистарта, для разного числа запусков алгоритма ($y_{\max}=2^g$), при случайном (а) и комбинированном (б) способе формирования списка запросов частотных присвоений.

Выводы по четвертому разделу

1. Анализ действующих правил проектирования сетей железнодорожной технологической радиосвязи и спецификации стандарта GSM-R, показал отсутствие рекомендованной методики формирования групп частотных присвоений сотам сети стандарта GSM-R для обеспечения ЭМС.

2. Проведено экспериментально-теоретическое исследование зависимости уровня битовых ошибок на входе речевого кодека от соотношения сигнал/помеха в радиоканале GSM, на основании которого получены величины минимально-допустимого значения сигнал/помеха 14 дБ по основному и -2дБ.

3. Произведен анализ метода формирования групп частотных присвоений для БС сети GSM-R на основе «жадного» алгоритма, результаты которого показали, что он позволяет решать поставленную задачу с высокой скоростью, но обладает низкой вероятностью нахождения решения с минимальным числом требуемых частотных каналов.

4. Разработан комбинированный метод формирования групп частотных присвоений сети GSM-R сочетающий в себе «жадный» алгоритм, случайный и адаптивный поиск. Анализ результатов работы предложенного метода показал, он позволяет находить лучшие решения (уменьшения количества необходимых частот на 6 частотных каналов в более чем 90% рассмотренных конфигураций сети GSM-R при числе запусков алгоритма 2^{17}) за приемлемое время работы (время формирования частотного плана для сети GSM-R из 1000 БС – 40 мин).

РАЗДЕЛ 5

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ БС СЕТИ GSM-R ПО КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНОЙ СТОИМОСТИ

5.1. Анализ возможности применения существующих методов решения задачи об обобщенном покрытии, для определения оптимальных мест установки БС сети GSM-R

Задача, решаемая в процессе поиска оптимальных мест установки БС сети GSM-R, относится к классу задач дискретной оптимизации об обобщенном (многократном) покрытии множества [63]. Из теории известно, что данная задача является *NP*-полной. Классическая формулировка задачи о покрытии множества следующая [22]: пусть даны множество $M = \{1, \dots, m\}$ и набор его подмножеств M_1, \dots, M_n таких, что $\bigcup_{j=1}^n M_j = M$. Совокупность подмножеств M_j , $j \in J \subseteq \{1, \dots, n\}$, называется покрытием множества M , если $\bigcup_{j \in J} M_j = M$. Каждому M_j поставлен в соответствие вес $c_j \geq 0$. Требуется найти покрытие минимального суммарного веса. Часто задача о покрытии формулируется как задача целочисленного программирования [22]: найти

$$f^*(c, A) = \min \{cx \mid Ax \geq e, x \in \{0, 1\}^n\}. \quad (5.1)$$

где $A = (a_{ij})$ — матрица размера $m \times n$ с элементами $a_{ij} = 1$, если $i \in M_j$, и $a_{ij} = 0$ в противном случае;

e - m -вектор из единиц;

$c = (c_1, \dots, c_n)$ — вектор весов;

$x = (x_1, \dots, x_n)$ — вектор переменных с компонентами $x_j = 1$, если M_j входит в покрытие, и $x_j = 0$ в противном случае.

Классические подходы к решению поставленной оптимизационной задачи можно разделить на 4 группы [44,28,13]: различные модификации

градиентных методов, перебор на дискретной сетке в пространстве оптимизируемых параметров, случайный поиск, эволюционные методы.

Метод перебора [44] практически может быть применен для малых размеров пространства поиска. Обычно применяют не полный перебор, а специальные схемы перебора, например, метод ветвей и границ. Случайный поиск [28] малоэффективен, характеризуется медленной сходимостью.

Для задач о покрытии разработано значительное число приближенных алгоритмов с априорными оценками точности получаемых решений [22], одним из которых является «жадный» алгоритм. В этом алгоритме на каждой итерации в качестве очередного элемента покрытия выбирается подмножество, покрывающее наибольшее число элементов из M , не покрытых на предыдущих итерациях [63,22]. В работе [41] показано, что относительная погрешность решений получаемых «жадным» алгоритмом, при $f^*(e,A) > 1$:

$$\delta \leq 1 + \frac{\ln m - \ln f^*(e, A)}{f^*(e, A) \ln \left(1 + \frac{1}{(f^*(e, A) - 1)} \right)} \leq 1 + \ln m - \ln f^*(e, A). \quad (5.2)$$

Близкий результат получен в работах [98] и [101]:

$$\delta \leq 1 + \ln \max_{j=1, \dots, n} |M_j|. \quad (5.3)$$

Для задачи о покрытии с произвольными весами в работе [79] предложена модификация «жадного» алгоритма, где на каждой итерации в покрытие включается подмножество M_j с максимальным отношением числа покрываемых элементов, не покрытых на предыдущих итерациях, к весу c_j , при этом оценка (5.3) справедлива при любых положительных весах [22].

В работах [111,34] для обобщенной задачи о покрытии предложен алгоритм с относительной погрешностью:

$$\delta \leq 1 + O\left(\max\left\{\ln\left(\frac{m\beta}{f}\right)/\beta, \sqrt{\ln(2\lceil m\beta/f \rceil)/\beta}\right\}\right), \quad (5.4)$$

где \bar{f} - оптимальное значение целевой функции ЛП-релаксации обобщенной задачи и $\beta = \min_{i=1,\dots,m} b_i$. В основе применяемой здесь техники лежит выявление некоторого распределения вероятностей, при котором близкие к оптимуму допустимые решения появляются достаточно часто (при этом используется информация о решении ЛП-релаксации задачи) [22]. С помощью полученного распределения строится детерминированный алгоритм, в котором на основе решения ЛП-релаксации происходит последовательная фиксация целочисленных значений переменных, округленных вниз или вверх [22].

Для поиска приближенных решений задач большой размерности широкое распространение получили методы лагранжевой релаксации [41, 48, 56], генетические алгоритмы [7, 39, 50], поиск с запретами [95], алгоритмы муравьиной колонии [38] и нейронные сети [75]. Большая часть эвристических методов основана на частичном переборе покрытий с учетом накапливаемой при этом статистической информации. Как правило, сравнение эвристик осуществляется на основе вычислительного эксперимента, так как априорные оценки точности на практике часто оказываются далеки от экспериментальных результатов, а теоретический вероятностный анализ затрудняется сложностью вычислительных схем [22].

Генетический алгоритм (ГА) является методом поиска, основанным на имитации эволюции биологической популяции [74]. Для задачи о покрытии, при работе ГА, происходит последовательная смена популяций, состоящих множества вариантов покрытий, каждое из которых представляет собой возможное решение. Основное преимущество методов поиска, построенных на принципах ГА [13], состоит в том, что они хорошо функционируют на многоэкстремальном ландшафте целевой функции, так как данные методы работают с целым множеством (популяцией) решений, а

также сочетают в себе случайный и градиентный методы поиска, что позволяет достичь высокой эффективности поиска решения.

В настоящей главе разработан метод выбора оптимальных мест установки БС сети GSM-R, основанный на принципах ГА [50,51,54].

5.2. Разработка метода генетического алгоритма выбора оптимальных мест установки БС сети GSM-R

Подробно механизм работы ГА описан в [97]. Применительно к специфике поставленной задачи поиска оптимальных мест установки БС сети GSM-R, была разработана блок-схема ГА [51] (рис. 5.1), состоящая из следующих основных этапов:

Этап 1. Формирование начальной популяции (НП) вариантов размещения БС.

Генерировать определенным образом R вариантов мест установки БС, после чего поместить их в НП $\beta(t) = (A_1(t), \dots, A_R(t))$, $t = 0$.

Оценить стоимость каждого варианта размещения БС из НП

$\upsilon(0) = (\mu_1(0), \dots, \mu_R(0))$, а затем – среднюю стоимость: $\bar{\mu}(0) = \sum_z^M \mu_z(0) / R$.

Этап 2. Выбор родительской хромосомы.

Выбрать, определенным образом, родительскую хромосому из множества β , с учетом её стоимости $\mu_z(t)$.

Этап 3. Проверка условия применения оператора копирования.

С вероятностью p_{copy} перейти к этапу 11, в другом случае к этапу 4.

Этап 4. Проверка условия применения оператора кроссинговера.

С вероятностью p_{cross} перейти к этапу 5, в другом случае к этапу 7.

Этап 5. Выбор второй родительской хромосомы.

Выбрать, определенным образом, вторую родительскую хромосому из множества β , с учетом её стоимости $\mu_z(t)$.

Этап 6. Получение новой хромосомы с помощью операции кроссинговера.

Применяя операцию кроссинговера к родительским хромосомам, получить новую хромосому.

Этап 7. Проверка условия применения оператора мутации.

С вероятностью p_{mut} перейти к этапу 8, в другом случае к этапу 9.

Этап 8. Получение новой хромосомы с помощью операции мутации.

Применяя операцию мутации к хромосоме, получить новую хромосому.

Этап 9. Проверка условия применения оператора восстановления.

Выполнить проверку условия (2.18) и при его выполнении, перейти к этапу 11, в другом случае к этапу 10.

Этап 10. Преобразование хромосомы в разрешенную, с помощью оператора “восстановления”.

Этап 11. Копирование. Поместить полученную хромосому в формируемую популяцию $\beta(t+1)$.

Этап 12. Проверка условия завершения формирования нового поколения.

Выполнить проверку равенства размера множества $\beta(t+1)$ и величины R , при его выполнении, перейти к этапу 13, в другом случае к этапу 2.

Этап 13. Увеличение номера текущего поколения на единицу $t = t + 1$.

Этап 14. Проверка условия выполнения критерия завершения поиска.

Выполнить проверку условия выполнения критерия завершения поиска, перейти к этапу при его выполнении, перейти к этапу 13.

Реализация предложенного метода поиска оптимальных мест установки БС сети GSM-R на основе ГА, требует решения следующих подзадач [13, 51,71,81]:

- разработка процедуры вычисления целевой функции;

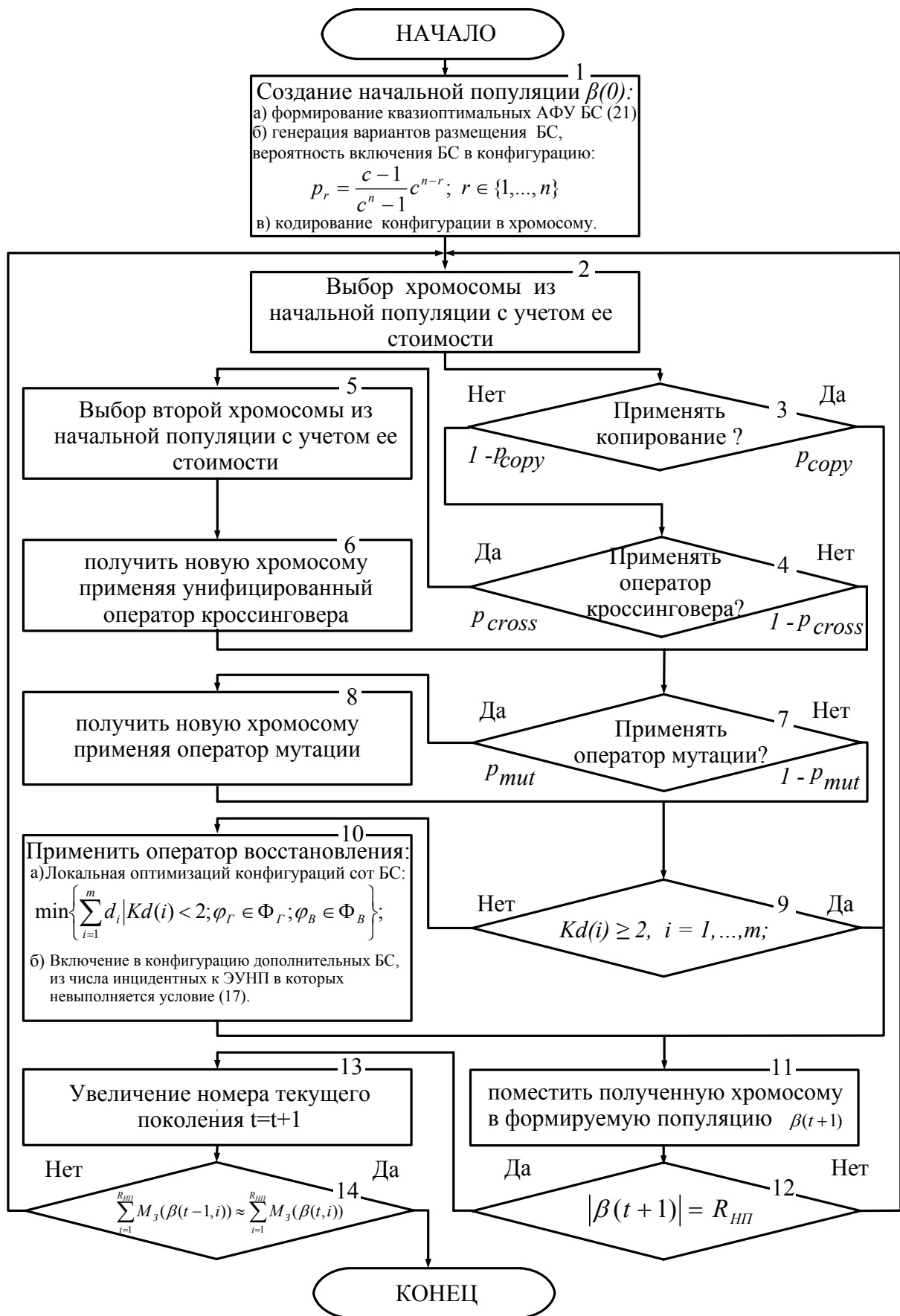


Рис. 5.1 Блок-схема метода поиска оптимальных мест установки БС сети GSM-R на основе ГА.

- разработка процедуры проверки условия обеспечения заданной кратности резервирования радиоканала, для различных вариантов размещения БС;
- определение наиболее подходящего способа кодирования вариантов размещения БС в хромосому;
- разработка метода формирования начальной популяции ГА, состоящей из вариантов мест установки БС;
- выбор критерия завершения поиска;
- выбор вида оператора кроссинговера;
- выбор вида оператора мутации;
- выбор метода селекции ГА;
- определение параметров ГА: вероятности применения кроссинговера, вероятности мутации, размера НП. В работе [71], показано, что в качестве критерия завершения поиска в ГА можно использовать величину приращения среднего значения стоимости вариантов мест установки БС в текущей популяции, а именно отсутствие его изменения более двух поколений подряд.

5.2.1. Выбор способа кодирования конфигурации ПБС в хромосому

При решении задачи поиска оптимальных мест установки БС сети GSM-R методом ГА необходимо представить исходные данные в виде хромосом. Исходные данные содержат в себе следующую информацию: географические координаты x_{S_i} , y_{S_j} места возможной установки БС s_i , данные о высоте h_{a_i} существующих сооружений, пригодных для установки антенн, а также предварительно найденная конфигурация cnf_{ir} , в которую входят параметры N_{clj} , Ant_{ij} , h_{ij} , $\varphi_{Гij}$, $\varphi_{Вij}$, $N_{прij}$, f_{ijk} . Для кодирования расположения БС в хромосому можно использовать способ, при котором каждый ген хромосомы $\mathbf{Cr} = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$, кодируется следующим образом: $G_i = r$, – если в потенциальном месте установки базовой ствнции (ПМУБС) s_i будет

построена БС в конфигурации cnf_r , $G_i = 0$ – если БС s_i не будет установлена (Рис. 5.2).

