

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

БЕЗРУК В.М., ЧЕБОТАРЁВА Д.В., СКОРИК Ю.В.

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ
АНАЛИЗ И ВЫБОР СРЕДСТВ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

Монографія

Харків
2017

УДК 624.396.2
ББК 32.884.1
Б34

*Рекомендовано ученым советом
Харьковского национального университета радиоэлектроники
(протокол № 13/9-1 от 28.10.2016 г.)*

Рецензенты:

Беркман Л.Н., д.т.н., проф., проректор по научно-методической работе
Государственного университета телекоммуникаций;
Климаш М.Н., д.т.н., проф., заведующий кафедры «Телекоммуникации»
Национального университета «Львовская политехника»

Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., Скорик Ю.В.
Б34 Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций : монография / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва, Ю.В. Скорик. – Харьков : Компания СМИТ, 2017. – 268 с.

ISBN 978-617-621-006-1

В монографии рассмотрены теоретические и практические вопросы многокритериального анализа и выбора средств телекоммуникаций. Изложена методология выбора оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества. Рассмотрены особенности применения методологии многокритериального выбора предпочтительных вариантов для различных видов средств телекоммуникаций.

Предназначена для специалистов, работающих в области телекоммуникаций, а также студентов специальности «Телекоммуникации и радиотехника».

**УДК 624.396.2
ББК 32.884.1**

ISBN 978-617-621-006-1

© Безрук В.М., Чеботарёва Д.В.,
Скорик Ю.В., 2017
© ТОВ «Компания СМИТ», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|----------------|---|
| ВВЕДЕНИЕ | 8 |
|----------------|---|

РАЗДЕЛ 1 ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ

| | |
|--|----|
| 1.1. Этапы проектирования технических систем | 11 |
| 1.2. Особенности применения формализованных методов на начальных этапах проектирования систем | 16 |
| 1.3. Общая характеристика многокритериальных задач принятия решений | 25 |
| 1.3.1. Множество возможных и подмножество выбираемых решений | 25 |
| 1.3.2. Векторный критерий оптимальности | 27 |
| 1.4. Математические основы решения задач многокритериального выбора оптимальных проектных решений | 29 |
| 1.4.1. Модели задач выбора проектных решений | 30 |
| 1.4.2. Решение многокритериальных задач оптимизации | 35 |
| 1.5. Приближенные методы многокритериальной оптимизации | 42 |
| 1.6. Анализ особенностей некоторых оптимизационных задач в телекоммуникациях | 50 |

РАЗДЕЛ 2 МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ С УЧЕТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

| | |
|--|----|
| 2.1. Формализованная процедура задания критерия оптимальности проектных решений | 50 |
| 2.2. Формирование исходного множества проектных вариантов системы на основе морфологического подхода | 55 |
| 2.3. Методы нахождения Парето-оптимальных проектных решений | 56 |
| 2.4. Методы сужения подмножества Парето-оптимальных решений до единственного предпочтительного варианта системы | 60 |
| 2.4.1. Выбор предпочтительного варианта системы на основе теории полезности и теории размытых множеств | 60 |
| 2.4.2. Выбор предпочтительного варианта системы на основе лексикографических отношений | 63 |

| | |
|--|----|
| 2.4.3. Методы экспертного оценивания при выборе предпочтительного варианта системы | 65 |
| 2.4.4. Выбор предпочтительного варианта системы на основе метода анализа иерархий | 67 |

РАЗДЕЛ 3 МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ И СЕТЕЙ СВЯЗИ

| | |
|--|----|
| 3.1. Оптимизация системы передачи информации с учетом показателей энергетической и частотной эффективности | 71 |
| 3.2. Многомерные потенциальные характеристики и многомерные диаграммы обмена показателей качества СПИ | 76 |
| 3.3. Оптимизация сети связи по совокупности показателей среднего времени задержки и стоимости | 81 |
| 3.4. Выбор оптимальных проектных вариантов сети передачи данных с учетом совокупности показателей качества | 89 |
| 3.5. Выбор оптимальных маршрутов в мультисервисных сетях связи с учетом совокупности показателей качества | 91 |

РАЗДЕЛ 4 МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПРОЕКТНЫХ ВАРИАНТОВ СЕТЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

| | |
|--|-----|
| 4.1. Анализ задач планирования ССМС | 96 |
| 4.1.1. Особенности построения ССМС | 96 |
| 4.1.2. Задачи проектирования и оптимизации ССМС | 101 |
| 4.1.3. Анализ методов планирования ССМС | 110 |
| 4.1.4. Обзор программных комплексов планирования сетей радиосвязи | 113 |
| 4.1.5. Актуальность задач многокритериального выбора проектных решений при планировании ССМС | 120 |
| 4.2. Особенности номинального планирования ССМС | 122 |
| 4.2.1. Анализ особенностей этапа номинального планирования ССМС второго и третьего поколения | 122 |
| 4.2.2. Расчет основных параметров ССМС | 125 |
| 4.3. Многокритериальный выбор проектных решений на номинальном этапе планирования ССМС второго поколения | 130 |
| 4.3.1. Формирование множества допустимых вариантов сети и выбор показателей качества ССМС | 131 |

| | |
|---|-----|
| 4.3.2. Выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов ССМС..... | 132 |
| 4.3.3. Анализ многомерных потенциальных характеристик и многомерных диаграмм обмена показателей качества ССМС | 132 |
| 4.3.4. Выбор единственного проектного варианта ССМС | 134 |
| 4.3.5. Программный комплекс оптимизации проектных вариантов ССМС с учетом совокупности показателей качества..... | 135 |
| 4.4. Многокритериальный выбор вариантов ССМС третьего поколения..... | 141 |
| 4.4.1. Формирование исходного допустимого множества вариантов ССМС..... | 141 |
| 4.4.2. Выбор показателей качества ССМС..... | 142 |
| 4.4.3. Нахождение подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов ССМС | 143 |
| 4.4.4. Анализ полученных Парето-оптимальных вариантов ССМС и многомерных диаграмм обмена показателей качества..... | 144 |
| 4.4.5. Выбор единственного предпочтительного проектного варианта ССМС | 146 |
| 4.4.6. Программная реализация многокритериального выбора проектных вариантов ССМС | 146 |

РАЗДЕЛ 5

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ТОПОЛОГИИ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ С УЧЕТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

| | |
|--|-----|
| 5.1. Процесс планирования транспортной сети мобильной связи | 150 |
| 5.2. Особенности применения методов многокритериальной оптимизации при планировании транспортной сети мобильной связи..... | 154 |
| 5.2.1. Выбор показателей качества и формирование множества допустимых вариантов транспортных сетей..... | 158 |
| 5.2.2. Нахождение подмножества Парето-оптимальных вариантов и выбор предпочтительного проектного варианта топологии транспортной сети..... | 159 |
| 5.3. Выбор оптимальных вариантов топологии транспортной сети по совокупности показателей неготовности и стоимости..... | 160 |
| 5.3.1. Оценивание показателей качества транспортной сети..... | 160 |

| | |
|---|-----|
| 5.3.2. Формирование множества вариантов топологий транспортной сети | 161 |
| 5.3.3. Результаты многокритериального выбора топологии транспортной сети | 165 |
| 5.4. Практические рекомендации по многокритериальному выбору транспортных сетей второго и третьего поколения мобильной связи..... | 167 |

РАЗДЕЛ 6
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР
ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ РЕЧЕВЫХ
КОДЕКОВ С УЧЕТОМ ИНФОРМАЦИИ ОТ ЭКСПЕРТОВ

| | |
|---|-----|
| 6.1. Сравнительный анализ эффективности методов выбора предпочтительного варианта системы | 172 |
| 6.2. Исследование метода анализа иерархий для выбора предпочтительного варианта речевого кодека | 176 |
| 6.3. Исследование разных методов выбора предпочтительного варианта речевого кодека..... | 184 |
| 6.3.1. Исследование метода выбора предпочтительного варианта, основанного на теории полезности..... | 184 |
| 6.3.2. Исследование метода выбора предпочтительного варианта, основанного на теории размытых множеств..... | 186 |
| 6.3.3. Исследование метода выбора предпочтительного варианта, основанного на лексографических отношениях..... | 188 |
| 6.3.4. Исследование метода выбора предпочтительного варианта, основанного на экспертном оценивании | 189 |
| 6.4. Исследование методов выбора подмножества Парето-оптимальных вариантов речевых кодеков..... | 191 |
| 6.5. Сужение подмножества Парето-оптимальных вариантов речевых кодеков на основе метода анализа иерархий | 193 |
| 6.6. Программная реализация многокритериального выбора предпочтительных вариантов методом анализа иерархий..... | 196 |

РАЗДЕЛ 7
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ
ДЛЯ ВЫБОРА ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ
РАЗНЫХ ТИПОВ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

| | |
|--|-----|
| 7.1. Выбор предпочтительного варианта модема в цифровых системах связи | 198 |
| 7.2. Выбор предпочтительного варианта системы телевизионного вещания разных стандартов | 204 |

| | |
|--|-----|
| 7.3. Выбор предпочтительного варианта построения систем массового обслуживания | 209 |
| 7.4. Выбор предпочтительного проектного варианта сети мобильной связи 3-го поколения | 217 |
| 7.5. Выбор предпочтительной технологии мобильной связи 4-го поколения | 220 |
| 7.6. Выбор предпочтительного типа мобильного телефона..... | 225 |
| 7.7. Выбор предпочтительного протокола маршрутизации беспроводной сенсорно-актуаторной сети | 229 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 238 |
| ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ | 242 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 246 |

ВВЕДЕНИЕ

Средства телекоммуникаций — это совокупность технических устройств, алгоритмов и программного обеспечения, позволяющих передавать и принимать речь, мультимедийную информацию и другие данные при помощи электрических и электромагнитных колебаний по кабельным, волоконно-оптическим и радиоканалам в различных диапазонах волн [69, 88, 127, 130, 135, 173, 175]. Это устройства преобразования и обработки информации, кодирования и декодирования, модуляции и демодуляции, телекоммуникационные технологии передачи информации, устройства распределения и маршрутизации в сетях связи и др. Средства телекоммуникаций являются важными компонентами современных систем и сетей инфокоммуникаций. Поэтому при проектировании систем инфокоммуникаций возникает необходимость выбора предпочтительного варианта из некоторого допустимого множества вариантов средств телекоммуникаций с учетом совокупности противоречивых технико-экономических требований, которые характеризуются значениями соответствующих показателей качества. Это определяет необходимость применения методов многокритериальной оптимизации при выборе предпочтительных решений из множества допустимых проектных вариантов средств телекоммуникаций.

В настоящее время опубликовано много работ, где изложены различные аспекты теории многокритериальной оптимизации [6, 12, 17, 24, 30, 42, 43, 47, 49, 54, 84, 95, 117, 124, 151]. Известны также работы, в которых рассмотрены вопросы проектирования и выбора оптимальных технических устройств и систем с учетом совокупности показателей качества [3-5, 11, 14, 16, 25, 26, 33, 36, 40]. В частности, и в области телекоммуникаций появились работы, в которых рассматриваются вопросы многокритериальной оптимизации при решении задач проектирования систем [4, 27, 29, 54, 72, 81, 98, 146, 153, 164, 172, 178]. Однако в настоящее время методы многокритериальной оптимизации еще недостаточно широко применяются при выборе оптимальных проектных вариантов устройств, систем и сетей связи с учетом совокупности показателей качества. Поэтому авторы считают полезным опубликование настоящей монографии, в которой рассмотрены особенности методов многокритериальной оптимизации и приведены примеры их при-

менения при выборе предпочтительных проектных вариантов для различных типов средств телекоммуникаций с учетом совокупности показателей качества.

В первом разделе проанализированы особенности использования методов многокритериальной оптимизации при проектировании оптимальных систем с учетом совокупности показателей качества. Показано, что решение многокритериальных оптимизационных задач сводится к нахождению оптимальных по безусловному критерию предпочтения (критерию Парето) проектных решений, которые являются несравнимыми между собой. Для последующего выбора единственного предпочтительного варианта системы из подмножества Парето вводится некоторый условный критерий предпочтения с привлечением дополнительной субъективной информации от экспертов.

Во втором разделе излагается методология многокритериального выбора оптимальных проектных решений с учетом совокупности противоречивых показателей качества. Эта методология представляет собой взаимосвязанную совокупность формализованных методов и процедур задания критерия оптимальности проектируемой системы, формирования исходного множества проектных решений, нахождения подмножества Парето-оптимальных решений, а также сужение этого подмножества до единственного предпочтительного проектного варианта системы с привлечением дополнительной информации от экспертов.

В третьем разделе рассматриваются особенности применения методов многокритериальной оптимизации при синтезе и анализе систем и сетей связи с учетом совокупности показателей качества. Приводятся решения как классических оптимизационных задач в области связи, так и нетрадиционных задач многокритериального выбора проектных вариантов в сетях связи, которые решаются с использованием результатов их моделирования на ЭВМ.

В четвертом разделе на основе публикаций авторов рассмотрены практические особенности решения задач многокритериального выбора оптимальных проектных вариантов систем мобильной связи 2-го и 3-го поколений на номинальном этапе планирования с учетом совокупности показателей качества. Сформировано подмножество Парето-оптимальных проектных вариантов систем, построены многомерные диаграммы обмена показателей качества, проведен анализ полученных проектных решений, в каждой задаче выбран единственный предпочтительный вариант.