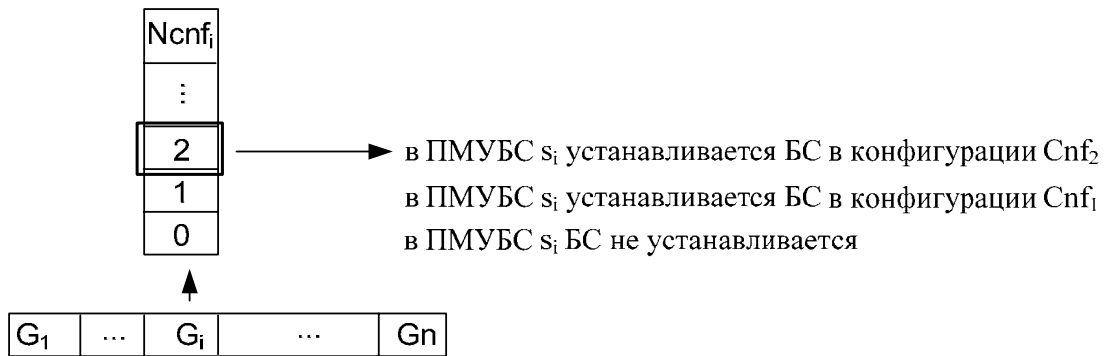


Рис. 5.2. Кодирование конфигурации ПБС в хромосому.

Длина строки хромосомы будет равна числу БС n . Такой способ кодирования удобен из соображений упрощения нахождения вектора ограничений K_{cr} , который в данном случае можно получить следующим образом:

$$K_{Cr} = \left\{ \sum_{i_1=1}^n Cv(i_1, G_{i_1}, 1), \dots, \sum_{i_k=1}^n Cv(i_k, G_{i_k}, m) \right\}. \quad (5.5)$$

5.2.2. Разработка процедуры вычисления целевой функции ГА

Целевой функцией задачи поиска оптимальных мест установки БС сети GSM-R являются суммарные материальные затраты на строительство подсистемы БС $M_{ПБС}$. Если конфигурация ПБС представлена в виде хромосомы Cr , то $M_{ПБС}$ можно найти следующим образом:

$$M_{ПБС} = \sum_{i=1}^n (M_{БС}(Cnf_{G_i})). \quad (5.6)$$

5.2.3. Выбор метода селекции ГА

Оператор селекции обеспечивает возрастание значения целевой функции, за счет увеличения вероятности выбора в качестве родительских

хромосом, для синтеза новых конфигураций, вариантов мест установки БС с более низкой стоимостью. Это позволяет вести поиск на наиболее многообещающих регионах ландшафта целевой функции [13].

Существует большое число операторов селекции, наиболее распространенными являются [13,38,71]: селекция на основе рулетки; селекция на основе заданной шкалы, элитная селекция, турнирная селекция.

При использовании селекции на основе рулетки вероятность выбора хромосомы пропорциональна значению её стоимости:

$$p_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^N C_i}, \quad (5.7)$$

где C_i - стоимость i -ой хромосомы из популяции размера N .

Преимуществом данного метода является отсутствие необходимости сортировки, временная сложность - $O(N)$.

При использовании селекции на основе заданной шкалы все N хромосом популяции сортируются по значению целевой функции и лучшей присваивается ранг N , а худшей - ранг 1. Тогда вероятность выбора для каждой хромосомы в популяции назначается определенным образом согласно её рангу. Например, возможно использование линейного ранжирования:

$$p_i = \frac{p_1(N-i) - p_N(1-i)}{N-1}; \quad i \in \{1, \dots, N\}, \quad (5.8)$$

где p_1 - вероятность выбора хромосомы с максимальной стоимостью,

p_N - вероятность выбора хромосомы минимальной стоимости.

При использовании экспоненциального ранжирования, вероятности выбора, для каждой хромосомы, подчиняются экспоненциальному закону с основанием b ($0 < b < 1$):

$$p_i = \frac{b-1}{b^N-1} b^{N-i}; \quad i \in \{1, \dots, N\}. \quad (5.9)$$

Временная сложность селекции на основе заданной шкалы - $O(N \cdot \log(N))$, поскольку требуется сортировка популяции.

При использовании турнирной селекции [13], из исходной популяции случайным образом выбирается z хромосом, затем лучшая из них копируется в формируемую популяцию. Наиболее часто используется бинарный турнир, в котором случайным образом выбираются, а затем сравниваются, две хромосомы. Селекция на основе турнира имеет временную сложность $O(N)$, поскольку не требуется сортировка популяции.

При использовании селекции с помощью усечения [13], только доля Bz из всех лучших хромосом может перейти в формируемую популяцию. Временная сложность селекции с помощью усечения - $O(N \cdot \ln(N))$, поскольку возникает необходимость предварительной сортировки популяции.

В работе [78], для сравнительного анализа различных методов селекции в качестве характеристики эффективности предложено использовать следующие показатели: нормализованную интенсивность селекции I_{Ω} , коэффициент потери многообразия P_d и нормализованное предполагаемое отклонение V_{Ω} распределения целевой функции после применения метода селекции.

В работах [38,78] для описанных выше методов селекции были получены аналитические выражения для данных параметров и произведен анализ зависимости коэффициента потери многообразия P_d и зависимости нормализованного отклонения метода селекции V от интенсивности селекции. На основании чего в работе [71] сделано предположение, что больший разброс в отклонении метода селекции предпочтительнее и селекция с экспоненциальным ранжированием оказывается наиболее оптимальной. Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что в рамках рассматриваемой задачи, метод селекции с экспоненциальным ранжированием является наиболее эффективным.

5.2.4. Выбор вида оператора кроссинговера

Оператор кроссинговера осуществляет обмен частями двух или большего числа хромосом, кодирующих варианты мест установки БС, из текущей популяции, тем самым может породить новые конфигурации, ранее не встречавшиеся на предыдущих итерациях ГА. Различают следующие типы операторов кроссинговера: одноточечный, многоточечный, универсальный [13].

Принцип работы одноточечного оператора кроссинговера заключается в следующем: случайным образом выбирается точка разрыва между соседними генами в хромосоме, далее хромосомы разрываются на два сегмента по этой точке. Затем, соответствующие сегменты различных хромосом объединяются и получаются две новые хромосомы.

При применении однородного оператора кроссинговера, значение каждого гена в новой хромосоме определяется случайным образом из соответствующих генов отобранной пары родительских хромосом.

При работе ГА неявно происходит обработка шим, которые представляют шаблоны подобия между хромосомами [81]. Шима [13] - это строка, длина которой равная размеру хромосомы популяции, состоящая из знаков алфавита $\{0; 1; *\}$, где $\{*\}$ - неопределенный символ. Каждая шима определяет множество всех хромосом, имеющих в соответствующих позициях либо 0, либо 1, в зависимости от того, какой бит находится в соответствующей позиции самой шимы. ГА практически производит выборку значительного числа гиперплоскостей в областях поиска с высокой приспособленностью. Каждая такая гиперплоскость соответствует множеству похожих хромосом с высокой приспособленностью.

В работе [97], показано, что ожидаемое число примеров шимы H_k в следующем поколении $(t + 1)$ определяется выражением:

$$m(H_k, t + 1) \geq m(H_k, t) \cdot \frac{f(H_k)}{\bar{f}} \cdot (1 - P_m k - P_c P_d(H_k)), \quad (5.10)$$

где $f(H_k)$ - средняя пригодность текущих строк, шимы H_k ;

\bar{f} - средняя пригодность текущей популяции;

P_m - вероятность применения оператора мутации;

P_c - вероятность применения оператора кроссинговера;

$P_d(H_k)$ – вероятность того, что в результате применения оператора кроссинговера будут получены решения, не принадлежащие тому же подпространству поиска, что и их породившие решения.

Данное выражение показывает, что количество примеров шим с высокой приспособленностью, в процессе работы ГА будет возрастать экспоненциально, в то время как количество примеров шим с приспособленностью ниже средней будет экспоненциально уменьшаться. Вероятность применения оператора кроссинговера обычно задается довольно высокой ($P_c \geq 0,6$). При этом, на количество примеров шим значительно влияет вероятность P_d разрушения шимы H_k в результате применения оператора кроссинговера.

В работе [84] приведен анализ разрушений вносимых одноточечным оператором кроссинговера, и сделан следующий вывод: если точка разрыва одноточечного оператора кроссинговера не попадает в пределы границ шимы H_k , то полученная хромосома также принадлежит шиме H_k . В случае, если точка разрыва попадает внутрь границ шимы, то в зависимости от её позиции, а также от значений соответствующих генов родительских хромосом, разрушение может как произойти так и не произойти. Если вероятность попадания точки разрыва для каждой позиции хромосомы имеет равномерное распределение, то P_d может быть ограничена вероятностью попадания точки разрыва в пределы определенных границ шимы H_k :

$$P_d(H_k) \leq \frac{dl(H_k)}{L-1}, \quad (5.11)$$

где $dl(H_k)$ - определяющая длина шимы H_k .

Данное выражение позволяет сделать вывод, что одноточечный оператор кроссинговера с большей вероятностью разрушает шимы с большей

определяющей длиной. В работе [82] подобный анализ был применен к n -точечному оператору кроссинговера, и получен вывод, что если имеется четное число точек разрыва между каждой определяющей позицией шимы H_k , то разрушение шимы H_k не происходит. В этом случае верхнюю границу вероятности разрушения шимы H_k n -точечным оператором кроссинговера можно записать как:

$$P_d(n, H_k) \leq 1 - P_{k, ev}(n, H_k), \quad (5.12)$$

где $P_{k, ev}(n, H_k)$ вероятность уменьшения количества четных n точек разрыва между каждой из k позиций, определяющих шиму H_k .

В однородном операторе кроссинговера [114], при формировании хромосомы-потомка, с вероятностью P_o используя ген первой хромосомы-родителя, и с вероятностью $1 - P_o$ использования ген второй хромосомы-родителя. Во многих работах [71, 114, 118] выполнен анализ разрушающего эффекта от применения одноточечного и однородного оператора кроссинговера для случая $P_o = 0,5$, согласно которым, несмотря на более высокую вероятность разрушения шим, универсальный оператор кроссинговера увеличивает скорость поиска решений ГА, поскольку обеспечивает более высокое разнообразие множества решений.

$$P_{k, ev}(H_k) = (P_o)^k + (1 - P_o)^k, \quad (5.13)$$

Если $P_o = 0,5$, то :

$$P_{k, ev}(H_k) = \left(\frac{1}{2}\right)^{k-1}, \quad (5.14)$$

$$P_{k, s}(H_k) = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} (P_o)^i (1 - P_o)^{k-i} (P_{eq}^i + P_{eq}^{k-i} - P_{eq}^k), \quad (5.15)$$

Данные, полученные экспериментально, показали, что при применении одноточечного оператора кроссинговера, в ГА определения оптимальных мест установки БС, уменьшение стоимости $M_{ПБС}$ происходит значительно медленнее, нежели при применении однородного оператора кроссинговера. При увеличении количества БС данная тенденция

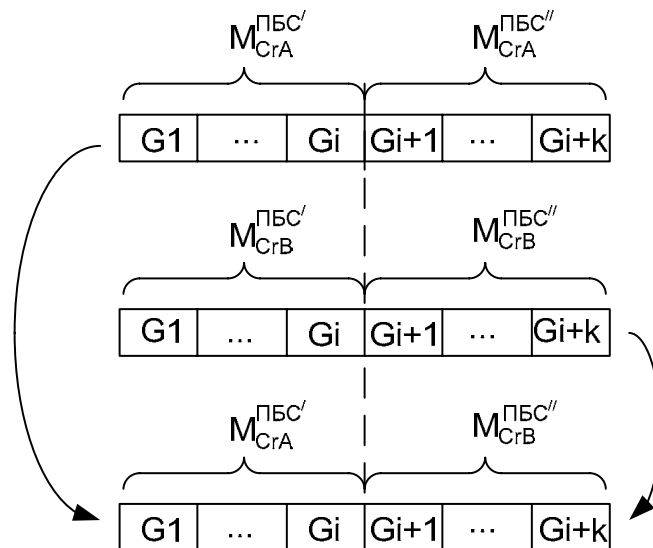


Рис. 5.3. К пояснению принципа возникновения новой комбинации ПБС с более низкой стоимостью $M_{ПБС}$, чем у родительских хромосом, в результате применения одноточечного оператора кроссинговера.

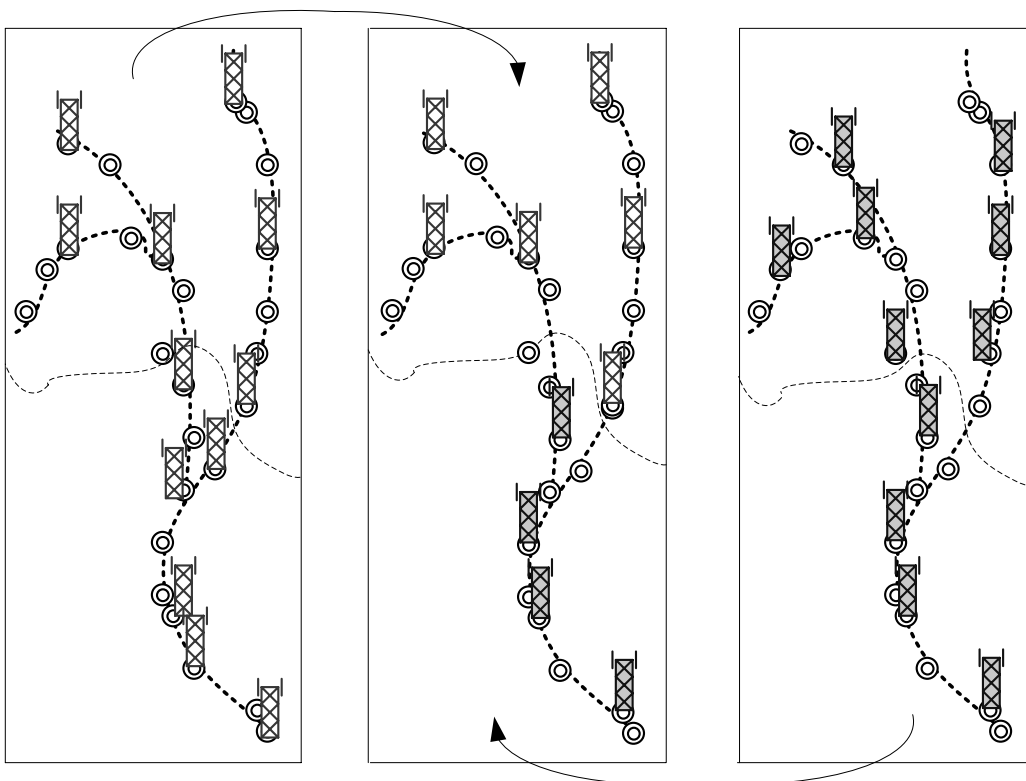


Рис. 5.4. Возникновения новой комбинации ПБС в результате применения одноточечного оператора кроссинговера.

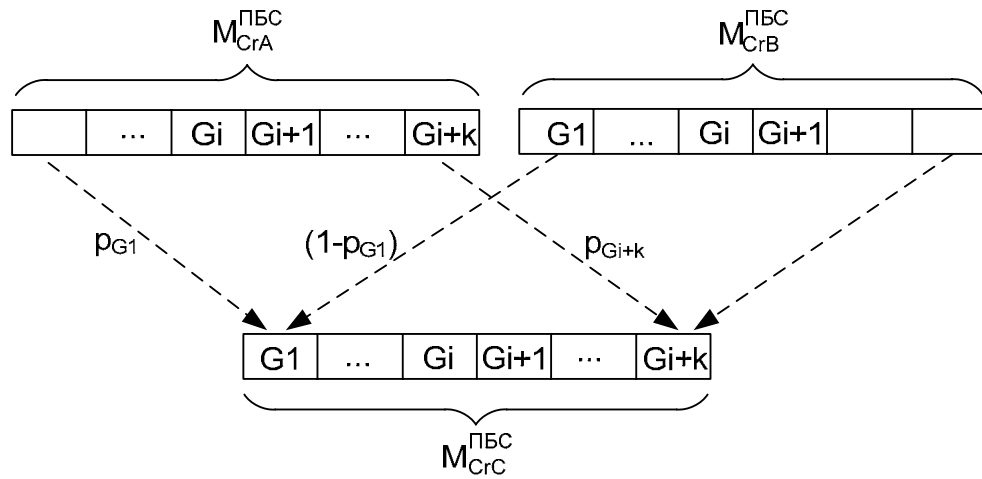


Рис. 5.5. К пояснению принципа возникновения новой комбинации ПБС с более низкой стоимостью $M_{ПБС}$ чем у родительских хромосом в результате применения универсального оператора кроссинговера.

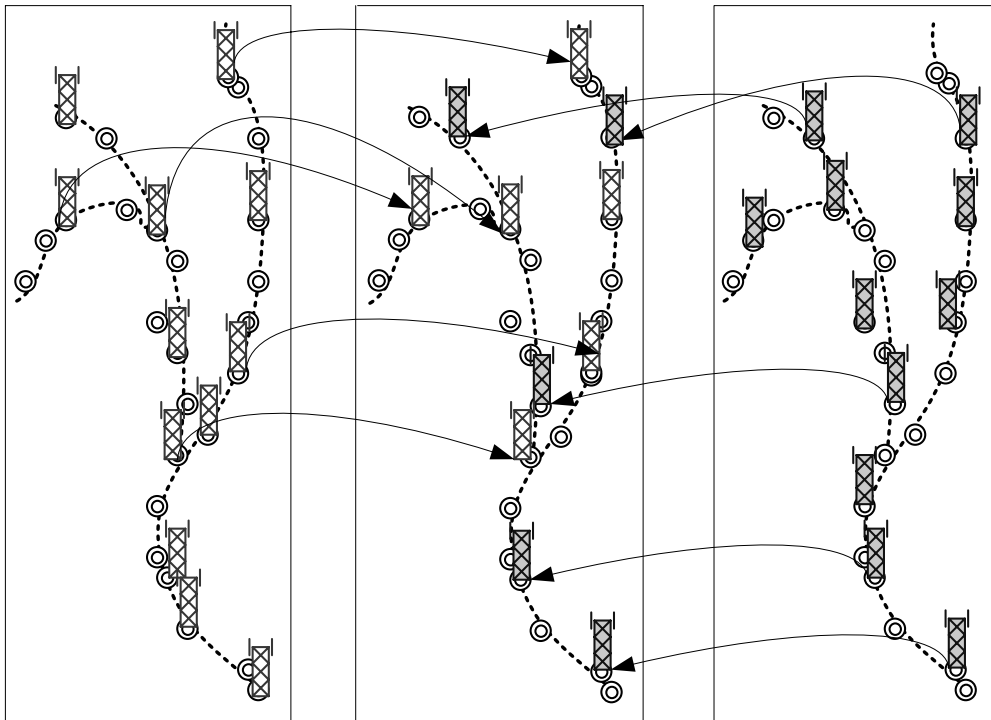


Рис. 5.6. Возникновения новой комбинации ПБС в результате применения универсального оператора кроссинговера.

усиливается. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что при решении задачи определения оптимальных мест установки БС методом ГА универсальный оператор кроссинговера является более эффективным, нежели одноточечный.

5.2.5. Выбор вида оператора мутации

Операция мутации придает ГА элемент случайности, снижая вероятность преждевременной сходимости к локальному оптимуму за счет расширения пространства поиска решения [13].

В рассматриваемом ГА операция мутации заключается в случайном изменении каждого гена хромосомы, с заданной вероятностью. При этом параметром операции является вероятность мутации p_m . Операция выполняется следующим образом:

1. Для каждого гена хромосомы генерируется случайное число p'_m .
2. Если $p'_m < p_m$, то значение гена случайным образом изменяется.

В работе [155] предлагается применять мутацию только к тем генам хромосомы, которые у отобранной родительских хромосом для кроссинговера одинаковы. Данное решение позволяет не только повысить быстродействие метода ГА, но и снизит вероятность преждевременной сходимости к локальному оптимуму.

5.2.6. Разработка процедуры формирования начальной популяции

Размер НП и процедура его формирования оказывает существенное влияние на эффективность работы ГА [13,71,92]. Согласно теории строительных блоков, для успешной работы ГА метод формирования НП должен обеспечивать достаточное количество строительных блоков.

Способы формирования НП могут быть разделены на две основные разновидности: эвристические и случайные. При случайном способе – гены хромосомы Cr принимают значения из заданного алфавита случайным образом. В эвристических методах хромосомы формируются при помощи

эвристик, которые используют имеющуюся априорную информацию о характере решаемой задачи.

Отличительной особенностью решаемой задачи является необходимость выполнения для каждой сгенерированной хромосомы условия (2.18). Формирование НПГА случайным способом, в этом случае, будет выглядеть следующим образом [50]: отдельная БС вводится в конфигурацию с заданной вероятностью P_{BC} , от которой зависит значение математического ожидания количества БС $n_{bc} = 1/p_{BC}$. Затем для полученной конфигурации выполняется проверка условия (2.18), и если оно выполняется, хромосома помещается в начальную популяцию, в противном случае отбрасывается. Так происходит до тех пор, пока не будет сформирована начальная популяция требуемого размера R . Время формирования популяции t_R этим способом:

$$t_R = R \cdot n_z \cdot (t_{Cr} + t_a), \quad (5.16)$$

где t_{Cr} - время генерации одной хромосомы,

t_a - время, необходимое для проверки условия (2.18),

n_z - среднее количество генераций для получения хромосомы удовлетворяющей условию (2.18).

Величину n_z можно найти как:

$$n_z = \frac{1}{P_K}, \quad (5.17)$$

где P_K - вероятность выполнения условия (2.18).

Вероятность выполнения условия $k_m \geq a_{min}$ одновременно во всех ЭУНП, была получена в третьем разделе (3.12):

$$n_z = \frac{1}{(P_{(k_i \geq a_{min})})^k} = \frac{1}{\left(\sum_{i=a_{min}}^n \left(\frac{n_{bc}!}{i!(n_{bc}-i)!} \cdot p^i q^{n_{bc}-i} \right) \right)^k}. \quad (5.18)$$

В случае больших значений p_{bc} , для получения приближенной оценки $P_{(k_i \geq a_{min})}$ можно воспользоваться интегральной теоремой Лапласа или, при малых значениях p_{tmp} , асимптотической формулой Пуассона [11].

Для проверки полученной аналитической зависимости, описанный выше алгоритм формирования начальной популяции, был реализован на языке программирования C++, и произведен ряд его запусков при разных значениях вероятности p_{bc} , используемой для генерации хромосом.

На рис. 5.7 приведен график полученной аналитической зависимости среднего числа генераций хромосом n_z от вероятности p_{bc} , а также данные, полученные экспериментально. Использовались следующие исходные данные: $l = 500$, $k = 2500$, $p_{tmp} = 0,031$, $a_{min} = 2$.

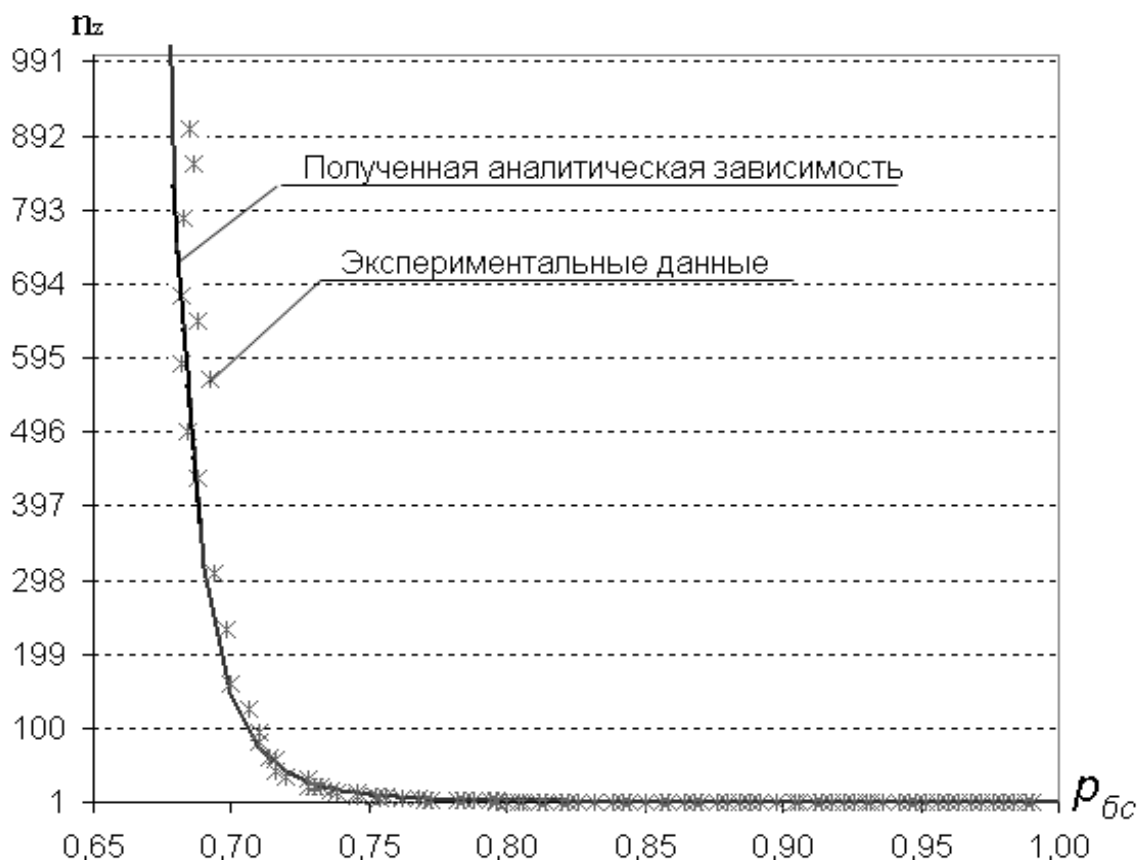


Рис. 5.7. Зависимость числа генераций хромосом n_z от вероятности p_{bc} .

Можно предложить последовательную процедуру формирования хромосомы, в которой, исходная хромосома, состоящая из элементов со

значениями, равными нулю, последовательно заполняется единичными элементами. Причем после каждого шага происходит проверка условия (2.18) и при его выполнении полученная хромосома помещается в НП. В этом случае плотность распределения ожидаемого числа БС в получаемых конфигурациях описывается выражением (3.14).

Использование имеющейся априорной информации о характере решаемой задачи, при генерации исходного множества вариантов мест установки БС, позволяет сформировать более эффективные начальные конфигурации, с точки зрения поиска решения.

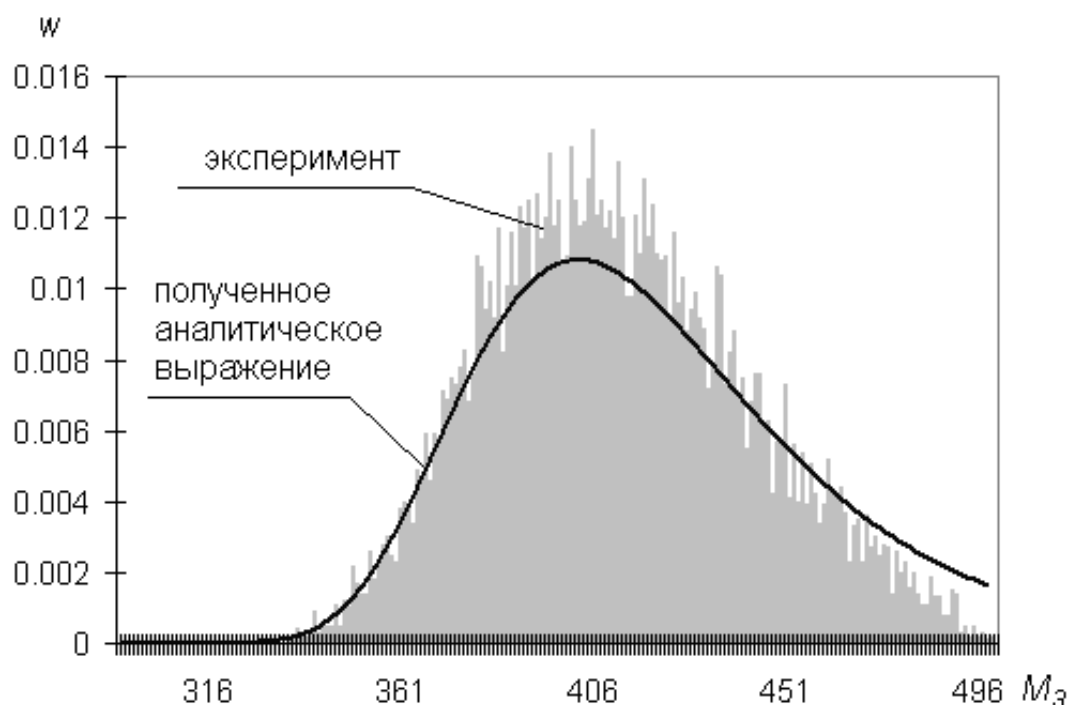


Рис. 5.8. Плотность распределения вероятности ожидаемого числа БС в получаемых конфигурациях, при последовательном “случайном” методе формирования НП.

В данной работе предлагается метод формирования НПГА на основе вероятностной “жадной” эвристики [89, 51]. При этом после каждого шага происходит формирование списка БС в порядке возрастания величины ЦФ при включении данной БС в конфигурацию. На каждом шаге

вероятность выбора БС для включения в конфигурацию зависит от её номера в этом списке, и определяется выражением:

$$p_r = \frac{c-1}{c^n-1} c^{n-r}; \quad r \in \{1, \dots, n\}, \quad (5.19)$$

где r – номер БС в сортированном по возрастанию количества инцидентных ЭУНП, списка БС, которые входят в множество $S_{\text{БС}}$, c – коэффициент ($0 < c < 1$), который определяет степень стохастичности формирования. Средняя стоимость хромосомы, генерируемой вероятностной “жадной” эвристикой зависит от коэффициента c (5.9), при $\mu = 0$ она превращается в классический “жадный” алгоритм, при $\mu = 1$ в метод формирования “случайным” образом. Проведенные эксперименты показали высокую эффективность предложенного метода формирования НППГА основе вероятностной “жадной” эвристики, по сравнению с методом формирования “случайным” способом (рис. 5.9). Анализ результатов работы разработанного метода формирования НППГА показал, что при его применении, в среднем, на 12% сокращается время поиска решения, по сравнению с методом формирования “случайным” образом (рис. 5.14).

График зависимости средней стоимости хромосом M_z , генерируемых вероятностной “жадной” эвристикой, от значения коэффициента μ показан на рис. 5.10. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что расчет вероятностей введения БС предложенным методом, позволяет формировать более эффективные начальные конфигурации, что позволит повысить эффективность работы ГА и получить решения за меньшее время.

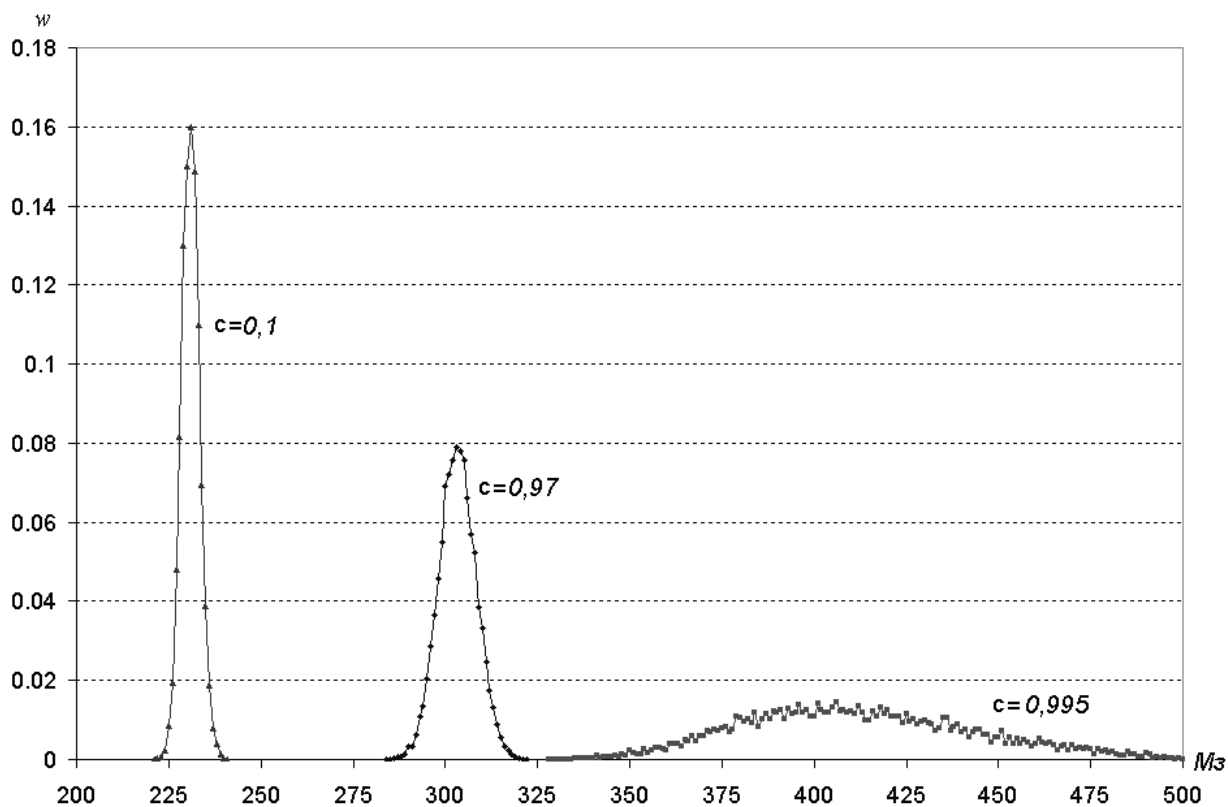


Рис. 5.9. Плотность распределения стоимости конфигураций ПБС сети GSM-R генерируемых предложенной процедурой формирования НПГА, при разных значениях коэффициента c .