В пятом разделе рассмотрены практические особенности применения методов многокритериальной оптимизации при планировании транспортной сети в системах мобильной связи. Приведены результаты решения задачи выбора предпочтительной топологии транспортной сети с учетом совокупности показателей качества.

В шестом разделе приводятся результаты исследований по применению методологии многокритериального выбора проектных решений при выборе предпочтительных речевых кодеков для сетей IP телефонии с учетом совокупности показателей качества. В исходном множестве речевых кодеков выбраны Парето-оптимальные варианты, а среди них с использованием разных методов найдены предпочтительные варианты речевого кодека.

В седьмом разделе приведены результаты многокритериального анализа и выбора предпочтительного варианта для различных типов средств телекоммуникаций с использованием метода анализа иерархий. Приведены результаты исследований, в частности, на примерах модемов систем цифровой связи, технологий сети мобильной связи 4-го поколения, стандартов в сетях цифрового телевидения, технологий обслуживания в узлах коммутации, протоколов маршрутизации в беспроводной сенсорно-актуаторной сети, а также разных типов мобильных телефонов.

При подготовке настоящей работы использованы в основном результаты исследований авторов [177–259]. Материалы первого, второго и третьего разделов подготовил Безрук В.М., материалы четвертого и пятого разделов подготовила Чеботарёва Д.В., материалы шестого и седьмого разделов подготовила Скорик Ю.В. Общее редактирование работы выполнил Безрук В.М.

РАЗДЕЛ 1

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ

Настоящий раздел посвящен анализу задач выбора оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества, а также краткому анализу методов многокритериальной оптимизации, которые могут быть использованы при проектировании систем.

1.1. Этапы проектирования технических систем

Жизненный цикл сложной технической системы, как правило, включает такие этапы [5, 40, 178]: 1) формирование требований к системе и технического задания на ее разработку; 2) проектирование системы; 3) изготовление, исследование и доработка исследовательских образцов системы; 4) серийное производство; 5) эксплуатация; 6) модернизация системы, 7) утилизация. Этап 1 также называют внешним проектированием. При этом выясняется цель, ради которой создается система; уточняется круг решения ею задач; определяются условия работы системы, формулируются требования к техническим характеристикам и показателям качества системы. Этап 2 называют также внутренним проектированием. При этом определяются структура и параметры системы, варианты построения и способы практической реализации, конструкция, технология изготовления подсистем и системы в целом. Целью внутреннего проектирования есть разработка необходимой технической документации, которая представляет собой проект системы.

На этапе внутреннего проектирования в свою очередь выделяют следующие стадии: разработка технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, рабочей конструкторской документации. На стадии разработки технического предложения формируется концепция построения и определяются основные параметры системы, которые удовлетворяют требованиям технической

задачи. При этом фактически согласовываются требования внешнего проектирования с возможностями внутреннего проектирования. Основная задача эскизного проектирования – разработка структуры, определение основных характеристик системы. На стадии технического проектирования уточняется и детализируется проект системы, создается и испытывается исследовательский образец системы. На заключительной стадии проектирования разрабатывается комплект конструкторской документации на производство и эксплуатацию системы.

Процесс внутреннего проектирования системы в общем случае включает выполнение таких работ: анализ аналогичных систем; обоснование исходных данных и ограничений на систему; выбор принципов построения и определение структуры системы; схемотехнический синтез системы; конструирование системы; разработка технологии изготовления системы; подготовка аппаратуры для испытаний системы.

При проектировании сначала выполняются научно-исследовательские работы (НИР), в границах которых проводится поиск путей создания и исследование новых принципов построения системы. Результатом является формулирование технических требований на разработку новой системы. Потом проводятся экспериментально-конструкторские работы (ЭКР), в рамках которых проверяются и конкретизируются способы построения системы, а также создается исследовательский образец системы. Результатом этих работ является эскизный проект системы. При техническом проектировании выполняется детальная проработка всех схемных, конструкторских и технологических решений, необходимых для изготовления, испытаний и эксплуатации системы.

Описание сложной технической системы состоит из нескольких аспектов: функционального, конструкторского, технологического. Функциональный аспект отображает физические и информационные процессы, которые происходят в системе при ее функционировании. Конструкторский аспект характеризует структуру, расположение в пространстве и форму составных частей системы. Технологический аспект характеризует технологичность, то есть возможность и средства изготовления системы в заданных условиях.

При описании системы выделяются такие уровни абстрагирования: системный, функциональный, схемотехнический и компонентный. На системном уровне: как система фигурирует тот объект, который предназначен для проектирования, например, система

автоматической телефонной связи или сеть передачи данных между ЭВМ. Функциональными элементами выступают блоки и устройства, например, модем, передатчик, приемник, демодулятор. Схемными элементами выступают, например, генератор сигналов, усилитель, счетчик, дешифратор. На компонентном уровне рассматриваются процессы, которые протекают в компонентах схемы, например, в интегральных схемах, транзисторах.

В зависимости от того, в какой последовательности выполняется проектирование, рассматривают нисходящий и восходящий способ проектирования системы. При нисходящем проектировании, которое протекает «вниз», задачи более высоких иерархических уровней проектирования решаются раньше, чем задачи низших иерархических уровней. При восходящем проектировании — «вверх», наоборот, задачи низших иерархических уровней проектирования решаются раньше, чем задачи более высоких иерархических уровней. Функциональное проектирование является, как правило, нисходящим, а конструкторское — восходящим.

Успешное решение задачи проектирования системы возможно лишь на базе разностороннего, целостного рассмотрения проектированной системы и ее развития (изменения) в процессе взаимодействия с внешней средой и другими системами. Лишь такой подход, который называется системным, способен привести к истинно творческим, новаторским проектным решениям. В основе системного подхода лежат такие принципы [6, 7, 20, 27, 47]:

1. Учет всех этапов «жизненного цикла» системы, которая разрабатывается (проектирование, изготовление, эксплуатация, утилизация).

2. Учет истории и в особенности перспектив развития систем данного и близких классов систем.

3. Разностороннее рассмотрение взаимодействия системы с окружающей средой (с природой и обществом вообще).

4. Учет основных видов взаимодействия элементов самой системы (функционального, конструктивного, энергетического, информационного, динамического).

5. Учет взаимодействия между развитием элементной базы и системотехники.

6. Учет возможности изменения исходных данных и даже частично решаемой задачи в процессах проектирования, изготовления и эксплуатации системы.

7. Выделение главных показателей качества системы, которые должны учитываться и улучшаться при проектировании.

8. Объединение принципов композиции, декомпозиции и иерархичности при создании подсистем, устройств, блоков.

9. Раскрытие основных технических противоречий, которые препятствуют улучшению основных показателей качества системы и поиск путей их устранения.

9. Правильное объединение разных методов проектирования: математических, эвристических, экспериментальных, а в рамках математических методов — аналитических и с помощью ЭВМ.

10. Обеспечение соответствующего взаимодействия в процессе проектирования специалистов разного профиля.

Рассмотрим некоторые особенности проектирования систем связи с учетом указанных принципов системного подхода.

Поскольку сложность систем связи быстро возрастает, то для анализа и синтеза таких сложных систем существует лишь один путь — декомпозиция их на разные элементы и исследование множества их структур и взаимодействия [32]. Эти проблемы отражены в научном направлении — архитектура систем. Архитектура систем — вместительное понятие, которое содержит три важных вида взаимосвязанных структур: физическую, логическую, программную. Любая из этих структур определяется набором элементов и характером их взаимодействия.

Сложным системам связи присущи такие отличительные признаки:

- большое количество взаимосвязанных и взаимодействующих элементов;
- сложность функции, которую выполняет система;
- возможность разделения системы на подсистемы, функционирование которых подчинено общей цели функционирования системы;
- управление разветвленной сетью (часто иерархической структуры) и потоками информации;
- взаимосвязь с внешней средой и функционирование в условиях влияния случайных факторов.

Современные средства связи являются типичными представителями сложных систем с иерархической, функциональной и структурной организацией. Функциональная иерархия отображает специфику задач каждого элемента системы и подчиненность элементов, обусловленную их общим функционированием в составе системы связи [15, 18, 36].

В современной практике проектирования сложных систем для их синтеза используется объединение содержательных (эвристи-

ческих, интуитивных) и формальных (алгоритмических) методов. Синтез сложных систем состоит в определении структуры системы, которая проектируется, и процессов ее функционирования. Функционально-структурный подход сводится к разделению сложных систем на отдельные структурные уровни (подсистемы) для определения их функционального назначения. Такая организация отображает как взаимодействие системы с окружающей средой, так и внутренние взаимосвязи элементов в процессе функционирования системы.

Внутренние процессы в системах связи можно рассматривать в виде довольно сложных моделей физических, информационных и управляющих потоков. Однако масштабы и сложность современных систем связи такие, что их бессистемное описание подобным набором моделей часто не приближает, а отдаляет проектировщиков от понимания основных процессов, которые происходят в системе, и их взаимосвязей. Из этого явствует необходимость использования простой, но вместе с тем уникальной методологии анализа прикладных областей и спецификации (представление) систем связи, которые позволяют зафиксировать процессы, которые происходят в них. Таким научным методом есть метод системного анализа.

Центральное место среди основных концепций проектирования систем связи следует предоставить принципу модульности, который необходимо развивать на информационном, функциональном и других уровнях [7, 15, 32].

Принцип модульной организации предусматривает построение сложных систем на основе набора модулей. Модульный подход при проектировании систем позволяет обеспечить создание семейств систем, которые отличаются функциональными возможностями и характеристиками, оказывает содействие стандартизации элементов все более высоких уровней и сокращению затрат на проектирование систем. Основные свойства выделенных типов модулей – их завершенность и иерархичность в середине модулей определенного типа.

При решении вопроса о функциональном составе модулей существуют две диалектические противоположности – многофункциональность и специализация модулей, причем эти противоположности существуют на всех уровнях развития систем. Повышение универсальности модулей рассматривается как процесс, который обеспечивает сокращение номенклатуры, снижение затрат на проектирование. Специализация модулей является средством до-

стижения высокой эффективности системы вследствие оптимального согласования алгоритмов и функций, которые реализуются, а также уменьшение избыточности структуры модулей.

1.2. Особенности применения формализованных методов на начальных этапах проектирования систем

Раньше при проектировании систем использовались в основном эвристические и экспериментальные методы. Процесс проектирования сводился к выбору из небольшого количества вариантов систем и только тех, которые удовлетворяют заданным ограничениям на тактико-технические характеристики системы. С усложнением систем и возрастанием их стоимости возникла необходимость создания оптимальных (наилучших в заранее установленном смысле) систем. Стало крылатым выражение «Мы не настолько богатые, чтобы проектировать не оптимально». Сейчас при проектировании уже не удовлетворяются разработкой и анализом только одного варианта системы с заданными свойствами и характеристиками. Стараются сравнить как можно больше альтернативных вариантов построения системы и выбрать из них оптимальный вариант.

При проектировании систем постановка задачи играет важную роль. Недаром говорят, что правильная постановка задачи наполовину гарантирует ее успешное решение. Рассмотрим особенности и проблемы постановки задачи проектирования оптимальной системы с учетом совокупности показателей качества. В общем виде систему можно представить как согласованное множество элементов, отношений между ними и их свойств [5, 6]. Их однозначное задание определяет построение и эффективность системы. Считают, что вариант построения системы $\varphi = (S, \vec{p})$ задается структурой S и вектором параметров \vec{p} . Для информационных систем также должно быть задано множество входных воздействий X и результатов работы системы Y , что фактически определяет систему φ как отображение множества X на множество Y : $X \rightarrow Y$.

Эти абстрактные определения системы должны быть конкретизированы в процессе проектирования. В частности, для системы связи множество входных воздействий — это множество сигналов и помех, которые должны быть описаны определенными математическими моделями. При проектировании должна быть опреде-

лена структура системы как совокупность соответствующих элементов и связей между ними, а также должны быть получены значения параметров этой системы.

Исходные данные для проектирования системы включают [3]:

- совокупность условий работы системы $\{Y\}$,
- совокупность ограничений на условия работы, на структуру и параметры системы $\{O_s\}$;
- совокупность показателей качества системы $\vec{K} = (k_1, \dots, k_m)$;
- совокупность ограничений на значение этих показателей качества $\{O_k\}$;
- критерий оптимальности системы.

Рассмотрим примеры исходных данных при проектировании систем связи. К условиям работы $\{Y\}$ системы связи может относиться: виды и характеристики сообщений, сигналов, помех, каналов связи. Ограничение на структуру системы $\{O_s\}$ в зависимости от конкретной задачи могут быть заданы как слабые, так и жесткие. В частности, это общие требования к классу систем связи, например, требования, чтобы система была одноканальной, имела свободный доступ, не включала обратного (служебного) канала, ретрансляторов. При более жестких ограничениях задается принцип работы системы, вид модуляции, декомпозиция системы и даже полностью структура, а в процессе оптимизации варьируется лишь вектор внутренних параметров системы (например, параметры модуляции, мощность сигнала или помехи, число каналов). Эти ограничения определяют множество возможных вариантов проектируемой системы.