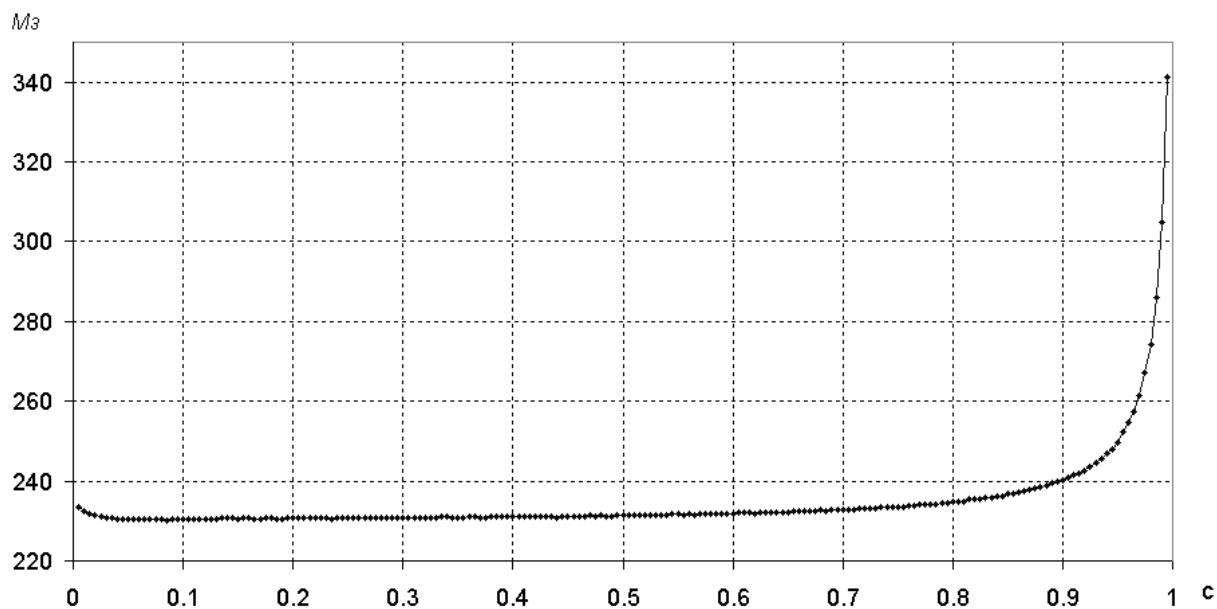


Рис. 5.10. Зависимость средней стоимости хромосом $Mз$, генерируемых вероятностной “жадной” эвристикой, от значения коэффициента c .

5.2.7. Разработка метода оператора восстановления

Существенной проблемой, стоящей на пути использования ГА для определения оптимальных мест установки БС, является высокая вероятность получения конфигурации сети, которая не удовлетворяет условию (2.18) после операций кроссинговера и мутации.

Одним из путей преодоления данной проблемы является выполнение вышеуказанных операторов, в цикле, до тех пор, пока не будет получена разрешенная конфигурация. Однако это существенно увеличивает время поиска решений, а также имеет риск “зацикливания” алгоритма.

Для устранения данного недостатка был разработан дополнительный оператор ГА – оператор “восстановления”, суть работы которого заключается в преобразовании полученной хромосомы в “разрешенную”. Это достигается за счет локальной оптимизации параметров конфигурации БС (азимуты φ_G и углов наклона φ_B антенн) согласно выражению:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m d_i \mid Kd(i) < 2; \varphi_G \in \Phi_G; \varphi_B \in \Phi_B \right\}; \quad (5.20)$$

Или введением дополнительных БС, из множества $S_{БС}$, “жадным” образом. Более того, если в целевую функцию, процедуры локальной оптимизации (5.20) ввести степень соответствующей вершины графа внутрисистемной ЭМС (4.14), то это позволит направить процедуру поиска в сторону уменьшения числа необходимых частотных каналов в соответствующей конфигурации сети.

Если в результате локальной оптимизации конфигураций БС, не удалось достичь выполнения условия (2.18), то в конфигурацию включаются дополнительные БС из множества $S_{БС}$, до тех пор, пока оно не будет выполнено. При этом, выбор конкретной БС происходит на основании максимально возможного покрытия ЭУНП, из ещё покрытых.

5.3. Определение параметров метода ГА определения оптимальных мест установки БС

5.3.1. Исследование влияния вероятности применения мутации на точность и получаемых решений и время их поиска

Для ГА, вероятность попадания в локальный оптимум, в процессе поиска решения, в значительной степени зависит от вероятности p_m применения оператора мутации [13,21,44,71,94]. Другими словами, при увеличении значения p_m возрастает вероятность нахождения глобального экстремума целевой функции. С другой стороны, увеличение вероятности применения оператора мутации приводит к возрастанию времени поиска решения. С целью выявления зависимости точности получаемых решений и времени их поиска, от вероятности мутации, был произведен многократный запуск разработанного ГА, при и разных значениях величины p_m .

Для поиска оптимальной оптимального размещения БС сети GSM-R состоящей из 130 возможным мест установки БС был применен разработанный ГА. После каждого запуска ГА и достижения критерия завершения поиска, производился новый запуск ГА, при этом значение вероятности применения оператора мутации увеличивалось, с шагом 0,01, в интервале от 0,01 до 0,1. Анализ экспериментально полученной зависимости стоимости получаемых ПБС (рис. 5.9), а также времени, необходимого для достижения критерия завершения поиска (рис. 5.12) при разных значениях вероятности применения мутации p_m , позволяет сделать следующие выводы:

- увеличение p_m с 0,01 до 0,04 приводит к уменьшению стоимости полученной ПБС на 6%;
- увеличение p_m более 0,04 не приводит к уменьшению стоимости получаемых решений;
- увеличение p_m с 0,01 до 0,04 приводит к возрастанию времени поиска решения в 2,3 раза (рис. 5.12);

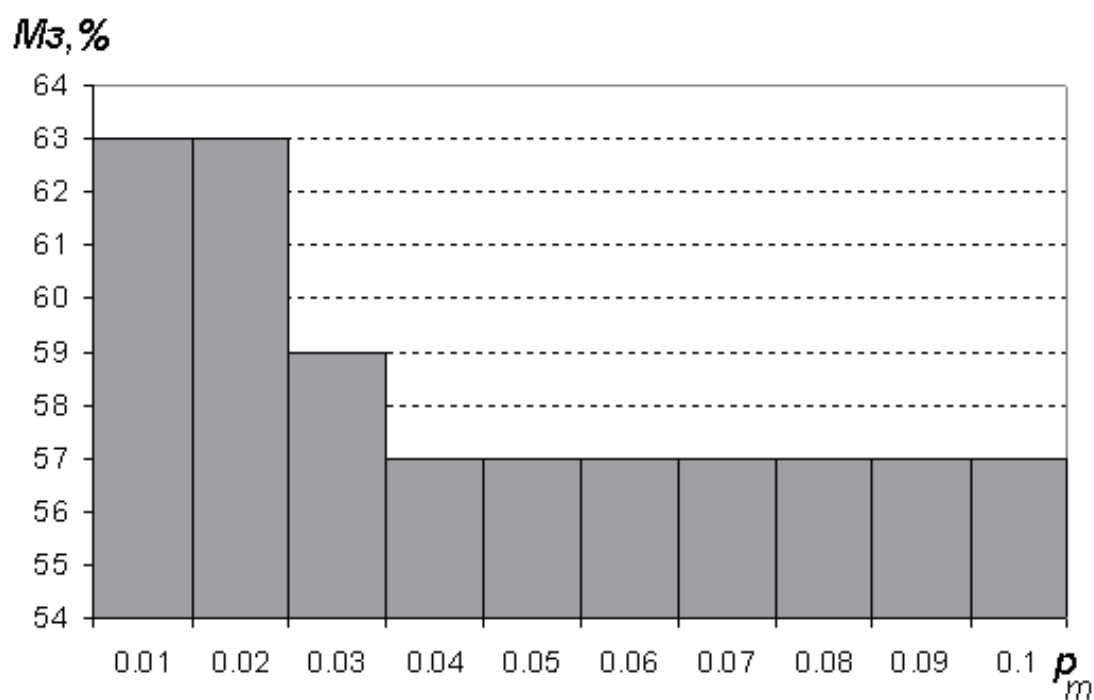


Рис. 5.11. Экспериментально полученная зависимость снижения стоимости полученной ПБС Mz , от вероятности мутации p_m .

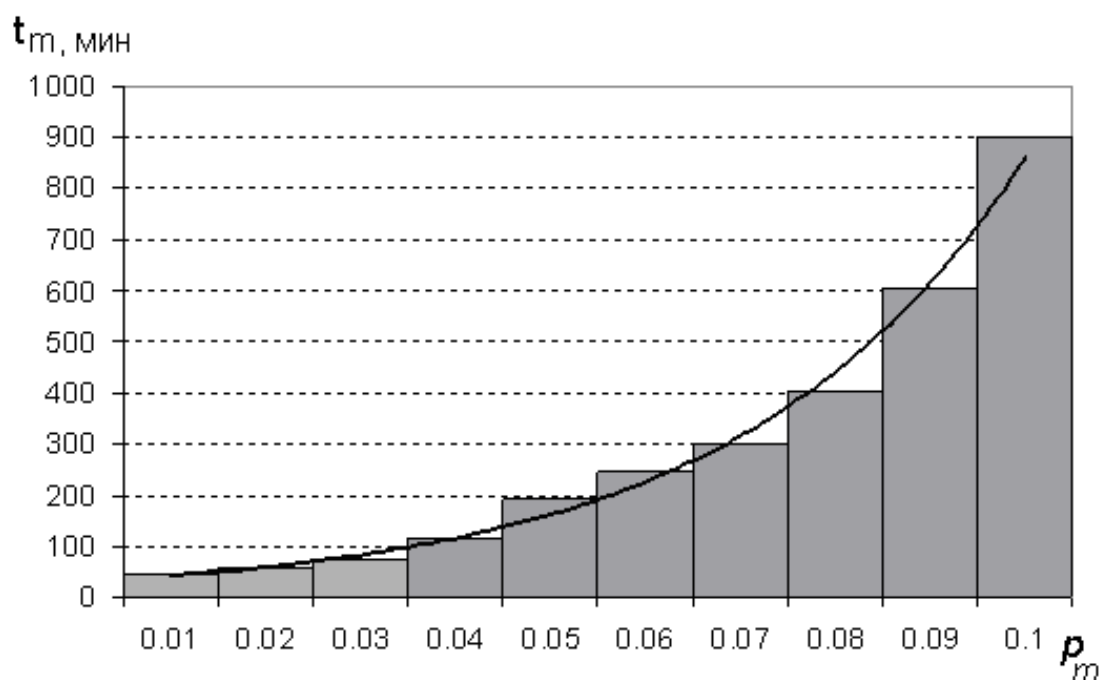


Рис. 5.12. Экспериментально полученная зависимость времени t_m , необходимого для достижения критерия завершения поиска, при разных значениях вероятности применения мутации p_m .

- увеличение p_m с 0,04 до 0,1 приводит к возрастанию времени поиска решения в 6,5 раз (рис. 5.12);

Похожие результаты были получены в работе [71], там же сделан вывод, эти закономерности обусловлены усилением стохастичности поиска решения при увеличении вероятности применения мутации, обеспечивая тем самым поиск по всему пространству возможных решений. В рассмотренном случае оптимальное значение вероятности мутации лежит в пределах 0,05 – 0,07.

5.3.2. Разработка рекомендаций для выбору размера начальной популяции

Проблеме выбора оптимального размера НП посвящено достаточно большое количество работ [77,83,84,92,93,94,97,105,109,115], в которых приводятся теоритические и экспериментальные данные, говорящие о том, что чем большее размер НП, тем лучше найденное решение. С другой стороны, увеличение размера НП приводит к существенному увеличению количества проверок заданных ограничений и вычислений целевой функции. Иначе говоря, размер НП должен быть достаточным, чтобы обеспечить необходимую вероятность нахождения глобального экстремума, и в то-же время обеспечить его нахождение за приемлемое время.

В работе [97] для определения оптимального размера НП предложен подход, основанный на формировании популяции строительных блоков, тпкже показано, что количество обработанных шим, с числом ошибочных генов не выше необходимого значения, пропорционально кубу размера НП. В работе [92] показано, что увеличение размера НП не всегда приводит к увеличению эффективности формирования шим, что подтверждено экспериментально в работе [105]. В работах [92,93] показано, что оптимальный размер НП возрастает экспоненциально с увеличением размера хромосомы l_x :

$$|\beta(0)|_{opt} = 1.65 \times 2^{0.21 \cdot l_x}. \quad (5.21)$$

В тоже время в работах [94, 109] показано, что в некоторых случаях глобальный оптимум может быть получен при использовании НП из 30 - 100 хромосом. В работе [77] показано, оптимальный размер НП лежит в пределах между l_x и $2l_x$. Также отмечается, что оптимальное значение размера НП существенно зависит от типа решаемой задачи, её сложности и типа применяемого оператора кроссинговера. В работах [83,84] показано, что при малых размерах НП, универсальный оператор кроссинговера более эффективен, что подтверждается также и экспериментальными данными (рис. 5.14).

Решаемая задача имеет большую сложность, даже если каждая из БС будет иметь всего одну возможную конфигурацию, размер пространства поиска решений определяется выражением $R = 2^n$, где n – количество мест установки БС. Для рассматриваемого случая сети из 130 потенциальных мест установки БС $R = 2^{130}$. Тогда согласно выражению (5.21) $|\beta(0)|_{opt} = 272648319$, что является неприемлемым при использовании имеющихся вычислительных мощностей. Согласно исследований, изложенных в работах [115,93], достаточно эффективный поиск возможен при размере НП в пределах 300 - 600. Экспериментальные исследования результатов работы ГА при различных размерах НП (рис. 5.13) позволяют сделать вывод о том, что размер НП должен быть не менее $2 \cdot l_x$, что совпадает с результатом полученным в работах [77,71].

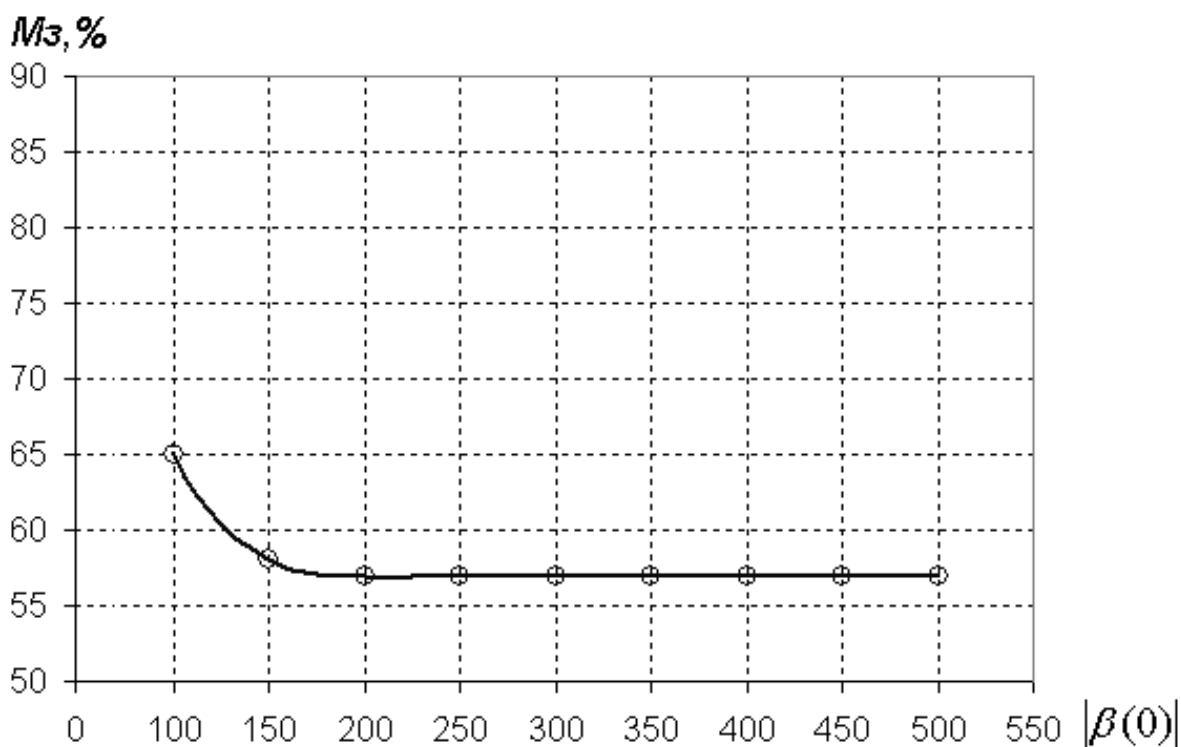


Рис. 5.13. Экспериментально полученная зависимость стоимости полученного решения от размера НП ($n_{\text{BC}}=130$).

5.4. Анализ результатов работы разработанного метода ГА выбора оптимальных мест установки БС сети GSM-R

Для проверки предложенного метода ГА выбора оптимальных мест установки БС сети GSM-R использовались исходные данные, соответствующие Донецкой железной дороге, территориально находящиеся в Донецкой области. На данном участке было найдено 130 возможных мест установки БС. Для прогнозирования ослабления сигнала на трассе распространения использовалась реальная цифровая карта местности с разрешением 20x20 м. На

рис. 5.14 приведен график изменения суммарной стоимости ПБС в процессе работы ГА.

Лучшие конфигурации ПБС в начальной популяции сформированной случайным образом и предложенный методом, а также решения, найденные применением “жадной” эвристики и разработанным методом на основе ГА,

приведены в приложении Б. Это наглядно демонстрирует преимущество конфигурации ПБС, полученной разработанным методом на основе ГА. На рис. 5.15 приведены гистограммы распределения величины математического ожидания, числа сот к каждой точке необходимого покрытия, до и после оптимизации ГА. На

рис. 5.16 показан процесс изменения плотности распределения кратности резервирования радиоканала k_r к ЭУНП d_i , в процессе работы ГА. Анализ результатов моделирования на ЭВМ показал уменьшение стоимости строительства проектируемой сети GSM-R благодаря применению разработанного метода поиска оптимального размещения БС, которое в среднем составило 9,3 %, по сравнению с решением, полученным с помощью “жадного” алгоритма.

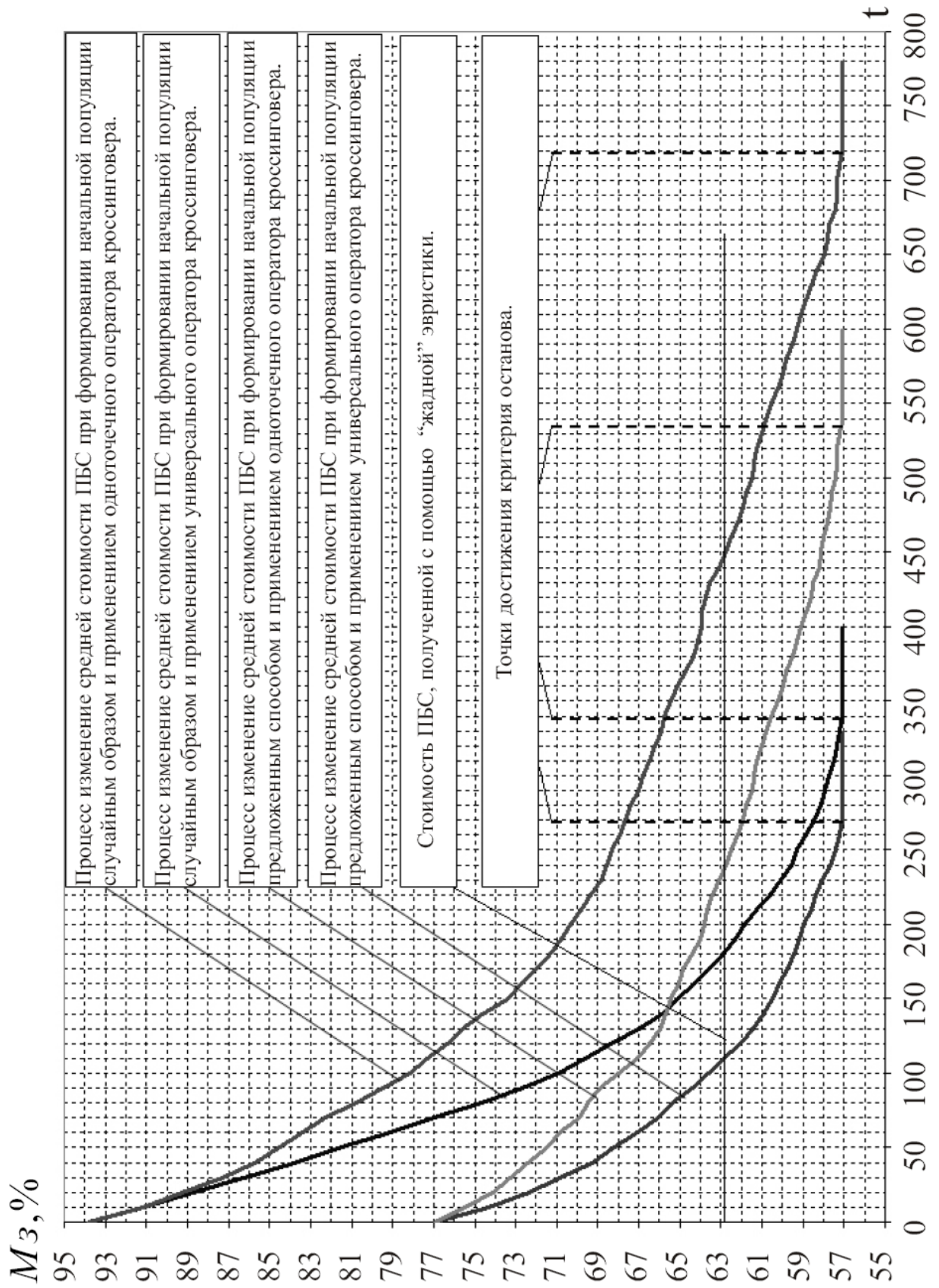


Рис. 5.14. Иллюстрация процесса поиска оптимального расположения БС.

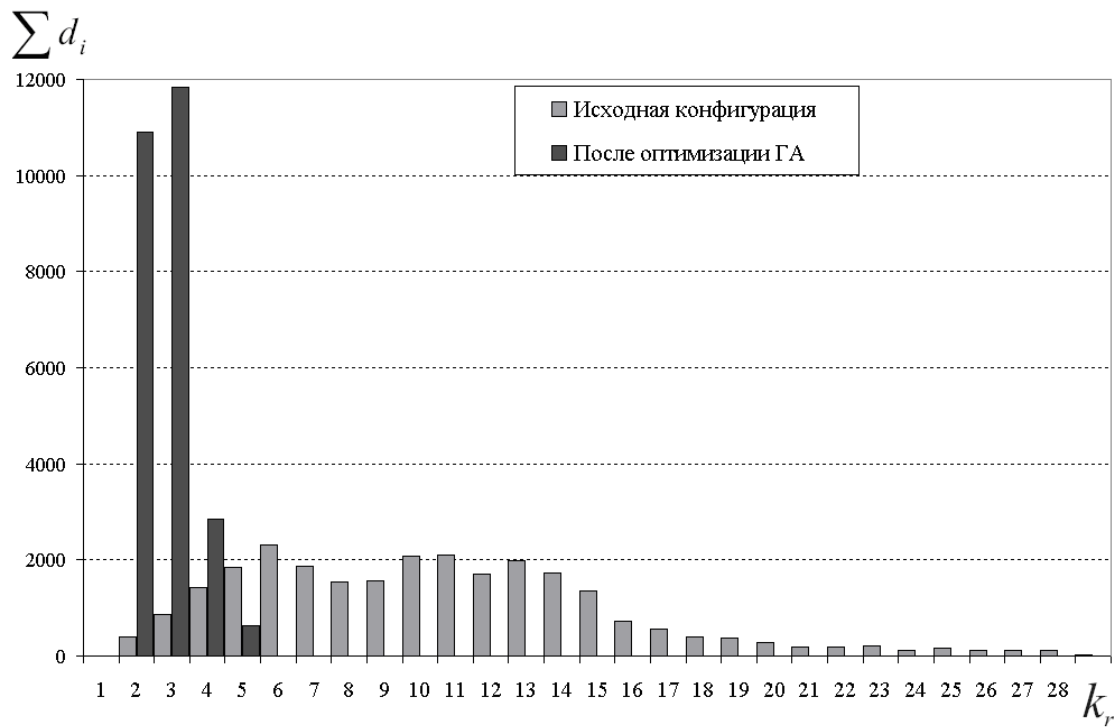


Рис. 5.15. Гистограмма распределения числа радиосот, с возможностью организации радиоканала к случайному ЭУНП, до и после оптимизации ГА.

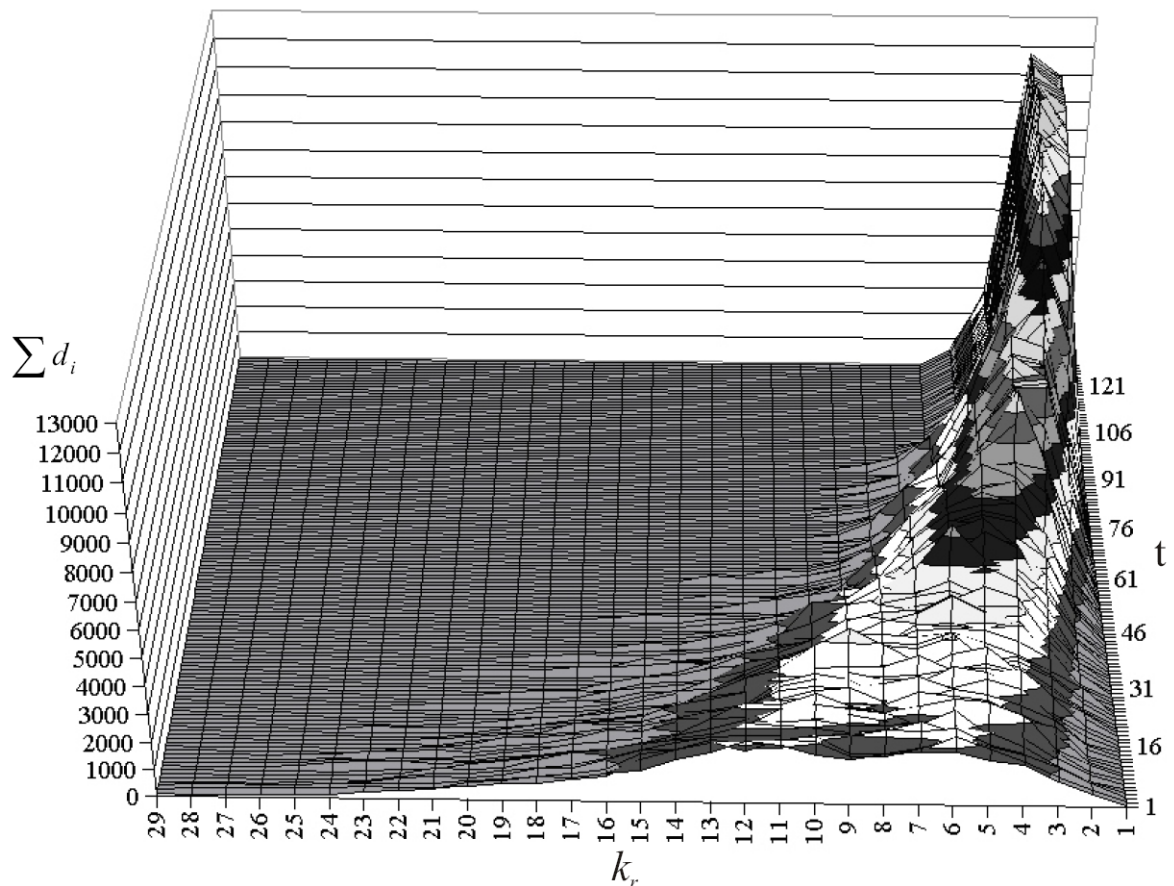


Рис. 5.16. Изменение плотности распределения кратности резервирования радиоканала k_r к ЭУНП d_i , в процессе работы ГА.

Выводы по пятому разделу

1. На основе проведенного сравнительного анализа существующих методов решения задачи об обобщенном (многократном) покрытии множества, сделан вывод о преимуществе ГА перед другими методами поиска решения.

2. Разработан способ кодирования вариантов размещения БС и их конфигурации в хромосому.

3. Разработан метод формирования начальной популяции ГА, учитывающий территориальное распределение ослабления сигнала от БС на местности, что позволило сократить время поиска решения, по сравнению с методом формирования начальной популяции ГА случайным образом.

4. На основе проведенного анализа влияния вида операции селекции на работу ГА, показаны преимущества использования экспоненциального ранжирования.

5. Выполнен анализ различных типов оператора кроссинговера с учетом специфики решаемой задачи, сделан вывод, что для данного варианта ГА универсальный оператор кроссинговера является наиболее эффективным, что также подтверждается полученными результатами моделирования на ЭВМ.

5. Показано, что увеличение вероятности применения оператора мутации приводит к возрастанию точности получаемых решений, но увеличивает время поиска решения. Проведенные исследования с применением имитационного моделирования на ЭВМ позволили выработать рекомендации по выбору оптимальной вероятности применения оператора мутации ($p_m=0,05\div 0,07$).

6. Предложен вспомогательный оператор ГА – оператор “восстановления”, суть работы которого заключается в преобразовании полученной хромосомы в “разрешенную”. Это достигается за счет локальной

оптимизации конфигурации сот БС (азимутов, углов наклона и высоты подвеса антенн) или введением дополнительных БС.

7. Проведен анализ влияния размера начальной популяции на точность решений, полученных разработанным методом поиска оптимального размещения БС, который базируется на принципах ГА. На основании полученных зависимостей выработаны рекомендации к выбору размера начальной популяции: $R = 2 \cdot |S_{BC}|$.

8. По результатам моделирования на ЭВМ, уменьшение стоимости строительства проектируемой сети GSM-R благодаря применению разработанного метода поиска оптимального размещения БС, в среднем составляет 9,3 %, по сравнению с решением, полученным с помощью “жадного” алгоритма.

ВЫВОДЫ

В диссертации приведено теоретическое обобщение и решение научной задачи, которая заключается в разработке метода автоматизированного ЧТП сетей ЖТП стандарта GSM-R, который позволяет получать оптимальные, по критерию минимальной стоимости, конфигурации сети. Основные научные результаты, выводы и практические рекомендации работы следующие:

1. Выполнена формализация задачи ЧТП сети ЖТП стандарта GSM-R, анализ которой показал, что она принадлежит к классу задач дискретной оптимизации о многократном покрытии множеств с дополнительными ограничениями и содержит в себе две подзадачи, которые являются *NP*-полными. Вектором ограничений этой задачи являются заданные показатели качества, а целевая функция – стоимость сети, уменьшение которой возможно путем определения оптимального размещения БС. Размер пространства поиска поставленной задачи не позволяет использовать точные методы для нахождения минимума целевой функции за разумное время. Для уменьшения вычислительной сложности поставленной задачи применен метод декомпозиции, и разработанная методика приближенного решения задачи ЧТП, на основании которой выделен перечень задач, нуждающихся в анализе и решении: задача прогнозирования потерь радиосигнала при распространении, задача поиска оптимального размещения БС, задача формирования групп частотных присвоений передатчикам БС для обеспечения ЭМС.