Вектор показателей качества системы $\vec{K} = (k_1, \dots, k_m)$ включает совокупность внешних параметров системы связи, которые характеризуют основные тактико-технические характеристики (потребительские свойства системы) системы — скорость передачи сообщений, вероятность погрешности передачи, задержки передачи сообщений, надежность системы. При постановке задачи задаются не числовые значения, а лишь состав показателей качества, которые должны учитываться при оптимизации системы. На начальных этапах проектирования, как правило, к вниманию берут лишь наиболее важные показатели качества. Ограничения $\{O_k\}$, которые накладываются на числовые значения показателей качества, могут быть типа равенств, неравенств или функциональной связи.

Системы, которые удовлетворяют совокупности данных $\{Y\}$, $\{O_s\}$, называют допустимыми, а такие системы, которые удовлетворяют еще и ограничению на значение показателей качества

$\{O_k\}$ — строго допустимыми. Раньше при проектировании систем ограничивались выбором строго допустимых систем. С усложнением и увеличением стоимости проектируемых систем, актуальным становится проектирование оптимальных по совокупности показателей качества систем.

Из всех строго допустимых систем оптимальной (наилучшей) есть та система, которой отвечает наилучшее (в ранее установленном понимании) значение вектора \vec{K} . Для выбора оптимальной системы следует выбрать (обосновать) вид критерия оптимальности, определяющий предпочтение одного варианта системы над другим. Фактически критерий оптимальности это правило, согласно которому одно значение вектора \vec{K} следует признать лучшим по сравнению с другим его значением.

Таким образом, задача проектирования оптимальной системы формулируется так: найти такую систему, которая удовлетворяет совокупности исходных данных $\{Y\}$, $\{O_s\}$, $\{O_k\}$ и при этом имеет значение вектора показателей качества \vec{K} , наилучшее по заданному критерию предпочтения.

Проектирование системы, которое проводится с учетом совокупности показателей качества $\vec{K} = (k_1, \dots, k_m)$, называют векторным синтезом (векторной оптимизацией, оптимизацией по векторному критерию, многокритериальной оптимизацией). В отличие от этого синтез системы с учетом одного показателя качества ($m = 1$) называется скалярным.

В зависимости от сформулированных исходных данных нахождения оптимальной системы может сводиться к решению разных в математическом отношении оптимизационных задач [5, 25, 33]:

1. Синтез оптимальной структуры системы, которая означает нахождение оптимального оператора системы.
2. Параметрическая оптимизация, то есть выбор оптимальных значений параметров системы при заданной ее структуре.
3. Дискретный выбор оптимальных вариантов системы из конечного числа допустимых вариантов.

Математические методы оптимизации параметров и дискретного выбора хорошо развиты и широко используются при проектировании систем. Синтез оптимальной структуры системы является более сложной задачей и часто наталкивается на трудности не только математического, но и принципиального характера, которые связаны с некоторой неопределенностью при формулировании условий работы системы, а также с заданием в формализованном

виде критерия оптимальности системы. В последнем случае возникает непростая задача «аппроксимации» функции выбора оптимальной системы, которая есть в воображении заказчика системы, другой функцией выбора, который формализуется в виде определенного критерия оптимальности с использованием строгих математических методов. Как правило, сразу не удается выбрать критерий оптимальности в виде скалярной целевой функции, которая включает совокупность показателей качества и оптимизация которой привела бы к выбору единственного оптимального варианта системы. Поэтому приходится вводить совокупность целевых функций, связанных с соответствующими показателями качества, что приводит к необходимости решения задач векторной оптимизации. При введении векторной целевой функции [3, 12, 24, 26]

$$\vec{K}(\varphi) = (k_1(\varphi), \dots, k_m(\varphi)) \quad (1.1)$$

множество допустимых вариантов системы Φ_φ отображается в критериальное пространство векторных оценок $\Phi_\varphi \rightarrow V \in E^m$. Это дает возможность сравнивать варианты системы между собой в критериальном пространстве V и выбирать оптимальные варианты системы. Выбор оптимальных вариантов системы связан с определенным критерием оптимальности.

Таким образом, в процессе проектирования сложной системы важную роль играют такие основные проектные процедуры, как оптимизация, синтез и анализ вариантов системы. Оптимизация — это выбор оптимальной (наилучшей в определенном понимании) структуры и параметров системы. Выбор параметров системы — это параметрический синтез, выбор структуры — это структурный синтез. Анализ — это оценивание потенциальных возможностей системы, определение характера изменений значений исходных параметров системы в зависимости от того, как изменяются ее структура и внутренние параметры системы.

При использовании математических методов проектирования совокупность исходных данных для проектирования формулируется в виде строгих математических положений, в частности, строятся математические модели системы, определяются показатели качества системы, целевые функции, выбирается критерий оптимальности системы и решаются задачи оптимизации структуры и параметров системы.

Задача выбора оптимальных вариантов систем с позиций системного анализа есть типичной задачей в области исследования операций, в частности, теории выбора и принятия решений [12, 25,

47, 72, 108, 124]. Задача принятия решений это пара $\langle X, PO \rangle$, где X — множество допустимых вариантов (альтернатив построения) системы, PO — принцип оптимальности, который определяет понятие наилучших (оптимальных) вариантов. Решением задачи $\langle X, PO \rangle$ является подмножество оптимальных вариантов $X_0 \subseteq X$, полученное с использованием указанного принципа оптимальности.

Математическим выражением принципа оптимальности есть функция выбора C_0 . Она сопоставляет с подмножеством допустимых вариантов X ту его часть $X_0 = C_0(X)$, которая есть решением сформулированной задачи выбора. Задачи принятия проектных решений отличаются в зависимости от имеющейся информации о множестве X и принципе оптимальности PO . В общей задаче принятия решений как X , так и PO могут быть не полностью известные, а дополнительную информацию для выбора X_0 получают в процессе решения задачи. Задачу с известным множеством X называют задачей выбора, а задачу с известными X и PO — общей задачей оптимизации.

Пусть определенное свойство варианта системы из множества X выражается числом, то есть существует отображение $f : X \rightarrow E_1$. Тогда такое свойство называется показателем качества, а число $k = f(x)$ — оценкой варианта системы X по целевой функции $f(x)$. Однако, как правило, варианты системы характеризуются не одним, а несколькими свойствами, что определяет необходимость характеризовать систему вектором показателей качества $\vec{K} = (k, \dots, k_m)$. При этом проектный вариант системы x оценивается совокупностью целевых функций $\vec{f}(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$, а множество X отображается в критериальное пространство E_m , где каждому альтернативному варианту системы $x \in X$ соответствует свой вектор оценок $\vec{f}(x) \in E_m$ [3, 4, 5, 26].

Понятие оптимальности при проектировании связывается с выбором наилучших в установленном смысле проектных вариантов системы. Этот выбор выполняется путем оптимизации совокупности целевых функций, связанных с показателями качества систем [5, 25, 26]. Возникает вопрос, возможно ли вообще найти проектное решение, которое бы удовлетворяло максимуму (или минимуму) одновременно всех целевых функций. Как правило, это невозможно. Поэтому, например, формулирование «добиться максимальной эффективности системы при минимальных затратах» обычно не имеет смысла.

Выбранные показатели качества системы могут быть трех типов: нейтральные, т. е. независимые между собой; связанные между собой, но согласованные; связанные и антагонистические (конкурирующие) между собою [5, 24, 25, 26]. В первых двух случаях оптимизация системы может выполняться независимо относительно любого из показателей. В третьем, наиболее сложном случае, улучшение одних показателей качества приводит к ухудшению других показателей качества. Поэтому при решении оптимизационной задачи следует искать согласованный оптимум показателей качества, которому отвечает наилучшее значение каждого показателя качества, которое может быть достигнуто при фиксированных, но произвольных значениях других показателей качества.

Существует много методов оптимизации систем, которые вкладывают в понятия оптимальности разное понимание [7, 16, 24, 25, 34, 41, 47, 84]. Тем не менее, большинство правил выбора лучших проектных решений имеет общую черту: выбор выполняется на основе информации о попарном (бинарном) сравнении вариантов систем. Конечно, такое сравнение может осуществляться на множестве допустимых вариантов систем, но чаще это удобно выполнять в критериальном пространстве, поскольку здесь проектные решения сравниваются с помощью совокупности показателей качества, которые имеют числовой характер.

При проектировании систем имеют место прямые и обратные задачи [5, 25, 33, 40]. Прямые задачи — это задачи анализа, которые отвечают на вопрос: какое значение принимают показатели качества (целевые функции) для выбранного допустимого варианта системы $x \in X$. Обратные задачи — это задачи синтеза, которые отвечают на вопрос: как выбрать проектное решение x , для которого показатели качества достигают оптимального значения. Если известно аналитическое выражение для целевой функции $f(x)$ (в скалярном случае), то оптимальный вариант системы находится путем решения некоторой вариационной задачи $x_o = \arg \operatorname{extr}_{x \in X} \{f(x)\}$.

Сложность решения задач оптимизации определяется априорной неопределенностью, которая, в частности, связана с недостаточной информацией об условиях работы системы [5, 25, 33, 50]. Если эта неопределенность носит параметрический характер, то могут быть получены оценки неизвестных параметров, которые и используются при решении задач оптимизации. В общем случае такая априорная неопределенность приводит к более сложным по структуре системам.

Второй тип априорной неопределенности связан с отсутствием достаточной информации для формализации расплывчатого представления об оптимальности системы, которая есть следствием недостаточно осознанной, а потому и нечетко сформулированной глобальной цели функционирования системы [5, 25, 26, 34]. Поэтому не может быть задано аналитическое выражение для скалярной целевой функции и выбран оптимальный вариант системы в результате решения вариационной задачи оптимизации. При этом являются известными только требования к отдельным свойствам системы, которые определяются совокупностью показателей качества. Это и приводит к необходимости решения задач векторной (многокритериальной) оптимизации, в которых возникает необходимость искать экстремум качества векторной целевой функции $\vec{f}(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$, соответствующей совокупности показателям качества.

Лишь в случае нейтральных и согласованных показателей качества решение векторной оптимизационной задачи находится путем независимой оптимизации отдельных целевых функций $x_{oi} = \arg \operatorname{extr}_{x \in X} \{f_i(x)\}$, $i = 1, m$. При связанных между собой и конкурирующих показателях качества системы совпадение оптимальных решений $x_{o1} = x_{o2} = \dots = x_{om}$ является скорее случаем, чем правилом. Обычно решением многокритериальной оптимизационной задачи $x_o = \arg \operatorname{extr}_{x \in X} \{\vec{f}(x)\}$ является согласованный оптимум — экстремум, которому отвечают наилучшие значения каждого из показателей качества, что могут быть достигнуты при фиксированных (но произвольных) значениях других показателей. В результате решения такой оптимизационной задачи находится, как правило, не один оптимальный вариант системы, а некоторое множество оптимальных вариантов системы. Множество решений, которые удовлетворяют условию согласованного оптимума векторной целевой функции, в ряде случаев называют Парето-оптимальными решениями [17, 33, 34, 84].

Когда показатели качества системы связаны и антагонистичны между собою, потенциально возможные значения каждого показателя, например, первого k_{10} зависят от значений других $(m-1)$ показателей качества k_2, \dots, k_m . Эта зависимость $k_{10} = f(k_2, \dots, k_m)$ при разных допустимых комбинациях k_2, \dots, k_m называется рабочей поверхностью [3, 5, 25, 33]. При условии, что зависимость является строго монотонной по каждому показателю k_2, \dots, k_m , она называется

ся оптимальной поверхностью. Все точки этой поверхности удовлетворяют условия m -кратного согласованного оптимума и потому эти значения определяют многомерные (m -меримые) потенциальные характеристики системы. В терминах многокритериальной оптимизации оптимальной поверхности отвечает множество Парето-оптимальных значений вектора показателей качества \vec{K} , а также соответствующих им Парето-оптимальных систем [3, 33, 34]. Оптимальная поверхность определяет также семейство многомерных диаграмм обмена показателей качества, то есть зависимостей потенциально возможных значений любого из показателей качества от значений других ($m-1$) показателей.

Следует отметить, что широко используемые в практике проектирования одномерные потенциальные характеристики систем, которые характеризуют потенциальное значение одного показателя качества системы, есть скрытой формой многомерной потенциальной характеристики и связанной с ею многомерной диаграммой обмена системы [5, 25, 26, 27, 33]. Это объясняется тем, что при определении одномерной потенциальной характеристики системы все показатели качества, кроме одного (наиболее важного), переводятся в ранг ограничений или полностью игнорируются, то есть не учитываются. Однако фактически полностью игнорировать все показатели качества, кроме одного, недопустимо, поскольку при этом потенциально возможное значение этого единственного оптимизируемого показателя качества достигнет нуля, то есть решаемая оптимизационная задача превратится в тривиальную. Таким образом, при оптимизации выбранного главного показателя качества системы следует обязательно принимать во внимание значения еще как минимум одного антагонистического показателя качества. На практике следует обязательно учитывать, как правило, несколько показателей качества. Отсюда вытекает, что в общем случае все оптимизационные задачи проектирования систем являются многокритериальными по своей сути.