2. Получено аналитическое выражение зависимости ожидаемого количества необходимых БС сети GSM-R, на основе которого разработан метод оценки влияния погрешности прогнозирования потерь при распространении радиосигнала, на точность получаемых решений. Это позволяет приводить сравнительный анализ разных методик прогнозирования ослабления радиосигнала на трассе распространения, и определять степень их влияния на эффективность ЧТП сетей подвижной

радиосвязи с нерегулярной сотовой структурой. Результаты оценки существующих методик прогнозирования ослабления сигнала на трассе распространения, показали, что наиболее пригодный, в данном случае, является метод Окамуры-Хата. Оценка дальности связи при высоких требованиях к вероятности обеспечения минимального уровня сигнала ($0,95 \div 0,99$), приводит к значительному (2-3 раза) увеличению количества необходимых БС, что увеличивает стоимость сети GSM-R. Для увеличения точности прогноза предложено использование нейронной сети для автоматизированного анализа профиля трассы и частичного прогнозирования медленных замираний.

3. На основе экспериментальных данных определена зависимость уровня битовых ошибок на входе речевого кодека от соотношения сигнал/помеха в радиоканале GSM, на основании которой получена величина минимально-допустимого значения сигнал/помеха по основному и соседнему каналам, которые составили 14 дБ и -2дБ соответственно. Для обеспечения внутрисистемной ЭМС сети GSM-R разработан метод формирования групп частотных присвоений передатчикам БС, который объединяет в себе случайный и адаптивный поиск. Анализ результатов практического применения разработанного метода показал, что он позволяет уменьшить количество необходимых частотных каналов на 20% в более чем 90% случаев, что способствует более рациональному использованию радиочастотного ресурса.

4. Разработан метод автоматизированного поиска оптимального размещения БС сети GSM-R, на основе ГА. В процессе его разработки были решены следующие задачи:

- разработан способ кодирования вариантов размещения БС и их конфигурации в хромосому;
- разработан метод формирования начальной популяции ГА, учитывающий территориальное распределение ослабления сигнала от БС на местности;

- проведен сравнительный анализ различных видов операции селекции, на основании которого выбрана селекция с экспоненциальным ранжированием;

- проведен анализ различных типов оператора кроссинговера, на основании которого выбран универсальный оператор кроссинговера;

- даны рекомендации по выбору оптимальной вероятности применения оператора мутации ($p_m=0,05\div 0,07$).

- предложен вспомогательный оператор ГА – оператор “восстановления”, который позволил обеспечить получение допустимых конфигураций сети после операций кроссинговера и мутации за счет использования локальной оптимизации параметров сот или введением дополнительных БС;

- проведен анализ влияния размера начальной популяции на точность получаемых решений, на основании которого, выработаны рекомендации к выбору размера начальной популяции: $R = 2 \cdot |S_{БС}|$.

Вышеизложенные пункты являются составляющими метода 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.

Полученные научно-практические результаты используются в учебном процессе Украинской государственной академии железнодорожного транспорта и при выполнении работ по улучшению качества покрытия сети GSM на основных железнодорожных направлениях, ЗАО “Украинская мобильная связь”. Внедрение результатов работы подтверждается соответствующими актами.

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. Безлюдников О.Л. Автоматизация анализа рельефа местности при расчете напряженности поля радиосигналов / О.Л. Безлюдников, С.А. Деревянко, С. А. Севостьянов, А.Г. Тарасенко, А.М. Томин // Радиотехника: № 9, 2001. С 86-88.
7. 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.
8. Боровиков В. П. Нейронные сети. Statistica Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / В. П. Боровиков. – М. : Горячая Линия-Телеком, 2008. – 392 с.
9. Быков Ю.С. Теория разборчивости речи в линиях связи. / Быков Ю.С. - М. : Научный институт самолетного оборудования , 1963 – 228с.

10. Ваванов Ю. В. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств на железнодорожном транспорте / Ваванов Ю. В. - Автоматика, телемеханика и связь, 1984, № 5, с. 42-46
11. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель М.-Наука, 1969 – 678 с.
12. Винокуров В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Винокуров В.И., Винофадов Е.М., Харченко И.П. — Л.: Судостроение, 1986. – 389 с.
13. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Гладков Л.А., Курейчик В.В. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006.- 320 с.
14. Головин Э.С. Мультипликативные помехи в сетях железнодорожной радиосвязи / Э.С. Головин – М.: Транспорт, 1985. – 200 с.
15. 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
16. Горелов Г.В. Системы связи с подвижными объектами: Учеб. Пособие / Горелов Г.В., Загарий Г.И. – Х.:ЧП издательство “Новое слово”, 2003. – 200 с.
17. ГОСТ 16600-72 Передача речи по трактам радиотелефонной связи. Требования к разборчивости речи и методы артикуляционных испытаний. -М.: 1972-125с.
18. Державна програма реформування залізничного транспорту на 2008-2015 роки, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2006р. № 651-р.
19. Джейсуол Н. Очереди с приоритетами. / Джейсуол Н. - М.: Мир, 1973. - 280 с.
20. Дядюнов А.Н. 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.

21. 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
22. Еремеев А. В. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования / А. В. Еремеев, Л. А. Заозерская, А. А. Колоколов // Дискретный анализ и исследования операций: Серия 2. Том 7, № 2, 2000. С. 22-46
23. Зайченко Ю. П. Структурная оптимизация сетей ЭВМ / Зайченко Ю. П., Гонта Ю. В. – К.: Техніка, 1986. – 168 с.
24. 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.
25. Зыков В.И. Оценка функционирования технологической радиосвязи в системе транспорт / Зыков В.И. - Автоматика, телемеханика и связь, 1982, № 7, с. 42-46
26. Калан Р. Основные концепции нейронных сетей / Калан Р : Пер. с англ. – М.:Издательский дом “Вильямс”, 2001. -286 с.
27. Кернов Ю.П. Проектирование мобильных радиосистем / Кернов Ю.П. - М.: МГУПС, 2000.- 90с.
28. Ковалев М.М. Дискретная оптимизация / Ковалев М.М. – М.: Едиториал, 2003. – 192 с.
29. Концепція Національної програми інформатизації, схвалена Законом України «Про Концепцію Національної програми інформатизації» від 4 лютого 1998 р. N 75/98-ВР.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Кристофидес Н. Теория графов (алгоритмический подход) / Кристофидес Н. — М.: Мир, 1978. — 432 с.
34. 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.
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. — 213 с.

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. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко - Астрахань : Издательский дом "Астраханский университет", 2007. - 87с.
45. 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, 2006. – 132 с.
46. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM / Попов В.И. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
47. Р 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 оптимального присвоения частот сети технологической радиосвязи стандарта GSM-R / А.С. Саенко // АСУ и приборы автоматики. – Харьков, ХНУРЕ, 2008. – Вып. 143. С. 68 - 73.
- 54.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.
- 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., Експериментальне 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 / В.В. Соловьев - 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. С. 35-24.
74. Яньшин С.Н. Эффективность алгоритмов раскраски графа в задачах оптимального присвоения частот / С.Н. Яньшин, Т.В. Харченко, Д.В. Володин, С.А. Сорокин // Электросвязь, № 1, 2004. С. 31-32.
75. Ajay M. Advanced Cellular Network Planning and Optimisation / Ajay Mishra - John Wiley & Sons. 2007 – 470p.
76. Ajay M. Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G / Ajay M. - 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. Blicke T. Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms / T. Blicke, L. Thiele - TIK-Report 11/12/95. – 16 p.

79. Chvatal V. A greedy heuristic for the set-covering problem / V. Chvatal // Mathematics of Oper. Res. 1979. V. 4, N 3. P. 233-235.
80. 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. – 21 p.
81. Davis. L. Handbook of Genetic Algorithms / L. Davis. - Van Nostrand Reinhold, 1991, 385 p.
82. De Jong K. A. An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems / K. A. De Jong - Doctoral thesis, Dept. Computer and Communication Sciences, University of Michigan, Ann Arbor. 1975, 312 p.
83. De Jong K.A. A formal analysis of the role of multi-point crossover in genetic algorithms / K.A. De Jong, W.M. Spears // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. - № 5(1) –1992, P. 1–26.
84. De Jong, K.A. An Analysis of the Interacting Roles of Population Size and Crossover/ K.A. De Jong, W.M. Spears // Proceedings of the Int'l Workshop Parallel Problem Solving from Nature. 1990. – P. 38-47.
85. Diffraction over irregular terrain // Recommendation ITU-R P.526-4: Geneva: ITU, 1996. – 9 p.
86. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+) ETS 100 974 GSM 09.02 v. 7.5: Mobile Application Part (MAP) Specification July 2000 – 32 p.
87. Eisenblatter A. Frequency Assignment in GSM Networks: Models, Heuristics, and Lower Bounds / Andreas Eisenblatter - PhD thesis, Technische Universität Berlin, Fachbereich Mathematik, Berlin, Germany, 2001. – 227p.
88. European Integrated Railway Radio Enhanced Network. System Requirements Specification. CLA111D004 2003. - 131 p.
89. Feo T. A. Greedy randomized adaptive search procedures / T.A. Feo // J. Global Optim. 1995. V. 6. P. 109-133.
90. 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. — Название с экрана.

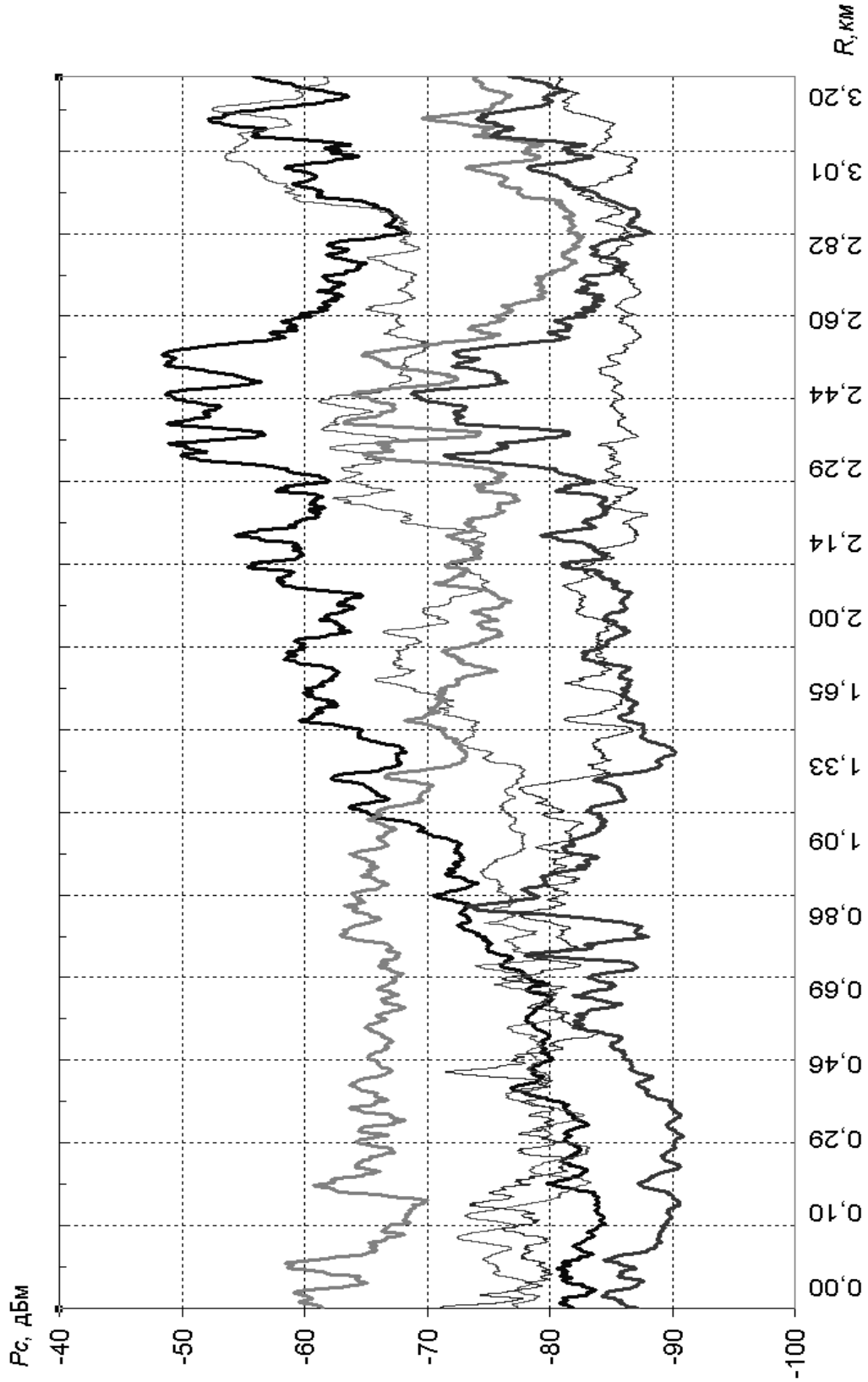
91. Gamst A. Some lower bound for a class of frequency assignment problems / A. Gamst // IEEE Trans. Veh. Technol., VT-35, Feb. 1986. P. 8-14.
92. Goldberg D.E. Optimal initial population size for binary-coded genetic algorithms (Report №.85001) / D.E. Goldberg // Tuscaloosa: University of Alabama, The Clearinghouse for Genetic Algorithms. 1985. – 17 p.
93. Goldberg D.E. Sizing population for serial and parallel genetic algorithms / D.E. Goldberg // Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, 1989. –P. 70-79.
94. Grefenstette J. J. Optimization of control parameters for genetic algorithms / J. J. Grefenstette // IEEE-SMC, SMC-16, 1986. – P. 122-128.
95. GSM advanced cell planning. EN/LZT 1235333. Ericsson Radio Systems AB 2005. – 27 p.
96. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services / M. Hata // IEEE Trans. Vehicular Technol., VT-29(3), 1980. – P. 317 – 325.
97. Holland J. Genetic algorithms and the optimal allocations of trails / J. Holland // SIAM Journal of Computing, 2(2), 1973. –P. 88-105.
98. Johnson D. S. Approximation algorithms for combinatorial problems / D. S. Johnson // J. Comput. System Sci. 1974. V. 9, N 3. P. 256-278.
99. Kunz D. Channel assignment for cellular radio using neural networks / D. Kunz, IEEE Trans. Veh. Technol., VT-34, Feb. 1991, p. 188-193
100. Laster J. D. Robust GMSK demodulation using demodulator diversity and BER estimation / J. D. Laster // Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997. – 241p.
101. Lovasz L. On the ratio of optimal integral and fractional covers / L. Lovasz // Discrete Math. 1975. V. 13, N 4. P. 383-390.
102. Marvin K. S. Digital Communication over Fading Channels / K. S. Marvin - John Wiley & Sons, Inc., publication 2004. – 902p.
103. Mentum-Planet Brochure [Электронный ресурс] // Сайт компании Mentum. – Режим доступа: <http://www.mentum.com/uploads/documents/Mentum-Planet-Brochure.pdf>.— Название с экрана.

104. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz// ITU-R R. P.1546-1. Geneva: ITU, 2003. – 12 p.
105. 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.
106. Radio network planning aspects ETSI TR 101 362 GSM 03.30 v8.4.0 Release 1999, - 43 p.
107. RPS2: Radio Planning System 2 [Электронный ресурс] // Сайт компании «Связь-Телеком-Софт». — Режим доступа: <http://www.rps2.ru/>. — Название с экрана.
108. Sauthier E. GSM-R Network Planning / Eric Sauthier - GSM-R centre of competence for network planning. GSM-R TS Workshop - Stockholm 2004. - 23 p.
109. Schaffer J.D. A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization. In Proceedings of 3rd International Conference on Genetic Algorithms / J.D. Schaffer, R.A. Caruana, L.J. Eshelman // Morgan Kaufmann, Los Altos, CA. 1989.
110. Siomina I. Radio Network Planning and Resource Optimization: Mathematical Models and Algorithms for UMTS, WLANs, and Ad Hoc Networks / Iana Siomina - Dissertations Linköping Studies in Science and Technology, Sweden, 2007. – 229 p.
111. Srinivasan A. Improved approximation guarantees for packing and covering integer programs / A. Srinivasan / J. Comput. 1999. V. 29, N 2. P. 648-670.
112. Stocker K.E. Neural network approach to prediction of terrestrial wave propagation for mobile radio / K.E. Stocker, F.M. Landstorfer, B.E. Gschwendtner // IEEE trans, Vol. 140, No. 4, Aug. 1993. P. 315 – 320.
113. Stocker, K.E. Empirical prediction of radio wave propagation by neural network simulator / K.E. Stocker, F.M. Landstorfer // Electron. Lett., 1992, №28, pp. 724-726.

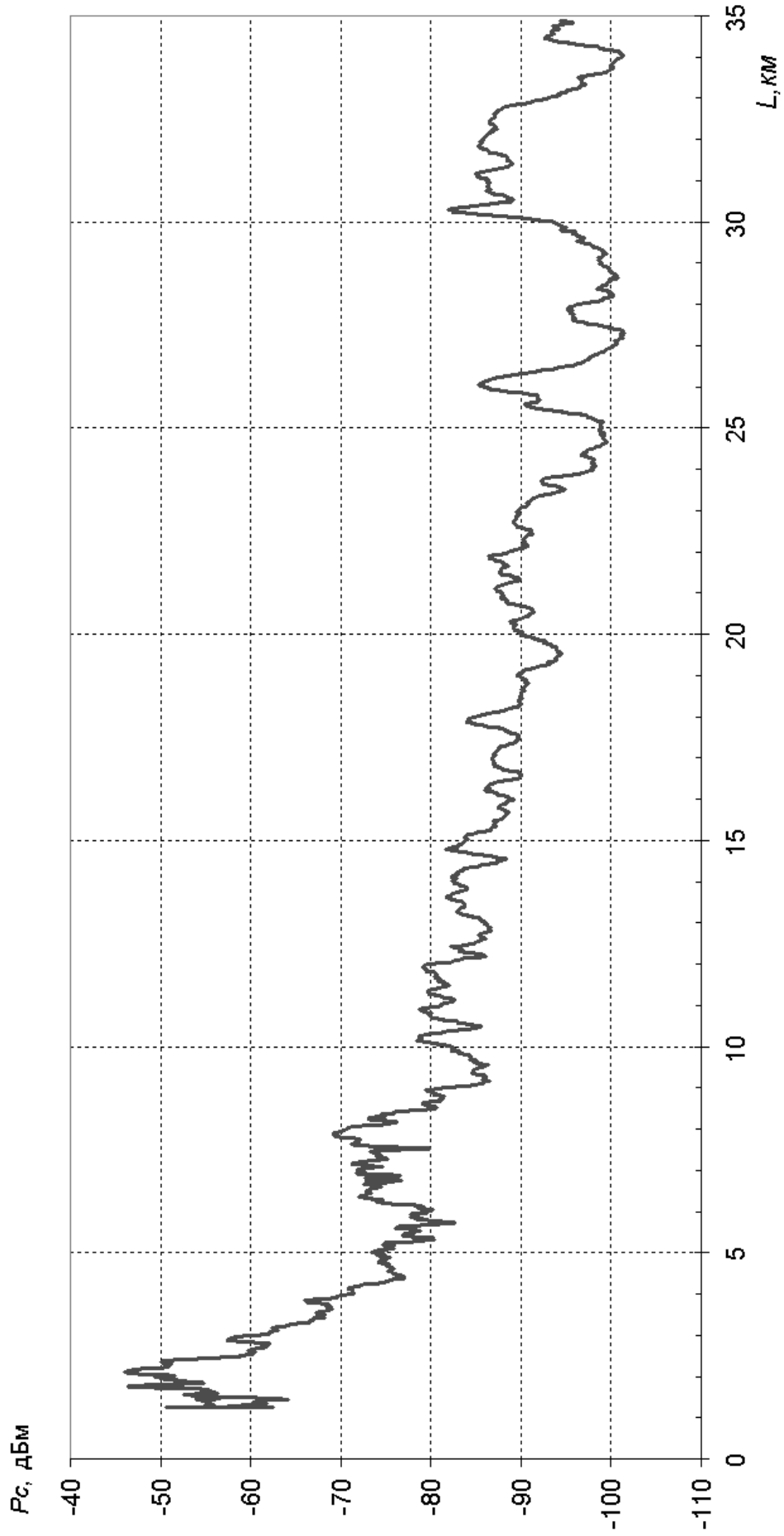
114. Syswerda G. Uniform Crossover in Genetic Algorithms / G. Syswerda // Proc. 3rd Int'l Conference on Genetic Algorithms : Morgan Kaufman Publishing. 1989. P 2-9.
115. Tsoy Y.R. The Influence of population size and search time limit on genetic algorithm / Y.R. Tsoy // Proceedings of the 7-th Korea – 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. On the Optimization of Monotone Polynomials by Simple Randomized Search Heuristics / I. Wegener, C. Witt // Technical Report ISSN 1433-3325, October 2002.- 25 p.
118. William M. An Analysis of Multi-Point Crossover / M. William, A. Kenneth // In Proceedings of the Foundations of Genetic Algorithms Workshop, Bloomington, IN. 1990. P. 1-26.
119. Xuemin H. Automatic Cell Planning for Mobile Network Design: Optimization Models and Algorithms / H.Xuemin - PhD thesis: Universitat Karlsruhe. - 2001. - 198 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

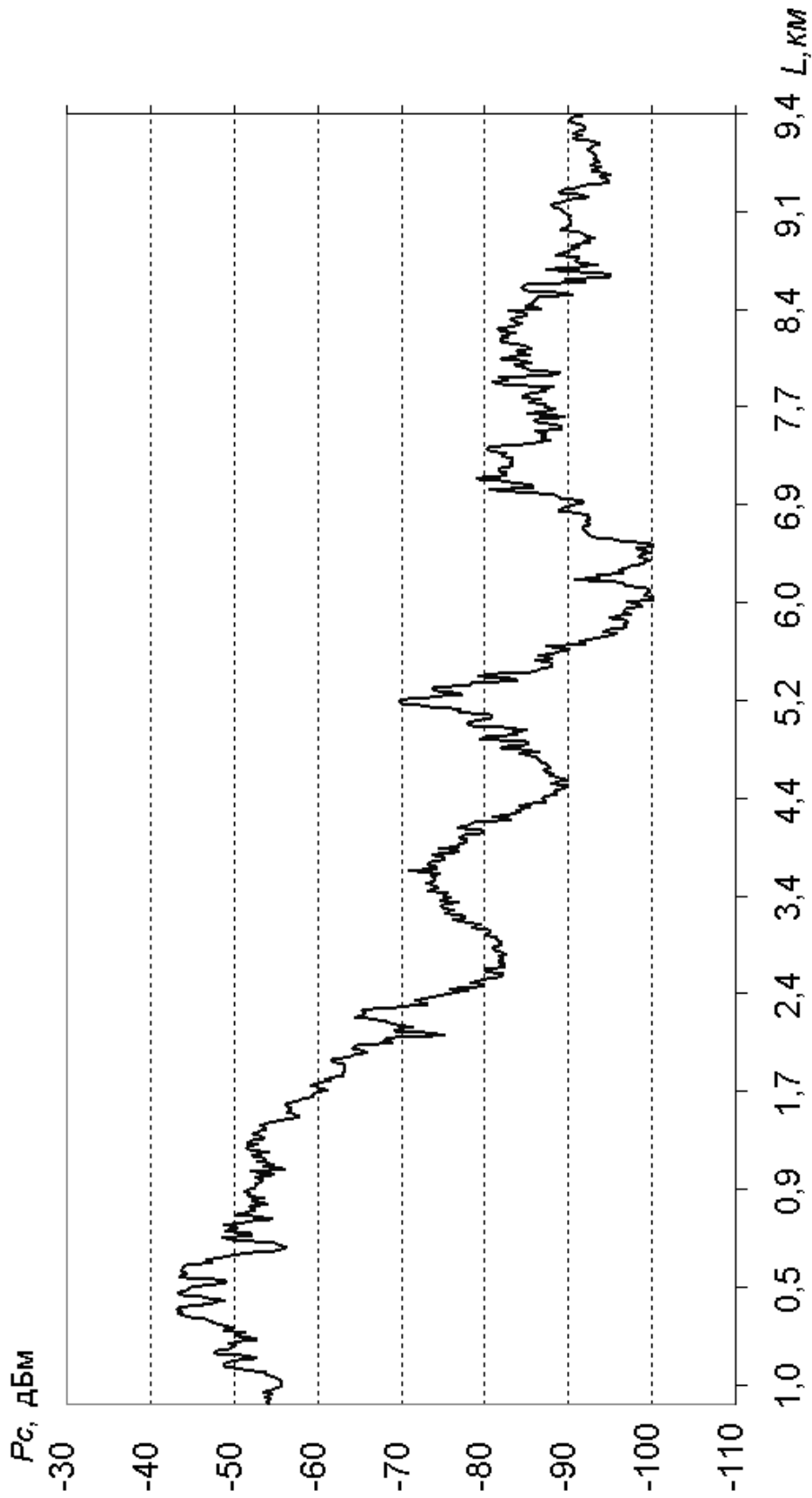
Графики записи уровня сигнала от БС сети GSM-900 в условиях железных дорог.



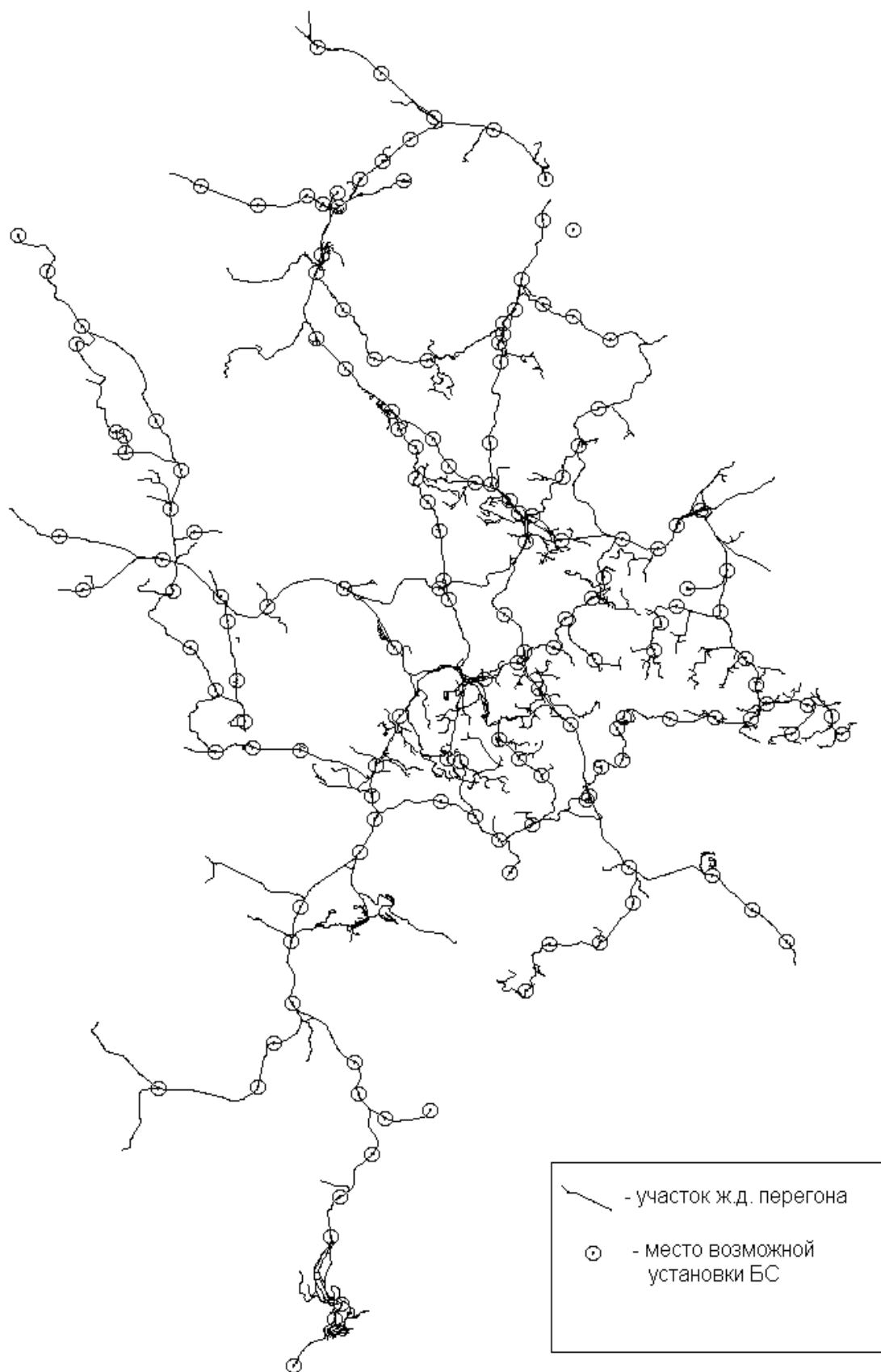
Запись уровня сигнала от БС на станции Ясиноватая.



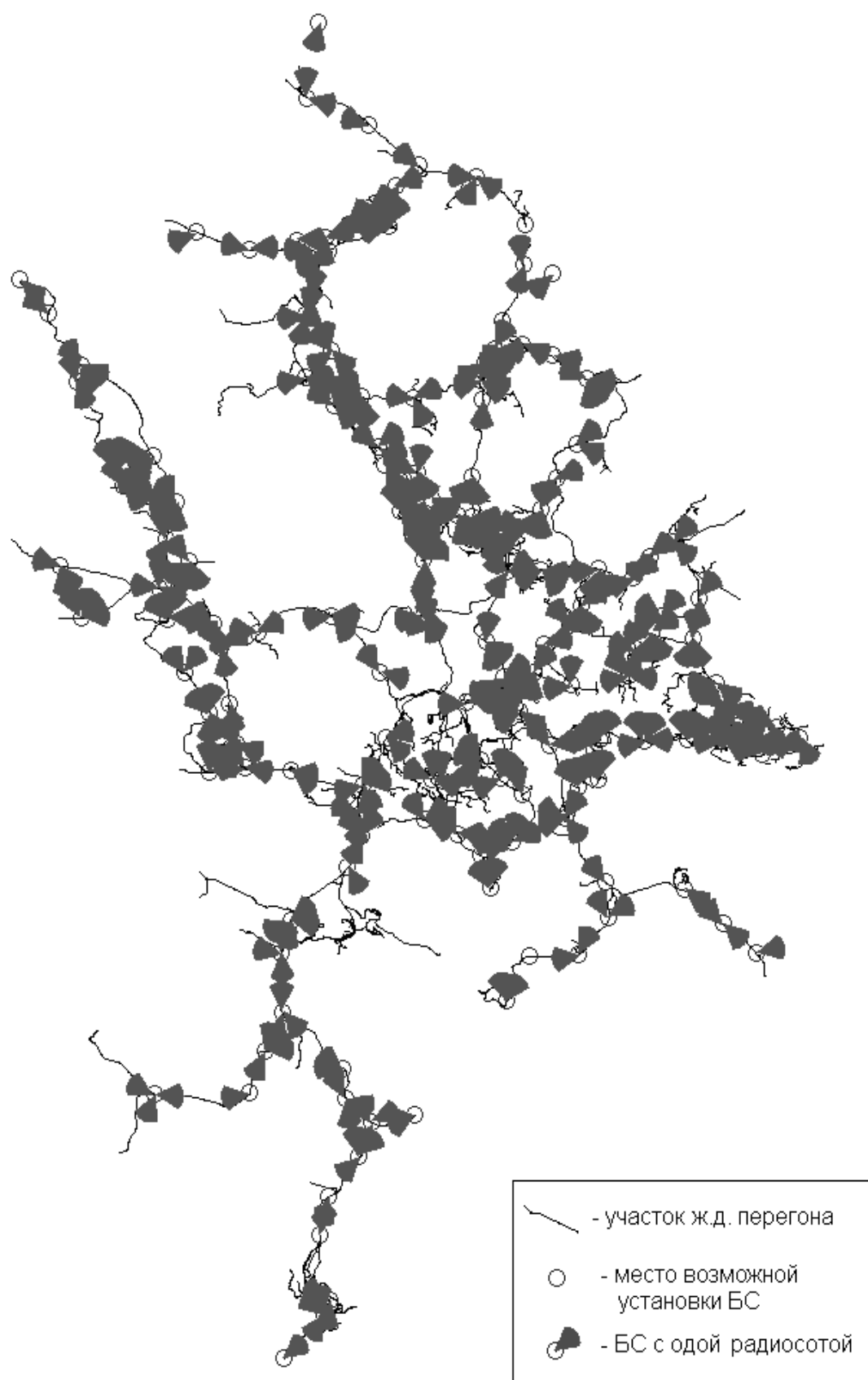
Фрагмент записи уровня сигнала на участке Луганск-Старобельск.