Для дальнейшего выбора единственного проектного решения из полученного подмножества Парето-оптимальных вариантов системы надо привлекать дополнительную информацию, которая уточняет и формализует начальное нечеткое представление об оптимальности системы. Использование такой информации дает возможность определить некоторую формализованную процедуру выбора единственного предпочтительного варианта системы [5, 25, 33, 178].

Таким образом, спроектировать оптимальную систему — это значит найти оптимальную по векторному критерию структуру и оптимальные значения параметров системы. Для этого нужно решать математические задачи в общем случае многокритериальной (векторной) оптимизации при заданных целевых функциях и ограничениях. По сравнению с задачами скалярной оптимизации, это значительно более сложные математические задачи.

Интенсивное развитие научных методов многокритериального анализа проектных решений определило появление новых научных дисциплин: исследование операций, теория принятия решений, системный анализ, в рамках которых созданы специальные информационно-аналитические технологии, опирающиеся на новые математические методы [7, 12, 17, 30, 34, 36, 49, 72, 84]. Многообразие многокритериальных задач породило огромное число методов их анализа. Постановка всякой задачи многокритериального выбора решений включает три объекта — множество возможных решений, векторный критерий оптимальности и отношение предпочтений лица принимающего решения (ЛПР). Решить эту задачу — означает, что на основе векторного критерия оптимальности и имеющихся сведений об отношении предпочтения ЛПР, найти множество выбираемых решений.

При проектировании оптимальных систем необходимо не только применение математических методов оптимизации, а также «эксплуатация» значительных технических возможностей ЭВМ (большого быстродействия и памяти) с целью решения сложных оптимизационных задач, но и глубокие знания предметной области. Это необходимо для построения адекватных математических моделей системы, формализованного представления векторного критерия оптимальности и использования соответствующего математического аппарата теории оптимизации для выбора проектных решений, оптимальных по заданному критерию оптимальности. При этом возникает ряд вопросов. Как сформировать множество допустимых вариантов построения системы? Как формализовать цели, ради которых создается и будет функционировать система с учетом совокупности противоречивых технико-экономических показателей качества? Как среди всех возможных допустимых вариантов системы найти оптимальный — «наиболее предпочтительный, который соответствует сформулированным целям в виде векторной целевой функции»?

1.3. Общая характеристика многокритериальных задач принятия решений

1.3.1. Множество возможных и подмножество выбираемых решений

Прежде всего, должен быть задан набор возможных решений (вариантов), из которого следует осуществлять выбор. Обозначим его X и будем называть множеством возможных решений. Минимальное число элементов этого множества — два (для того, чтобы действительно был выбор). Ограничений сверху на количество возможных решений нет, оно может быть как конечным, так и бесконечным. При этом природа самих решений не играет никакой роли. Это могут быть проектные варианты построения системы, варианты работы системы, экономические стратегии, сценарии поведения, краткосрочные или долгосрочные планы и т. п.

Абстрактная задача принятия решений состоит в выборе одного или нескольких вариантов из исходного множества возможных вариантов (решений) X [12, 14, 47, 53, 72, 84]. Множество всех выбираемых вариантов обозначается через $C(X)$. Очевидно, что $C(X) \supset X$. Таким образом, в задаче выбора дано множество X , содержащее по крайней мере два элемента, а требуется найти некоторое его непустое подмножество $C(X)$. Предполагается, что выбор производится неким лицом, принимающим решение (ЛПР), в роли которого может выступать как отдельный человек, так и целый коллектив, подчинённый достижению определённой цели. Для того, чтобы совершаемый выбор в наибольшей степени соответствовал достижению имеющейся цели (т.е. был «наилучшим» или «оптимальным» для данного ЛПР), необходимо в процессе выбора учитывать «вкусы» и «предпочтения» ЛПР, которые в той или иной мере раскрывали бы смысл «наилучшего» решения. В таком случае множество $C(X)$ будет состоять из элементов $x \in X$, доставляющих максимальное (минимальное) значение функции $f(x)$ на множестве X . При этом сама задача выбора превращается в обычную экстремальную (оптимизационную) задачу, которая хорошо изучена и для решения которой разработан широкий арсенал методов решения. Значительно более обширный и интересный с точки зрения практики класс задач выбора составляют те, в которых не удаётся выразить предпочтения ЛПР указанным выше простым способом. В этих задачах задаётся некоторый набор числовых целевых функций $(f_1(x), \dots, f_m(x))$, определённых на множестве X

и образующих векторный критерий $\vec{f}(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$ со значениями в критериальном пространстве R^m . При этом обычно добавляют, что для ЛПП каждый из этих критериев желательно максимизировать (или минимизировать). Последнее требование можно выразить более точно в форме так называемой аксиомы Парето, которую сформулируем применительно к рассматриваемой далее задаче максимизации.

Применение математических методов принятия решений предполагает построение математической модели объекта анализа. При построении модели ситуации принятия решения дается формализованное описание допустимых вариантов и возможных последствий их реализации. При этом особое внимание уделяется выявлению и описанию предпочтений ЛПП. Таким образом, постановка всякой задачи многокритериального выбора оптимальных решений включает три объекта — множество возможных решений, векторный критерий оптимальности и отношение предпочтения ЛПП. Решить эту задачу — означает, на основе векторного критерия и имеющихся сведений об отношении предпочтения ЛПП, найти множество выбираемых решений.

Принципиальная сложность многокритериальных задач выбора решений состоит в том, что обычно не существует варианта решения, который был бы наилучшим сразу по всем критериям. Если по одному из критериев вариант очень хорош, то по другому, как правило, он будет далеко не лучшим. И поэтому выбор наилучшего варианта решения связан с необходимостью разрешения центральной в теории принятия решений при многих критериях проблемы замещения (компенсации), т.е. проблемы сопоставления по предпочтению (с точки зрения ЛПП) потерь по одним критериям с выигрышами по другим. Она решается по-разному в рамках различных методов многокритериальной оптимизации.

Важнейшим инструментом решения многокритериальных задач является принцип Эджворта–Парето (принцип Парето) [84]. Для того, чтобы сформулировать принцип Эджворта–Парето, постановку обычной многокритериальной задачи, включающей множество возможных решений и набор критериев (векторный критерий), дополняют бинарным отношением предпочтения ЛПП. Расширенная подобным образом многокритериальная задача названа задачей многокритериального выбора. Ее решение заключается в отыскании так называемого множества выбираемых решений, которое может состоять из одного элемента, но, в общем случае, оно является подмножеством множества возможных решений.

Принцип Эджворта — Парето формулируется в виде утверждения о том, что множество выбираемых решений содержится лишь в подмножестве Парето-оптимальных решений. Иначе говоря, каждое выбираемое решение является Парето-оптимальным. Математический эквивалент этому высказыванию — включение одного множества в другое. Для того чтобы доказать это включение, следует определенным образом ограничить весь класс задач многокритериального выбора, наложив специальные требования на указанные выше три объекта. Эти требования (аксиомы) относятся главным образом к отношению предпочтения ЛППР и могут быть интерпретированы как «рациональное» (или «разумное», «последовательное») поведение в процессе выбора. Кроме того, среди этих требований имеется условие согласованности отношения предпочтения ЛППР и векторного критерия, поскольку каждый из этих двух объектов выражает определенные устремления (цели) одного и того же ЛППР, и потому они обязаны быть каким-то образом связаны друг с другом.

1.3.2. Векторный критерий оптимальности

Считается, что наилучшим является такое возможное решение, которое наиболее полно удовлетворяет желаниям, интересам ЛППР. Стремление ЛППР достичь определенной цели нередко в математических терминах удается выразить в виде максимизации (или минимизации) некоторой целевой функции $f(x)$, заданной на множестве X . Однако в более сложных ситуациях приходится иметь дело не с одной, а сразу с несколькими целевыми функциями $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$. Так будет, например, когда исследуемое явление, объект или процесс рассматриваются с различных точек зрения и для формализации каждой точки зрения используется соответствующая функция. Если явление изучается в динамике поэтапно и для оценки каждого этапа приходится вводить отдельную целевую функцию. В этом случае также приходится учитывать несколько функциональных показателей качества и связанных с ними совокупности целевых функций.

Рассматривается ситуация, когда имеется сразу несколько целевых функций $f_1, f_2, \dots, f_m, m \geq 2$, определенных на множестве возможных решений X . В зависимости от содержания задачи выбора эти функции называют критериями оптимальности, критериями эффективности, целевыми функциями, показателями или критериями качества.

Рассмотрим задачу выбора наилучшего — оптимального проектного решения. В этой задаче множество X состоит из нескольких вариантов, а критериями оптимальности могут служить, в частности, стоимость вариантов f_1 и величина прибыли f_2 , которую обеспечит данное проектное решение. Если ограничить рассмотрение данной задачи лишь одним критерием оптимальности, практическая значимость решения такой задачи будет незначительной.

Числовые функции f_1, f_2, \dots, f_m образуют векторный критерий

$$\vec{f} = (f_1, f_2, \dots, f_m), \quad (1.1)$$

который принимает некоторые значения в пространстве m -мерных векторов R^m . Это пространство называют критериальным пространством или пространством векторного критерия \vec{f} при определенном $x \in X$ именуют векторной оценкой возможного решения x . Все возможные векторные оценки образуют множество возможных оценок возможных значений векторов $\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$ в некотором пространстве Y при некотором $x \in X$.

Применение принципа Эджворта–Парето позволяет из множества всех возможных исключить заведомо неприемлемые решения, т. е. те, которые никогда не могут оказаться выбранными, если выбор осуществляется достаточно «разумно». После такого исключения остается множество, которое называют множеством Парето или областью компромиссов. Оно, как правило, является достаточно широким и в процессе принятия решений неизбежно встает вопрос о том, какое именно единственное возможное решение выбрать среди Парето-оптимальных [17, 30, 34, 84]. Поэтому возникает проблема сужения множества Парето, связанная с выбором того или иного конкретного парето-оптимального варианта в качестве «наилучшего». Положительное решение этой проблемы представляет большой интерес для практики, поскольку в конкретных прикладных задачах выбора, как правило, следует ограничиться одним или же сравнительно узким подмножеством выбранных вариантов. Для решения указанной проблемы существует множество самых различных подходов — от эвристических до аксиоматических.

Сужение множества Парето до единственного варианта может быть осуществлено только при наличии той или иной дополнительной информации о решаемой многокритериальной задаче. Нередко подобную информацию заменяют какими-либо эвристическими соображениями или определёнными «правдоподобными» предпо-

ложениями, позволяющими сузить область поиска «наилучших» вариантов. Характерным признаком эвристических методов является невозможность чёткого описания того класса задач многокритериального выбора, при решении которых данный эвристический метод будет гарантированно приводить к желаемому результату. С этой точки зрения аксиоматические подходы можно считать более обоснованными. Иногда окончательный выбор может осуществлять само ЛПП после непосредственного анализа всего представленного ему множества Парето или какой-то его существенной части. Действительно, когда имеется лишь небольшое число Парето-оптимальных вариантов, выбор из них в принципе может быть произведён после сравнительного сопоставления этих вариантов и анализа достоинств и недостатков каждого из них. Правда, даже в случае двух вариантов ЛПП может оказаться в затруднительном положении, когда, например, число критериев велико. Если же множество Парето достаточно широкое, а тем более бесконечное, непосредственный анализ Парето-оптимальных вариантов становится затруднительным. Для успешного решения этой задачи выбора предпочтительных вариантов следует иметь в распоряжении какую-либо формализованную процедуру. Краткое описание и критический анализ подобных процедур различного типа, разработанных к настоящему времени, приводится в работах [151, 171].

1.4. Математические основы решения задач многокритериального выбора оптимальных проектных решений

Рассмотрим более подробно математические особенности задачи многокритериального выбора оптимальных проектных решений [17, 34, 47, 50, 72]. Эта задача состоит в выборе среди множества возможных решений (их называют также вариантами, планами, альтернативами) такого решения, которое являлось бы в определенном смысле наилучшим, или, как говорят, оптимальными.

Считается, что у ЛПП имеется свое представление о достоинствах и недостатках проектных решений, на основании которого одно решение предпочитается другому. Оптимальное решение — это решение, которое с точки зрения ЛПП предпочтительнее других возможных решений. Таким образом, понятие оптимального решения связано с предпочтениями ЛПП. Эти предпочтения на практике выражаются в различной форме и их математическая форма-

лизация может составить сложную задачу, поскольку ЛПР, как правило, не может ясно и четко сформулировать их.

Задача выбора оптимальных проектных решений состоит в разработке методов, которые помогли бы ЛПР, наиболее полно и точно выразить свои предпочтения в рамках соответствующей математической модели и в конечном счете обоснованно выбирать действительно оптимальные проектные решения с учетом совокупности показателей качества.

1.4.1. Модели задач выбора проектных решений

Общую постановку задачи выбора проектных решений, которая понимается как задача выбора из некоторого множества альтернатив, можно сформулировать следующим образом.

Пусть X — множество альтернатив, Y — множество возможных последствий (исходов, результатов). Предполагается существование причинной связи между выбором некоторой альтернативы $x \in X$ и наступлением соответствующего исхода $y \in Y$. Кроме того, предполагается наличие механизма оценки качества каждого выбора. Требуется выбрать наилучшую альтернативу, для которой соответствующий исход имеет наилучшую оценку. Здесь первый важный момент заключается в определении характера связей альтернатив с исходами. Эта связь может быть детерминистской (как часто говорят детерминированной). В этом случае существует однозначное отображение $X \rightarrow Y$, т.е. реализуется некоторая детерминированная функция $y = \varphi(x)$, $x \in X$, $y \in Y$. Задача выбора проектных решений иллюстрируется на рис. 1.1 [95].

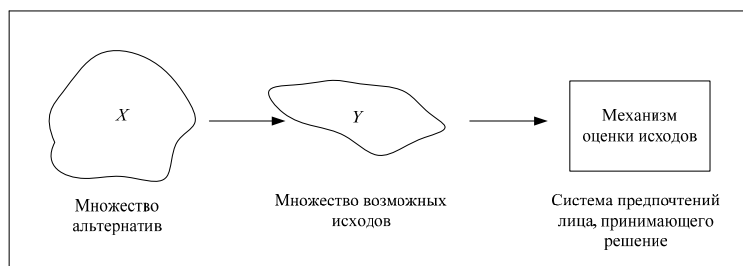


Рис. 1.1. Общая структура задачи выбора проектных решений

Связь альтернатив с исходами может иметь вероятностный характер, когда выбор альтернативы x определяет некоторая плот-

ность вероятности исходов y на множестве Y (рис. 1.2) [95]. В том случае выбор конкретной альтернативы x_i уже не гарантирует наступления определенного исхода y_i , а сама задача называется задачей принятия решений в условиях риска. При этом каждый исход характеризуется весом P_{ij} , то есть вероятностью (или плотностью вероятности) наступления исхода y_j при выборе альтернативы x_i . Третий возможный вид связи альтернатив с исходами реализуется в задачах принятия решений в условиях полной априорной неопределенности. При этом полагается отсутствие информации вероятностного характера о связи между x_i и y_j . При этом может быть известен лишь интервал нахождения соответствующих исходов.

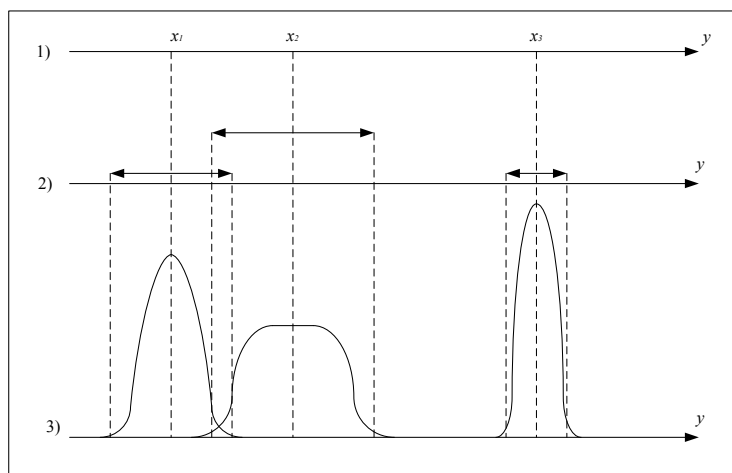


Рис. 1.2. Связь альтернатив с исходами при разных типах неопределенности

Второй важный момент в общей задаче принятия решений состоит в изучении (задании) системы предпочтений лица принимающего решения (ЛПР). Различные способы задания системы предпочтений могут быть реализованы для каждого вида связей альтернатив с исходами.

Критериальный язык описания системы предпочтений ЛПР

В некотором смысле простейшая ситуация возникает, когда каждый исход можно оценить конкретным вещественным числом в соответствии с некоторым заданным отображением

$$f: Y \rightarrow R. \tag{1.2}$$

В этом случае сравнение возможных исходов сводится к сравнению соответствующих им чисел, которые определяются значениями этих функций для соответствующих исходов. Например, исход y_i может считаться более предпочтительным чем y_j , если $f(y_i) > f(y_j)$. Исходы эквивалентны, если $f(y_i) = f(y_j)$. Для сравнения самих исходов употребляются выражения для соответствующих бинарных отношений $y_i \succ y_j$, $y_i = y_j$.

Функция $f(y_i)$ называется целевой функцией или критериальной функцией. Как известно из математики, однозначное отображение произвольного множества на множество вещественных чисел называется функционалом. Поэтому целевые функции часто называют целевыми функционалами.

Если предположить, что связь множеством альтернатив и множеством исходов детерминистская, то задача выбора оптимального исхода сводится к задаче выбора оптимальной альтернативы на множестве X решается непосредственно методами теории оптимизации путем нахождения экстремумов целевых функций.

Более реалистичной часто оказывается ситуация, когда в отличие от предыдущего случая «качество» или «полезность» исхода y_i оценивается не одним числом $f(y_i)$, а несколькими. Иначе говоря, предполагается, что существует несколько показателей качества решения, описываемых совокупностью целевых функций

$$f_k : X \rightarrow Y, k = 1, 2, \dots, m.$$

Понятно, что в случае многокритериальных оценок исходов возникают существенно более сложные математические модели ситуации выбора, чем в однокритериальном случае. Критериальные функции, обычно являются противоречивыми (антагонистичными) между собой и, как правило, достигают максимумов в различных точках (для разных исходов) $y \in Y$. Следовательно, возникают не только алгоритмические трудности по решению соответствующих оптимизационных задач, но и чисто концептуальные трудности: что понимать под оптимальным решением в этом случае? Кроме того, здесь появляются несравнимые по векторному критерию $\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$ варианты y_i, y_j .

Описание системы предпочтений ЛПП на языке бинарных отношений

Наряду с критериальным языком описания системы предпочтений ЛПП широко используется язык бинарных отношений. При этом предполагается, что отдельный исход сам по себе не оценивается и критериальные функции не вводятся, а каждая пара

исходов y_i, y_j может находиться в одном из следующих бинарных отношений:

- y_i предпочтительнее (строго доминирует) y_j ;
- y_i предпочтительнее y_j ;
- y_i не менее предпочтительнее, чем (не строго доминирует) y_j ;
- y_i не менее предпочтителен, чем y_j ;
- y_i эквивалентен y_j ;
- y_i, y_j несравнимы между собой.

Пусть задана система предпочтений ЛПР в виде некоторого бинарного отношения (часто это отношение строго доминирования). При этом задача принятия решений заключается в выборе из некоторого множества альтернатив таких решений, которые не доминируются другими решениями.

Существует связь между критериальным языком описания предпочтений ЛПР и языком бинарных отношений. В критериальном пространстве вводятся бинарные отношения между оценками качества решений с помощью целевых функций. В случае скалярной целевой функции на множестве Y индуцируются два бинарных отношения

$$f(y_i) \geq f(y_j), \quad (1.3)$$

$$f(y_i) > f(y_j). \quad (1.4)$$

При этом задача принятия оптимальных решений сводится к максимизации целевой функции в смысле (1.3) или (1.4).

Когда «качество» или «полезность» исходов оценивается не одним числом, а несколькими, предполагается, что существует несколько показателей качества решений, описываемых векторной целевой функцией $\vec{f}(y) = (f_1(y), \dots, f_m(y))$. В этом случае обычно используются следующие отношения доминирования:

$$\forall k: [\vec{f}(y_i) \geq \vec{f}(y_j)] \wedge [\vec{f}(y_i) \neq \vec{f}(y_j)], \quad (1.5)$$

$$\forall k: [\vec{f}(y_i) > \vec{f}(y_j)]. \quad (1.6)$$

Отношение (1.5) называется отношением Парето, а отношение (1.6) — отношением Слейтера.

Если для некоторого решения $y \in Y$ не существует более предпочтительного по Парето решения, то это решение называется эффективным или Парето-оптимальным решением. Множество, включающим все эффективные элементы множества Y , обознача-

ется $P(Y)$ и называется множеством Парето для векторного отношения

$$\vec{f}: Y \rightarrow R^m. \quad (1.7)$$

Очевидно, что $P(Y) \subseteq Y$. Образ множества $P(Y)$ в пространстве критериев R^m называется множеством эффективных оценок $P(f) = f(P(Y))$ (или множеством Парето в пространстве критериев).

Смысл понятия эффективных решений состоит в том, оптимальное решение следует искать только среди элементов множества недоминируемых альтернатив $P(Y)$ (принцип Парето). В противном случае всегда найдется решение $y \in Y$, которое является более предпочтительным с учетом векторной целевой функции (1.5).

Аналогично при использовании отношения доминирования (1.6) вводится понятие слабо эффективных (оптимальных по Слейтеру) решений $S(Y)$. Очевидно, что $P(Y) \subseteq S(Y)$.

Принятие решений на основе функций выбора

Наряду с критериальным языком и языком бинарных отношений существует более общий подход к выбору оптимальных решений. Он основан на понятии функции выбора. Основная идея заключается не в оценке каждой альтернативы с помощью одной или нескольких числовых критериев или в попарном сравнении альтернатив по предпочтительности, а выделении из некоторого исходного множества Y подмножества «лучших» вариантов. В результате происходит сужение множества Y , что и моделирует процесс выбора «лучших» вариантов.

С помощью понятия функции выбора можно описывать и ранее рассмотренные варианты выбора оптимальных решений, сформулированные на критериальном языке и языке бинарных отношений. Однако основное достоинство нового языка состоит в возможности моделирования более сложных принципов выбора, которые нельзя реализовать на критериальном языке и языке бинарных отношений. Например, это задача выбора из заданного множества альтернатив «среднего» или «типичного» варианта. Типичные ситуации выбора описываются функциями выбора, удовлетворяющими некоторым специальным ограничениям. Наиболее часто на функции выбора накладываются ограничения, сводящиеся к выполнению некоторых свойств, в частности, наследования, отбрасывания, согласованности и др.

1.4.2. Решение многокритериальных задач оптимизации

Как указывалось выше, различные типы связей между альтернативными решениями и исходами определяют различные типы задач принятия решений. Рассмотрим основываясь на работах [30, 34] более подробно одну из них: принятие решений при детерминистской связи между альтернативами и исходами, а также при оценивании исходов векторными целевыми функциями. При этом задачи принятия решений сводятся к решению многокритериальных задач оптимизации в критериальном пространстве.

Многокритериальная задача оптимизации вместе с *множеством возможных* (допустимых) решений $x \in X$ включает набор *целевых функций* (называемых также критериями) f_1, f_2, \dots, f_m , заданных на множестве X . Предполагается, что $m > 1$. При $m = 1$ задача оптимизации называется однокритериальной. Набор целевых функций образует вектор-функцию, которая обозначается через $\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$.

Наряду с множеством допустимых решений рассматривают множество

$$\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)), \quad (1.8)$$

при некоторых $x \in X$, которое называют *множеством оценок*, а его элементы — *оценками*. Пространство R^m , в котором содержатся векторы $\vec{y} = \vec{f}(x)$, называется *пространством оценок* или *критериальным пространством*.

Каждому решению $x \in X$ соответствует одна вполне определенная оценка $\vec{y} = \vec{f}(x) \in Y$. С другой стороны, каждой оценке отвечают решения $x \in X$ (их может быть и более одного), для которых $\vec{f}(x) = \vec{y}$. Таким образом, между множествами X и Y имеется тесная связь и поэтому выбор решений из множества X в указанном смысле равносильен выбору соответствующей оценки в критериальном пространстве Y .

В многокритериальной задаче оптимизации заранее известна определенная информация о предпочтениях лица, принимающего решение. Это суждения о том, что желательно целевые функции максимизировать (или минимизировать). При этом может быть известна и использована различная другая дополнительная информация о предпочтениях ЛПР. Для описания предпочтений лица, принимающего решение, используют математические понятия, называемые отношениями.

Определение отношений. Для сравнения вещественных чисел используются простые отношения, определяемые знаками $>$, \geq , $<$,

$\leq, =$. Применение этих символов предполагает наличие пары чисел, одно из которых записывает слева от символа, а другое — справа. При этом говорят, что данные числа находятся в некотором отношении друг относительно друга (первое число больше второго, первое число больше либо равно второму и т. д.)

В определенных отношениях могут находиться не только числа, но и более сложные объекты, в частности, системы. Дадим строгое определение отношения. Пусть A — некоторое множество. Образует декартово произведение $A \times A$ — множество всех упорядоченных пар вида (a, b) , где $a \in A, b \in A$. Отношением, заданным на множестве A , называют подмножество множества $A \times A$, т. е. такое множество R , что $R \subset A \times A$. Если выполнено отношение $(a, b) \in R$, то говорят, что элементы a и b находятся в отношении R и при этом пишут aRb . Заметим, что декартово произведение — это множество упорядоченных пар, поэтому запись aRb и bRa означает не одно и то же (за исключением случая $a = b$). На одном и том же множестве могут быть заданы различные отношения в зависимости от того, какие именно пары (a, b) , составляют множество R . В частности, множество, R может не содержать ни одной пары, содержать все возможные пары, т. е. $R = A \times A$, включать только пары из одинаковых элементов (a, a) (отношение равенства).

Рассмотрим примеры отношений для векторов. Пусть $A = R^n$. При этом встречаются отношения $>$ и \geq , заданные на R^n :

$$\vec{a} \geq \vec{b} \text{ означает, что } a_i \geq b_i, i = 1, 2, \dots, n; \quad (1.9)$$

$$\vec{a} > \vec{b} \text{ означает, что } a_i > b_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.10)$$

где $\vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\vec{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$.