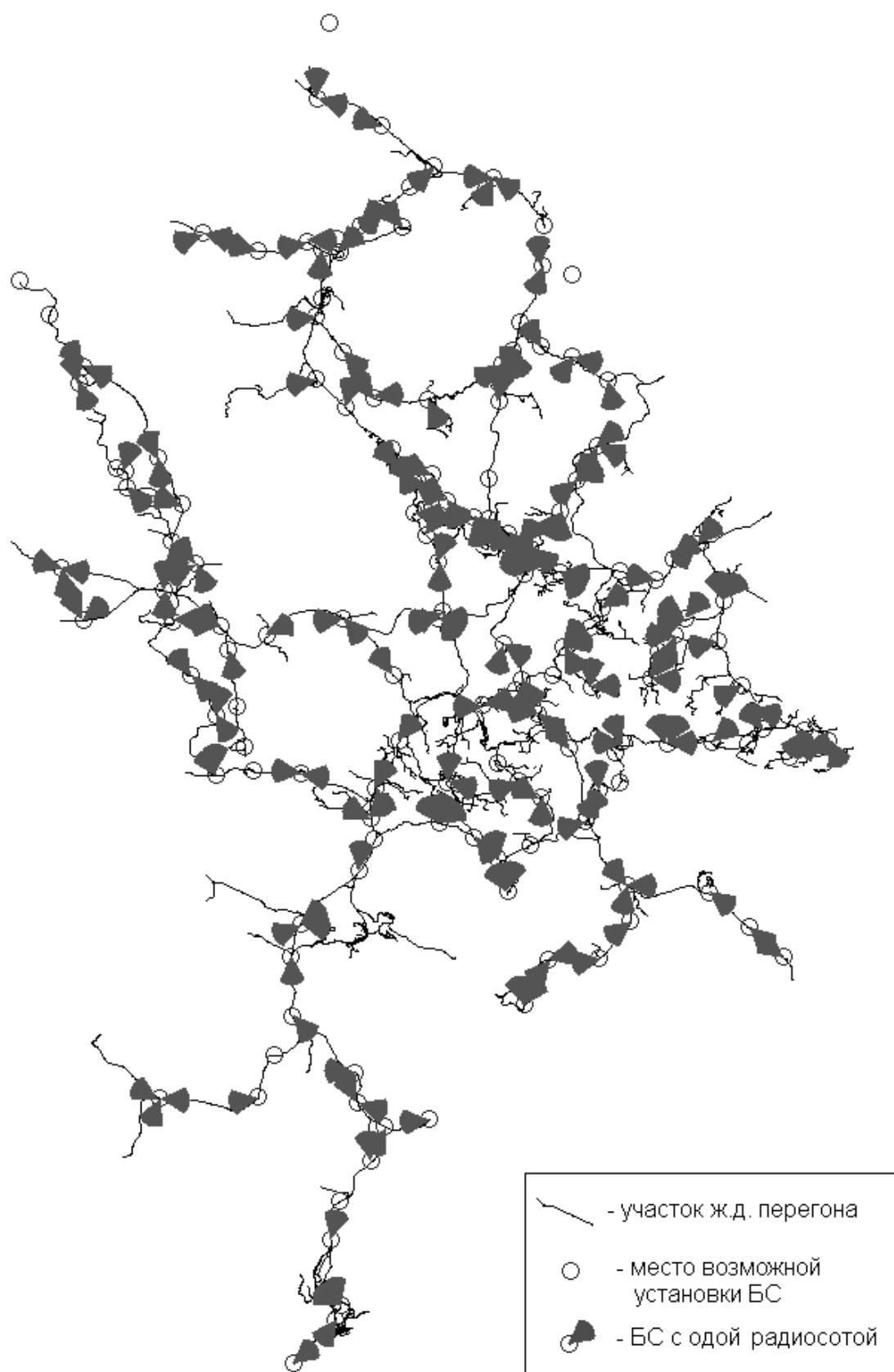
Фрагмент записи уровня сигнала на участке Донецк-Волноваха.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

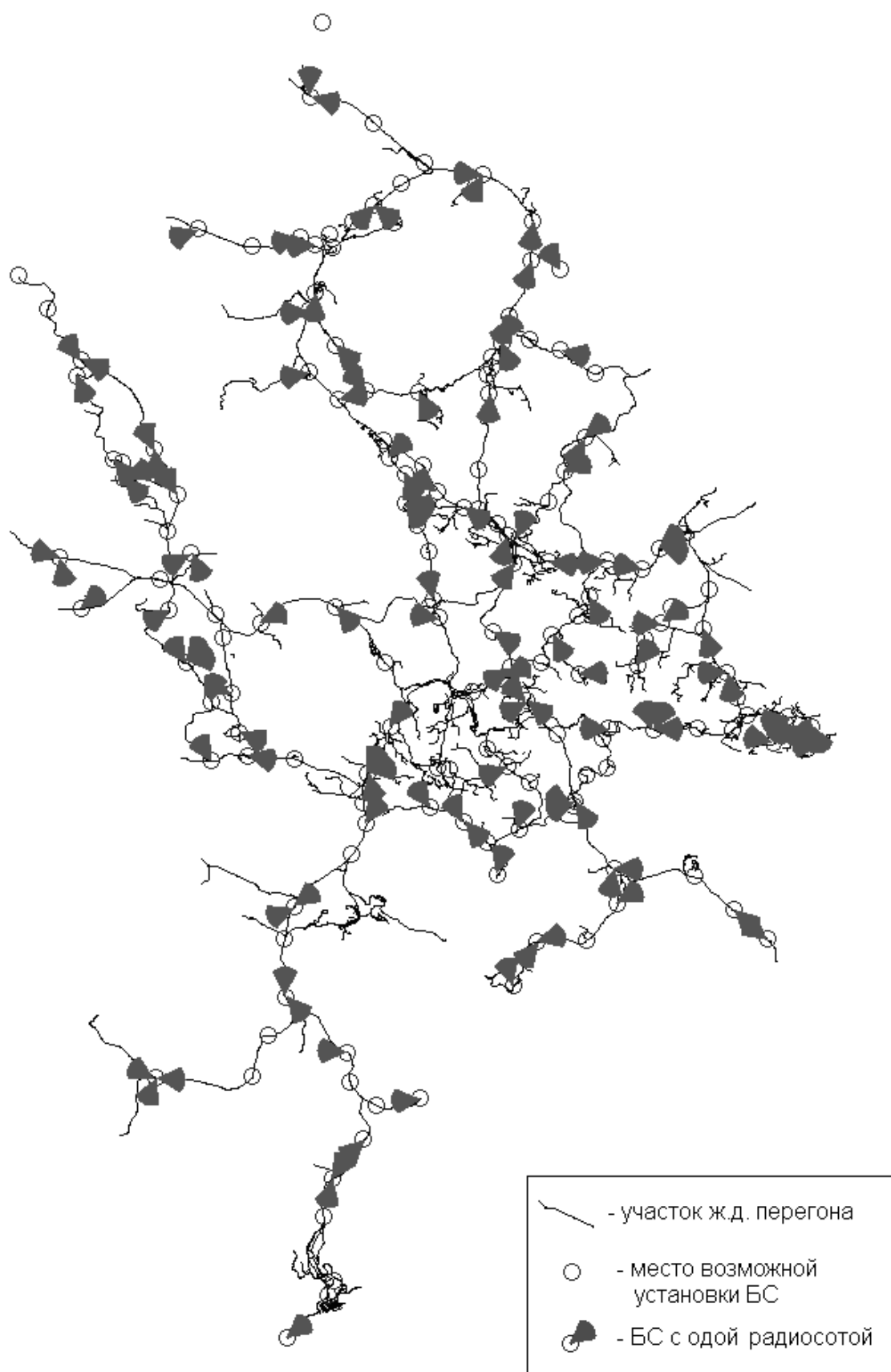
Исходные данные для тестовой задачи поиска оптимального размещения БС сети GSM-R.



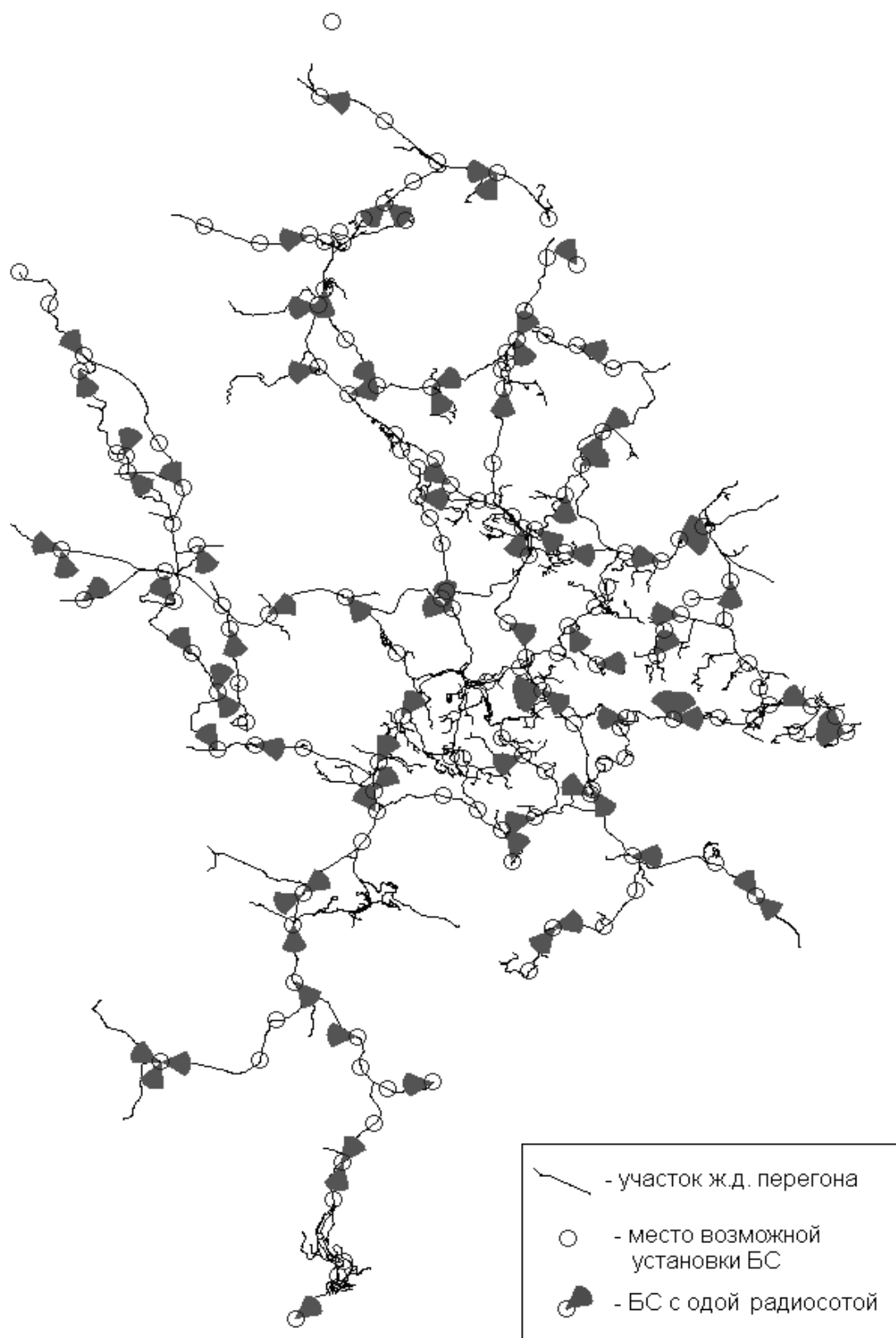
Лучшая конфигурация ПБС в начальной популяции ГА поиска оптимального размещения БС сети GSM-R, сформированная случайным способом.



Лучшая конфигурация ПБС в начальной популяции ГА поиска оптимального размещения БС сети GSM-R, сформированная предложенным методом.



Конфигурация ПБС сети GSM-R полученная при помощи “жадной” эвристики.



Конфигурация ПБС сети GSM-R полученная с помощью разработанного метода на основе ГА.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Технічний директор ЗАТ«УМЗ»
Д. Хаули



А К Т

Про впровадження результатів
дисертаційного дослідження
Саєнко Олександра Сергійовича

Комісія у складі: голова Полтавець Юрій Вікторович (начальник відділу оптимізації), члени комісії: Труш Андрій Олегович (керівник групи оптимізації радіомережі), Калкатін Дмитро Омелянович (керівник групи якості мережі та послуг), склали даний акт про те, що результати дисертаційного дослідження Саєнко Олександра Сергійовича на тему «*Метод автоматизованого частотно-територіального планування мереж стандарту GSM-R*» використовуються в діяльності ЗАТ «Український мобільний зв'язок», у наступному виді:

1. Експериментальних даних по дослідженню впливу інфраструктури залізниці на якість покриття мережі стандарту GSM.
2. Технічних пропозицій по виконанню оптимізації частотного плану мережі GSM.
3. Методу коректування моделі прогнозування втрат, при поширенні радіосигналу, для урахування впливу інфраструктури заліниць.
4. Рекомендацій до оптимізації параметрів мережі та визначення оптимальних місць установки додаткових базових станцій стандарту GSM за допомогою запропонованого методу автоматизованого пошуку їхнього оптимального розміщення, з метою поліпшення покриття мережі заліниць.

Використання зазначених результатів дозволяє: підвищити якість проектування та ефективність використання технічного забезпечення; скоротити витрати на проведення робіт з будівництва та оптимізації мережі GSM.

Голова комісії
начальник відділу оптимізації

Ю. В. Полтавець

Члени комісії:
керівник групи
оптимізації радіомережі

А. О. Труш

керівник групи якості
мережі та послуг

Д. О. Калкатин

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної
Роботи УкрДАЗТ

Ю.М.Юрченко

2008 р.



АКТ

ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційного дослідження

Саєнка Олександра Сергійовича

на тему «Метод автоматизованого частотно-територіального планування мереж стандарту GSM-R» у навчальному процесі Української державної академії залізничного транспорту

Результати дисертаційної роботи Саєнка О.С. такі як:

- метод автоматизованого пошуку, за критерієм мінімуму матеріальних витрат, розміщення базових станцій мереж GSM-R;
 - метод призначення частот з застосуванням процедури комбінованих евристик;
 - статистичний метод прогнозування втрат радіосигналу на частоті 900МГц заснований на основі нейронної мережі
- використовуються у навчальному процесі при підготовці бакалаврів, спеціалістів та магістрів за спеціальностями «Телекомунікаційні системи та мережі», «Автоматика та автоматизація на транспорті» при викладанні дисциплін «Оперативно-технологічний радіо та телефонний зв'язок на залізничному транспорті», «Радіотехнічні системи залізничного транспорту» та «Системи електричного зв'язку і радіо»

Декан факультету

«Автоматика, телемеханіка та зв'язок»

к.т.н., доцент

О.М. Прогонний

Завідувач кафедри

«Транспортний зв'язок»

К.т.н., доцент

С.І.Приходько