Отношение (1.9) означает что $a_i \geq b_i, i = 1, 2, \dots, n$, причем хотя бы для одного номера $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ выполняется строгое неравенство $a_i > b_i$. Отношение (1.10) означает, что $a_i > b_i$, выполняется для всех $i = 1, 2, \dots, n$. При $n = 1$ эти отношения совпадают с отношением для чисел.

Элементы \vec{a} и \vec{b} множества A называют сравнимыми по некоторому отношению R , если обязательно выполняется соотношение aRb или bRa , и не сравнимыми по отношению R , если неверно ни отношение aRb , ни отношение bRa .

Отношения предпочтения и различимости. Выбор решения из множества возможных решений X равносильен выбору оценки из множества оценок Y , поэтому здесь для удобства множество воз-

возможных решений будем обозначать буквой Z , считая что в качестве Z может быть взято как множество X , так и множество Y . Для определенности зафиксируем ЛПР. Если из двух заданных решений a и b множества A ЛПР выбирает решение a , то говорят, что решение a более предпочтительно, чем решение b . Для пары вида (a, b) , где $a, b \in Z$, для которых решение a более предпочтительно, чем решение b , образуют некоторое множество, которое называют отношением строго предпочтения и обозначать символом \succ . Указанное множество является отношением, заданным на множестве Z . В соответствии с этим запись $a \succ b$ означает, что решение a для ЛПР более предпочтительно, чем решение b .

Когда сравнивается по предпочтительности пара решений a и b , возможен и такой случай, когда не будет отдано предпочтение ни одному из них. Это заведомо имеет место, если, например, $a = b$. Поэтому вводят отношение неразличимости. Говорят, что решения a и b , где $a, b \in Z$, неразличимы, если не выполняется ни отношение $a \succ b$, ни отношение $b \succ a$. Другими словами, решения a и b неразличимы, если они несравнимы по отношению \succ . Множество пар вида (a, b) , в которых решения a и b неразличимы, называют отношением неразличимости (отношением безразличия) и обозначают символом \sim .

Отношение $a \sim b$ может иметь место тогда, когда ЛПР считает, что в смысле предпочтения для него нет разницы между решениями a и b (в частности, когда $a = b$). Кроме того, отношение неразличимости может быть и в случае, если решения a и b ЛПР вообще никак не может сравнить друг с другом.

Итак, для произвольно выбранной пары решений $a, b \in Z$ выполняется одно и только одно из заданных отношений: $a \succ b$, $b \succ a$, $a \sim b$. Нередко удобно рассматривать еще одно отношение «не менее предпочтительно чем», являющееся объединением отношений \succ и \sim . Оно называется отношением нестрогого предпочтения и обозначается \geq . Таким образом, соотношение обозначает, что имеет место отношение $a \succ b$ или же выполнено отношение $a \sim b$.

Множество оптимальных решений. Пусть ЛПР при выборе решения из множества Z руководствуется некоторым отношением строгого предпочтения \succ , являющимся асимметричным и транзитивным. Воспользуемся отношением \succ для того, чтобы выделить решения, которые могут быть «лучшими», т. е. оптимальными, решениями. Все те решения, для которых найдутся более предпочтительные решения, следует удалить из множества Z ; их заведомо нельзя считать оптимальными. В результате подобного исключения

в множестве Z останутся решения (единственное решение), каждое из которых может быть признано оптимальным согласно данному отношению \succ .

Таким образом, решения $z^{(0)} \in Z$ называют оптимальным по отношению строгого предпочтения \succ на множестве Z , если не существует других решений $z \in Z$, для которых будут справедливы отношения $z \succ z^{(0)}$. Аналогично, используя отношение \geq , можно привести эквивалентную формулировку оптимальности решений по отношению нестрогого предпочтения.

Множество всех оптимальных решений по отношению строгого предпочтения \succ на множестве Z обозначают через $opt \succ Z$. В зависимости от структуры и вида отношения \succ множество $opt \succ Z$ может содержать единственный элемент, конечное или бесконечное множество элементов, а также не содержать ни одного элемента.

Если множество Z непусто и содержит конечное число элементов, а отношение \succ асимметрично и транзитивно, то $opt \succ Z \uparrow 0$. Доказательство этого утверждения носит конструктивный характер и представляет собой алгоритм нахождения всего множества оптимальных решений. Введем обозначение:

$$Z = Z_1 = \{z^{(11)}, z^{(12)}, \dots, z^{(1n_1)}\}. \quad (1.11)$$

Если $n_1 = 1$, то $Z_1 = \{z^{(11)}\} = opt \succ Z_1$. Поэтому дальше будем считать $n_1 > 1$.

Первый шаг алгоритма заключается в попарном сравнении решения $z^{(1i)}$ с каждым из остальных решений. Если для некоторого $i \in \{2, 3, \dots, n_1\}$ выполняется отношение $z^{(11)} \succ z^{(1i)}$, то решение $z^{(1i)}$ из множества Z_1 удаляют: оно не может быть оптимальным. В противном случае, когда $z^{(11)} \sim z^{(1i)}$ либо $z^{(11)} \prec z^{(1i)}$, решение $z^{(1i)}$ сохраняют. После выполнения всех сравнений решение $z^{(11)}$ также следует удалить из $z^{(11)} \sim z^{(1i)}$. При этом, если ни для какого $i = 2, 3, \dots, n_1$ не оказалось выполненным отношение $z^{(11)} \succ z^{(1i)}$, то решение $z^{(11)}$ является оптимальным и его нужно запомнить. Оставшееся в результате удаления множество решений обозначим через $Z_2 = \{z^{(21)}, z^{(22)}, \dots, z^{(2n_2)}\}$, $n_2 < n_1$.

Если $Z_2 = \emptyset$, то решение $z^{(11)}$ является оптимальным (оно хранится в памяти), поскольку в силу асимметричности отношения \succ из соотношения следует, что отношение $z^{(1i)} \succ z^{(11)}$, $i = 2, 3, \dots, n_1$ не может иметь места. В этом случае процедура отыскания множества $opt \succ Z_1$ закончена. Если же $Z_2 \neq \emptyset$, то переходят к следующему шагу алгоритма.

Второй шаг аналогичен первому и заключается в попарном сравнении решения $z^{(21)}$ с каждым из решений $z^{(22)}, \dots, z^{(2n_3)}$. Все решения $z^{(2i)}$, для которых $z^{(21)} \succ z^{(2i)}$, из множества Z_2 исключают. Кроме того, удаляют решение $z^{(21)}$. При этом, если ни для какого $i = 2, 3, \dots, n_2$ не оказалось выполненным соотношение $z^{(2i)} \succ z^{(21)}$, то $z^{(21)} \in \text{opt} \succ Z_2$, более того $z^{(21)} \in \text{opt} \succ Z_1$ и решение $z^{(21)}$ следует запомнить. В самом деле, соотношение $z^{(11)} \succ z^{(21)}$ не может иметь места, так как решение $z^{(21)}$ не было удалено из Z_1 на первом шаге. Отношение $z^{(i1)} \succ z^{(21)}$ для $z^{(i1)} \in Z_1 \setminus Z_2$, $i \uparrow 1$, также не может быть выполнено, поскольку $z^{(11)} \succ z^{(i1)}$ и отношение \succ транзитивно: из $z^{(11)} \succ z^{(i1)}$ и $z^{(i1)} \succ z^{(21)}$ следует, что $z^{(11)} \succ z^{(21)}$. Оставшееся после исключения множество решений обозначают через $Z_3 = \{z^{(31)}, z^{(32)}, \dots, z^{(3n_3)}\}$, $n_3 < n_2$. Если $Z_3 \neq \emptyset$, то переходят к следующему шагу и т. д.

Алгоритм таков, что, согласно транзитивности отношения \succ , решение $z^{(k1)}$, оптимальное на множество Z_k , является оптимальным на Z_{k-1} , $k = 2, 3, \dots$, а значит, и на исходном множестве Z_1 .

Так как множество Z_1 содержит конечное число элементов, то через конечное число шагов процедура закончится. Решения, хранящиеся в памяти, образуют искомое непустое множество $\text{opt} \succ Z$.

«Трудоемкость» сформулированного алгоритма определяются наименьшим и наибольшим возможным числом попарных сравнений, которое потребуется для нахождения всего множества $\text{opt} \succ Z$. Наименьшее число сравнений $n_1 - 1$ имеет место, если $z^{(11)} \succ z^{(i1)}$, $i = 2, 3, \dots, n_1$. В самом «длинном варианте» придется сравнивать между собой все возможные пары решений, и поэтому максимальное число сравнений равно $n_1(n_1 - 1)/2$.

Согласованность отношений предпочтения на множестве решений и на множестве оценок. Пусть векторная целевая функция $\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$ определена на множестве допустимых решений $X \subset R^n$. Данному множеству X при отображении f соответствует множество оценок Y , определяемое равенством (1.8). Будем полагать, что на множествах X и Y заданы отношения строгого предпочтения \succ_x и \succ_y соответственно. Каждому решению $x \in X$ соответствует соответствующая оценка $y = f(x) \in Y$, и, наоборот, каждой оценке y соответствуют такие решения x , для которых $f(x) = y$. Поэтому указанные отношения согласованы друг с другом: $y \succ_y y'$, имеет место тогда и только тогда, когда $x \succ_x x'$, где $y = f(x)$ и $y' = f(x')$. Следовательно, результаты, сформулирован-

ные в терминах оценок, могут быть переформулированы применительно к решениям, и наоборот.

Парето-оптимальные оценки и решения. Рассмотрим две произвольные оценки \bar{y} , $\bar{y}' \in Y$, которые связаны между собой неравенством $y \geq y'$ (т. е. $y \neq y'$). При этом оценка может оказаться для лица, принимающего решение, предпочтительней, чем y' .

Многокритериальная задача максимизации характеризуется тем, что оценка \bar{y} всегда предпочтительнее оценки \bar{y}' , если только $\bar{y} \geq \bar{y}'$. В многокритериальной задаче максимизации считают выполненной аксиома Парето (в терминах оценок): для любых двух оценок \bar{y} , $\bar{y}' \in Y$ удовлетворяющих неравенству $\bar{y} \geq \bar{y}'$, всегда имеет место отношение $\bar{y} \succ_Y \bar{y}'$. Аксиома Парето (в терминах решений) формулируется следующим образом: для любых двух решений x , $x' \in X$, для которых верно $\bar{f}(x) \geq \bar{f}(x')$, всегда имеет место отношение $x \succ_X x'$. Аналогично формулируется многокритериальная задача минимизации.

Аксиомы Парето накладывает определенные требования на характер отношения предпочтения в многокритериальной задаче максимизации. А именно: для ЛПП желательно по каждому из критериев f_1, f_2, \dots, f_m получить по возможности большее значение, т. е. максимизировать каждый из критериев. Точка максимума на множестве X одновременно для всех функций f_1, f_2, \dots, f_m заведомо является оптимальным решением многокритериальной задачи максимизации. Однако на практике этот случай имеет место крайне редко, так как такой точки максимума, как правило, не существует. Поэтому при отсутствии дополнительной информации о предпочтениях \succ_X и \succ_Y в многокритериальной задаче удается лишь указать определенную оценку сверху для искомого множества оптимальных решений.

Согласно аксиоме Парето, в многокритериальных задачах отношение \geq играет важную роль. Множество оптимальных оценок по отношению \geq на множестве Y имеет специальное название: *множество Парето-оптимальных (оптимальных по Парето) или эффективных оценок*. Это множество обозначают через $P(Y)$. Используя символику, принятую выше можно записать: $P(Y) = opt \geq Y$. Включение $\bar{y}^{(0)} \in P(Y)$ имеет место тогда и только тогда, когда не существует другой оценки $\bar{y} \in Y$, для которой было бы выполнено неравенство $\bar{y} \geq \bar{y}^{(0)}$.

При $m = 1$ отношение \geq превращается в отношение $>$ для чисел и Парето-оптимальная оценка совпадает с максимальным элементом числового множества $y \subset R$. Если $m = 2$ (т. е. имеется два критерия), то множество $P(Y)$ имеет простую геометрическую интерпретацию в критериальном пространстве. Образно говоря, $P(Y)$ является «северо-восточной» границей множества Y без тех ее частей, которые параллельны одной из координатных осей или же лежат в «глубоких провалах».

Соответственно согласно аксиоме Парето решение $x^{(0)} \in X$, для которого справедливо включение $y^{(0)} = f(x^{(0)}) \in P(Y)$, называют *Парето-оптимальным (оптимальным по Парето)* или *эффективным решением* относительно вектор-функции \vec{f} на множестве X . Множество всех таких решений обозначают через $P_f(X)$. Таким образом, включение $x^{(0)} \in P_f(X)$ имеет место тогда и только тогда, когда не существует решения такого, чтобы выполнялось неравенство $f(x) \geq f(x^{(0)})$.

Если $m = 1$, сформулированное определение Парето-оптимального решения превращается в определение точки максимума числовой функции f_1 . Таким образом, понятие Парето-оптимальной точки можно рассматривать как обобщение понятия точки максимума функции на случай нескольких целевых функций.

Итак, формулирование задачи многокритериального выбора оптимальных решений включает такие основные элементы: множество возможных решений, векторный критерий оптимальности, отношение предпочтения, заданное на множестве возможных решений. Само ЛПР в постановку задачи многокритериального выбора не включено. Подразумевается, что все устремления ЛПР, вкусы, пристрастия и предпочтения, оказывающие влияние на процесс выбора, «материализованы» в терминах векторного критерия оптимальности.

К сожалению, в подавляющем числе многокритериальных задач полученное множество Парето оказывается довольно широким, и конкретный выбор в его пределах не является очевидным. По этой причине и возникает проблема сужения множества Парето, связанная с выбором того или иного конкретного Парето-оптимального варианта в качестве «наилучшего». Положительное решение этой проблемы представляет большой интерес для практики, поскольку в конкретных прикладных задачах выбора, как правило, следует ограничиться одним или же сравнительно небольшим количеством выбранных вариантов. К настоящему времени для ре-

шения указанной проблемы предложено множество самых различных подходов — от эвристических до аксиоматических. В работах [151, 171] рассмотрены разные подходы к решению проблема сужения множества Парето до единственного проектного решения.

В частности, в работе [171] разработаны метод и программное средство для сокращения времени поиска подмножества Парето-оптимальных альтернатив и выбора лучшей из них на основе аддитивной, мультипликативной или смешанной функций обобщенной полезности. Их суть сводится к исключению области поиска, где в принципе не могут существовать Парето-оптимальные решения. Определены аналитические оценки временной сложности и проведен сравнительный экспериментальный сравнительный анализ эффективности реализованных алгоритмов выбора для методов парных сравнений. Практическое использование разработанных алгоритмов и программного средства позволяет за счет сокращения области поиска существенно снижать временную сложность процедуры выбора оптимальных проектных решений.

1.5. Приближенные методы многокритериальной оптимизации

Как следует из предыдущего подраздела, решением многокритериальной задачи оптимизации является подмножество эффективных (Парето-оптимальных) решений, которое выбирается из исходного множества решений. Согласно принципу Эджворта-Парето оптимальные проектные решения с учетом совокупности показателей качества следует искать только в подмножестве Парето. При этом точное оптимальное решение может быть получено лишь при наличии бесконечного исходного множества решений с использованием введенных отношений предпочтения.

На практике иногда используются некоторые приближенные («инженерные») методы решения задач многокритериальной оптимизации [4, 5, 11, 25, 26, 33]. В этих методах многокритериальная задача оптимизации сразу сводится к ее однокритериальной версии, исключая этап выбора подмножества Парето-оптимальных решений. Рассмотрим некоторые из этих методов.

Будем считать, что альтернативные решения описываются n -мерным вектором параметров $\vec{x} \in R^n$ проектируемой системы, качество функционирования которой оценивается совокупностью показателей и соответствующих им целевых функционалов

$f_1(\bar{x}), \dots, f_m(\bar{x})$. Полагается, что существуют ограничения, при которых оптимальные варианты системы будут искажаться не во всем n -мерном пространстве R^n , а лишь в пределах подмножества допустимых вариантов $D \subseteq R^n$.

Метод главного критерия. В методе главного критерия в качестве целевой функции выбирается один из функционалов $f_i(\bar{x})$, например, $f_1(\bar{x})$, который наиболее полно с точки зрения ЛПР отражает цель принятия решений. Остальные требования к результату выбора, описываемые другими функционалами, учитываются с помощью введения необходимых дополнительных ограничений. Таким образом, вместо задачи многокритериальной оптимизации вида

$$f_i(\bar{x}) \rightarrow \max, \quad i = 1, \dots, m, \quad \bar{x} \in D \subseteq R^n \quad (1.12)$$

решается другая, уже однокритериальная задача с ограничениями

$$f_1(\bar{x}) \rightarrow \max, \quad \bar{x} \in D' \subseteq D \subseteq R^n, \quad (1.13)$$

$$D' = \{ \bar{x} \in D / f_i(\bar{x}) \geq t_i, i = 2, \dots, m \}.$$

Формально при этом получается более простая оптимизационная задача поиска максимума скалярного функционала $f_1(\bar{x})$ на новом допустимом множестве D' . Добавились ограничения $f_i(\bar{x}) \geq t_i$, показывающие что проектировщики согласны не добиваться максимальных значений для функционалов $f_2(\bar{x}), \dots, f_m(\bar{x})$, сохраняя лишь требования их ограниченности на приемлемых уровнях. При этом важно понимать, что переход от задачи (1.12) к задаче (1.13) вовсе не есть переход от одной оптимизационной задачи к другой эквивалентной задаче. При этом произошло существенное изменение исходной постановки задачи, которое в каждой конкретной ситуации требует отдельного обоснования. Отметим, что применение этого метода на интуитивном уровне обычно наталкивается на трудности, связанные с существованием нескольких «главных» критериев, находящихся в противоречии друг с другом. Кроме того, не всегда ясен выбор ограничений t_i . Их необоснованное задание может привести, в частности, к пустому множеству D' .

Метод линейной свертки. Это наиболее часто применяемый метод скаляризации (свертки) задачи (1.12). Он позволяет заменить векторный критерий на скалярный, который основан на линейном объединении частных целевых функционалов в один функционал

$$J(\bar{x}) = \sum_{j=1}^m \alpha_j f_j(\bar{x}) \rightarrow \max, \quad \alpha_j > 0, \quad \sum_j \alpha_j = 1, \quad \bar{x} \in D \subseteq R^n. \quad (1.14)$$

Здесь весовые коэффициенты α_i могут рассматриваться как показатели относительной значимости отдельных критериальных функционалов $f_i(\bar{x})$. Однако при наличии существенно разнохарактерных частных критериев обычно бывает достаточно сложно указать окончательный набор весовых коэффициентов α_i , исходя из неформальных соображений, связанных, как правило, с результатами экспертного анализа.

Метод максиминной свертки. Этот метод обычно применяется в форме

$$J(\bar{x}) = \min f_j(\bar{x}) \rightarrow \max, \quad \bar{x} \in D \subseteq R^n. \quad (1.15)$$

Здесь, в отличие от метода линейной свертки, на целевой функционал оказывает влияние тот частный функционал, которому в данной точке \bar{x} соответствует наименьшее значение. И если в случае свертки (1.14) возможны «плохие» значения некоторых целевых функций за счет достаточно «хороших» значений остальных целевых функционалов, то в случае максиминного критерия производится расчет на «наихудший случай». При этом по значению (1.15) можно определить гарантированную нижнюю оценку для всех функционалов. Этот факт расценивается как преимущество максиминного критерия перед методом линейной свертки.

Существуют и другие методы, которые сводят многокритериальную задачу оптимизации к задачам скалярной оптимизации с разного рода ограничениями. В частности, это метод последовательных уступок, метод основанных на лексографических отношениях и др. [4, 17, 24, 54, 84, 95]. Эти методы требуют привлечения дополнительной информации от экспертов для постановки и решения разных типов скалярных оптимизационных задач с ограничениями.

Следует заметить, что при определенных условиях эти методы приводят к единственному решению, которое является Парето-оптимальным. Однако при проектировании систем важен этап поиска всего множества Парето-оптимальных решений и получению при этом многомерных потенциальных характеристик системы и многомерных диаграмм обмена совокупности показателей качества системы. Эта информация является важной для проектировщиков, поскольку она дает возможность проводить не только синтез, но и анализ проектных вариантов. Поэтому рационально решать задачу многокритериальной оптимизации в самом общем виде и получать Парето-оптимальные варианты решений, а затем уже привлекать различного рода дополнительную информации от

экспертов с целью выбора единственного предпочтительного проектного варианта системы.

1.6. Анализ особенностей оптимизационных задач в телекоммуникациях

Интенсивное развитие и важность отрасли телекоммуникаций и информационной инфраструктуры, серьезная конкуренция в этой сфере заставляет операторов связи использовать новые оптимальные средства телекоммуникаций в планировании, развитии и модернизации сетей различного назначения при строгом учете совокупности технико-экономических требований [99, 103, 145, 152, 153, 157, 64, 172].

При этом возникает необходимость применения многокритериального подхода не только к построению сетей связи, но и к организации бизнес-процессов в этих сетях, в частности, в биллинговых системах, системах обслуживания пользователей, системах управления сетевыми ресурсами, финансовых и вычислительных системах [98–102]. Системы поддержки принятия решений (СППР) при многих критериях в бизнес-процессах имеют сегодня особую важность для операторов связи, потому что они помогают увеличить конкурентоспособное преимущество, благодаря улучшению бизнес-процессов.

Кратко рассмотрим особенности некоторых оптимизационных задач, решаемых в области телекоммуникаций. При анализе телекоммуникационных сетей используются разные типы моделей для выбора проектных решений. Типичные задачи проектирования в телекоммуникациях обычно решались в основном с использованием методов однокритериальной оптимизации. В частности, это задачи перехода с медной на оптоволоконную технологию и анализа развития сетей, выбора оптимальных маршрутов и определение оптимальной скорости передачи, выбора архитектуры сетей, распределение каналов, месторасположение спутников [8, 11, 15, 22, 59, 82].

Фундаментальной проблемой в таких задачах проектирования является вычислительная сложность принятия решений для таких смешанных (бинарно-непрерывных) оптимизационных задач. При этом получали приближенные решения таких задач методами однокритериальной оптимизации. Для этого в основном использовались генетические и эволюционные алгоритмы. Можно

привести несколько примеров соответствующих программных комплексов, используемых при планировании телекоммуникационных сетей [98]:

- SONET toolkit — система принятия решений для разработки финансово-выгодных и гибких оптоволоконных сетей;
- NETCAP — интерактивная система оптимизации для планирования телефонных сетей;
- ARCHANE — система принятия решений в разработке соединений между коммутируемыми базами.

Многокритериальный анализ и оптимизация имеет преимущества над однокритериальной оптимизацией и интенсивно развивается в различных технических приложениях [18, 24, 25, 33, 35]. Однако эти методы еще не являются общепринятыми и широко известными среди разработчиков, работающих в области телекоммуникаций. Еще одна причина состоит в том, что проектировщики еще не полностью реализуют постоянно растущие возможности современных компьютеров. Ранее многокритериальный анализ не мог быть применен при больших размерностях сетевых моделей, поскольку вычислительный процесс оптимизации занимал много времени. Теперь это ограничение не такое жесткое, но все равно методы многокритериального анализа применяется для упрощенных моделей и многокритериальный анализ может быть использован в телекоммуникациях, в таких задачах: поддержка стратегического управления, планирование сетей, проектирование сетей, маршрутизация [71, 113, 117, 128].

Стратегическое управление сетью является одной из важнейших областей применения многокритериального анализа. Например, долгосрочные платежи и льготы, краткосрочные затраты могут быть отражены в основных стратегических решениях [2, 9, 55, 86].

Планирование и проектирование телекоммуникационных сетей является очень сложным процессом. Применение различных типов аналитического моделирования и аналитических технических средств увеличивает надежность и качество телекоммуникационных сетей.

Известно применение методов многокритериальной оптимизации при номинальном планировании сетей сотовой связи, при выборе оптимальной структуры и параметров транспортных сетей, управления сетями связи, при маршрутизации с учетом совокупности показателей качества [117, 129].

Проблема маршрутизации становится одной из наиболее значимых областей в задаче управления сетями. Это важная задача потому что телекоммуникационные сети является инфраструктурой, предоставляющей различные услуги с разным уровнем качества. В вопросе маршрутизации обычно рассматривается несколько критериев, таких как: стоимость, ширина полосы пропускания, задержка, джиттер, потерянные пакеты, вероятность ошибок [113,128].

Рассмотрим более подробно особенности многокритериального подхода к анализу в стратегическом управлении и стратегическом планировании. Полагается, что ведется подготовка к переговорам относительно соглашения об объединении одного телекоммуникационного оператора с другим. Для этой цели требуется создать модель зависимости запроса на услуги связи от цены таких услуг (по крайней мере для данной области или города). Эта модель должна быть дополнена моделью затрат на поставку таких услуг. Если модель создана одним из операторов, то она дополняется постулируемой моделью для противоположного оператора. Для регулирующего органа модель основана на данных, предоставленных обоими операторами в соответствии с законодательством, регулирующим вопросы присоединения. Указанные сложные модели могут быть оценены с учетом совокупности показателей качества и проанализированы с разных точек зрения [86,93]:

1. Точка зрения телекоммуникационного оператора.

Оператор мог принимать цены, требуемые за услуги противоположным оператором и выполнять многокритериальный анализ следующей проблемы: какие цены устанавливать с целью повышения его собственного ресурса на рынке, не теряя слишком много прибыли. После такого анализа, оператор может играть роль своего оппонента и анализировать ответы другого оператора на той же модели, учитывая его собственные цены. Это может быть первоначальной подготовкой к фактическим переговорам относительно тарифов соединений.

Объединив цели обеих сторон — его собственных, так и противоположной стороны, оператор может создать и проанализировать многокритериальную модель, чтобы получить характеристику возможных компромиссов в переговорах.

2. Точка зрения регулирующего органа.

Регулирующий орган может использовать такую модель, чтобы определить и вычислить возможный компромисс, принимая во

внимание несколько критериев. Регулирующее воздействие может быть использовано в возможном арбитраже споров на соглашение операторов, которые соединяются.

3. Точка зрения оператора доминирования

Оператор доминирования может использовать такие модели не только, чтобы готовиться к соглашению о объединении, но также и проверять, будут ли требуемые цены соединителей далеки от согласованного компромисса, определенного регулирующим воздействием. Если цены будут отличаться слишком много от математических ожиданий регулирующего воздействия, то оператор доминирования делает риск путем вмешательства своим воздействием.

Таким образом, анализ критериев телекоммуникационных рыночных моделей может использоваться операторами на рынке услуг связи.

При стратегическом планировании в телекоммуникациях все планы имеют три общих компоненты — начальное состояние, цель (или конечное состояние) и средства, связывающие эти два состояния. Цель процесса планирования — соединить компоненты за наименьшую цену, чтобы максимизировать эффективность планов [53,86]. Следует произвести точный подсчет всех ресурсов и ограничений для начального состояния с целью обеспечения максимизации эффективности планирования. Гораздо лучше оценка эффекта начального состояния получается, если все имеющиеся ресурсы и все критические ограничения явно описаны.

Второй компонентой является цель. При условии, что остальные две компоненты заданы правильно, эта компонента становится просто мишенью. Цель должна быть хорошо поставлена, достижима, а также пересмотрена и изменена в соответствии с требованиями обстоятельств.

Третьей компонентой плана являются средства. Эта компонента — сам план, так как по существу в ней содержится описание метода, с помощью которого происходит переход от начального состояния к цели. Две первые компоненты можно в основном рассмотреть теоретически; третья компонента, напротив, более конкретна. Она должна содержать: факторы, воздействующие на цель; внутренние и внешние силы, действующие на эти факторы; цели операции; сознательную последовательность шагов и вероятные состояния, пригодные для принятия оптимальных решений, которые нужны для управления процессом.

Ключ к пониманию процессов планирования сценарий. Сценарий — это гипотетический исход, который воспринимается и определяется с помощью некоторых предположений о текущей и будущих тенденциях. Предположения должны быть разумными и не выходить за рамки естественных ограничений, лимитов времени и технологии. Есть два типа сценариев — исследовательский и предваряющий. Первый следует от настоящего к будущему, в то время как второй тип сценария проходит обратный путь, который начинается от будущего состояния и продвигается назад к настоящему, чтобы выявились влияния и действия, нужные для реализации желаемой цели. Каждый из сценариев в случае необходимости можно прокрутить заново.

Из проведенного анализа особенностей оптимизационных в области телекоммуникаций можно сделать вывод об актуальной необходимости изложения в систематизированном виде методологии многокритериального анализа и выбора предпочтительных проектных вариантов систем, которую можно предложить проектировщикам систем. Кроме того, необходимо также рассмотреть практические особенности применения этой методологии многокритериального анализа и выбора на примерах для различных типов средств телекоммуникаций.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ С УЧЕТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

В данном разделе изложена методология многокритериального выбора оптимальных проектных решений как взаимосвязанная совокупность формализованных методов и процедур задания критерия оптимальности проектируемой системы, формирования исходного множества проектных решений, нахождения подмножества Парето-оптимальных вариантов с учетом совокупности противоречивых показателей качества, а также сужение этого подмножества до единственного предпочтительного проектного решения с привлечением дополнительной информации от экспертов. При изложении в основном использованы материалы публикаций авторов [177, 178, 180, 185, 193, 195, 209, 210, 213, 220, 225, 233, 237, 238, 240, 250].

2.1. Формализованная процедура задания критерия оптимальности проектных решений

Задача принятия оптимальных проектных решений состоит в выборе из исходного множества возможных вариантов системы таких проектных решений, которые являлись бы в определенном смысле наилучшими (как говорят, оптимальными). Рассмотрим особенности постановки и решения задач оптимизации проектных решений по векторному критерию оптимальности, который учитывает совокупность показателей качества, характеризующих эти решения. Такие задачи называются задачами векторной или многокритериальной оптимизации.

Считают, что выбор проектных решений выполняет некоторое лицо, принимающее решение (ЛПР), которое преследует вполне определенные цели. В зависимости от конкретной ситуации в роли ЛПР может выступать как отдельный человек (инженер-проекти-

ровщик), так и целый коллектив (группа специалистов, занятая решением задачи проектирования системы).

Каждое возможное проектное решение характеризуется определенной степенью достижения поставленной цели. В соответствии с этим у ЛПР имеется свое представление о достоинствах и недостатках проектных решений, на основании которого одно решение предпочитается другому. Оптимальное проектное решение — это решение, которое с точки зрения ЛПР предпочтительнее других возможных решений. Таким образом, понятие оптимального решения связано с предпочтениями ЛПР. Эти предпочтения на практике выражаются в различной форме и их математическая формализация может составить непростую задачу. Это связано с тем, что ЛПР, как правило, не может ясно и четко сформулировать свои предпочтения в таком виде, чтобы их можно было описать некоторыми математическими категориями.

Формализация задачи принятия оптимальных проектных решений и состоит в выборе математических средств, которые помогли бы ЛПР наиболее полно и точно выразить свои предпочтения в рамках соответствующей математической модели выбора. Это позволит сформулировать соответствующую оптимизационную задачу и в конечном итоге обосновано выбирать действительно оптимальные проектные решения.

Таким образом, оптимальное проектное решение — это наилучшее решение, которое с точки зрения ЛПР предпочтительнее других проектных решений. Задание критерия оптимальности для выбора наилучших решений из множества допустимых проектных решений связано с формализацией понятия ЛПР про оптимальность проектных решений. При этом существуют два подхода к определению понятия оптимальности решений: ординалистический и кардиналистический.

Ординалистический подход к определению понятия оптимальности решений апеллирует к порядку (лучше-хуже) и основан на введении понятия бинарных отношений, что позволяет формализовать операции попарного сравнения альтернатив и выбора оптимальных решений. В частном случае, когда при выборе «наилучших» (оптимальных) решений ЛПР руководствуется отношением строгого предпочтения \succ , из всего множества возможных решений X выделяются решения, недоминируемые по этому бинарному отношению. Остальные решения являются худшими, поскольку для них имеются более предпочтительные альтернативы. Они удаляются из множества X , поскольку их заведомо нельзя считать

оптимальными. В результате исключения из множества X худших по бинарному отношению \succ решений останутся только те оптимальные решения, для которых выполняется отношение неразличимости.

Таким образом, во множество оптимальных по отношению строгого предпочтения \succ решений включают такие решения $x^{(2)} \in X$, для которых не существует других предпочтительных решений $x \in X$, чтобы было справедливо бинарное отношение $x \succ x^{(2)}$. Это множество называется множеством Парето-оптимальных решений, которое обозначается через $opt_{\succ} X$ или $P(X)$. В зависимости от структуры множества X и свойств отношения множество оптимальных решений $opt_{\succ} X$ может содержать единственный элемент, конечное или бесконечное множество элементов. Если множество X не пусто и содержит конечное число элементов, а бинарное отношение \succ асимметрично и транзитивно, то это множество является непустым $opt_{\succ} X \uparrow \emptyset$.

Кардиналистический подход к определению понятия оптимальности решений основан на введении некоторой целевой функции $f(x)$, значение которой интерпретируется как полезность (ценность) решения x и оно определяет предпочтение ЛПР. Выбранная целевая функция задает соответствующее отношение порядка на множестве X . Значение целевой функции $f(x)$ является индикатором предпочтения ЛПР. В частности, при задании скалярной целевой функции считается, что решение x' предпочтительнее альтернативного решения x'' тогда и только тогда, когда выполняется условие $f(x') \geq f(x'')$. При таком подходе может быть задана формализованная процедура выбора оптимальных решений $x^{(2)}$ (то есть критерий оптимальности) из условия экстремума целевой функции на множестве X

$$x^{(o)} = \arg \underset{x \in X}{\text{extrem}}[f(x)]. \quad (2.1a)$$

Однако из-за недостаточной определенности представления ЛПР про оптимальность с учетом совокупности противоречивых требований к проектным решениям часто не удается задать скалярную целевую функцию и соответствующий скалярный критерий оптимальности. Поэтому на начальных этапах проектирования решения характеризуются векторной целевой функцией, включающей совокупностью частных целевых функций $\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$, которые определяют полезность (ценность) решения x с точки зрения разных требований. При этом

возникают более сложные задачи оптимизации решений по совокупности показателей качества, которые называются задачами многокритериальной либо векторной оптимизации

$$x^{(o)} = \arg \underset{x \in X}{\text{extrem}} [\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))]. \quad (2.16)$$

В многокритериальной оптимизационной задаче (2.16) возможны следующие варианты: частные целевые функции независимы между собой; функции связаны между собой и являются согласованными; функции связаны между собой и являются антагонистическими. В первых двух случаях оптимизационная задача (2.16) сводится к совокупности независимых скалярных оптимизационных задач для частных целевых функций. В последнем случае, который встречается часто в практических приложениях проектирования, такая оптимизационная задача сводится к нахождению компромисса — согласованного экстремума частных целевых функций. Этот компромисс означает, что дальнейшее улучшения значения каждой целевой функции может быть достигнуто лишь за счет ухудшения значений других целевых функций. В результате этого находится множество решений, оптимальных по совокупности показателей качества решений, отражающих значения целевых функций. Соответствующие решения $x^{(*)} \in X$ называют Парето-оптимальными (оптимальными по Парето) относительно векторной целевой функции $\vec{f}(x)$. Множество всех таких решений обозначают через $P_f(X)$.

При введении векторной целевой функции, наряду с множеством допустимых решений X , можно рассматривать множество соответствующих им оценок значений этой векторной функции

$$Y = \vec{f}(X) = \{\vec{y} \in Y \mid \vec{y} = \vec{f}(x), x \in X\}, Y \subset R^m, \quad (2.2)$$

которое называют также *множеством векторных оценок* или *критериальным пространством*.

При этом каждое решение x отображается из множества X в критериальное пространство Y (рис. 2.1)

Каждому решению $x \in X$ соответствует одна векторная оценка $\vec{y} = \vec{f}(x) \in Y$. С другой стороны, каждой оценке отвечают альтернативные решения $x \in X$ (их может быть и более одного), для которых $\vec{f}(x) = \vec{y}$. Таким образом, между множествами X и Y имеется тесная связь и поэтому выбор решения из множества X в указанном смысле равносильен выбору соответствующей оценки в критериальном пространстве.

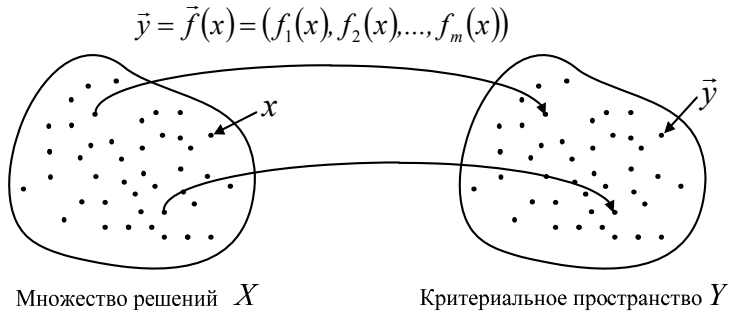


Рис. 2.1. Отображение множества решений
в критериальное пространство

Для векторных оценок \vec{y}' и \vec{y}'' на множестве Y можно рассматривать разные типы бинарных отношений между оценками. В частности, широко используются такие бинарные отношения:

– отношение нестрогого предпочтения, называемое также отношением Парето

$$\vec{y}' \Phi_1 \vec{y}'' \Leftrightarrow \vec{f}(x') \geq \vec{f}(x''), f_i(x') \geq f_i(x''), \quad (2.3a)$$

$$i = \overline{1, m}, \vec{f}_i(x') \uparrow \vec{f}_i(x'');$$

– отношение строгого предпочтения, называемое также отношением Слейтера

$$\vec{y}' \Phi_1 \vec{y}'' \Leftrightarrow \vec{f}(x') > \vec{f}(x''), f_i(x') \geq f_i(x''), i = \overline{1, m}. \quad (2.3b)$$

В частности, отношение (2.3a) означает, что по крайней мере для одного i выполняется строгое неравенство.

Следует отметить, что отношение нестрогого предпочтения \geq , которое имеет место для векторных оценок, превращается при $m = 1$ в отношение строгого неравенства $>$ для скалярных оценок. При этом Парето-оптимальная оценка совпадает с максимальным элементом множества R^1 , которому отвечает экстремум скалярной целевой функции $f(x)$. Таким образом, понятие Парето-оптимальности следует рассматривать как обобщение понятия экстремума на случай нескольких целевых функций. При этом оптимум по Парето — это согласованный оптимум связанных между собой и конкурирующих между собой целевых функций.

Также существуют и другие типы бинарных отношений: $>$, $>$. Следует заметить, что бинарное отношение \geq это объединение би-

нарных отношений \geq и $=$, а бинарное отношение $>$ верно тогда и только тогда, когда отношение \geq неверно. Для указанных бинарных отношений выполняются включения $> \supseteq \supset \supseteq >$.

2.2. Формирование исходного множества проектных вариантов системы на основе морфологического подхода

При проектировании системы проектные решения x определяются вариантами структуры системы ϕ из некоторого исходного множества проектных. Как правило, структура системы состоит из некоторых подсистем (блоков). В этом случае для определения исходного множества допустимых вариантов системы широкое распространение получил морфологический подход, для которого характерны такие факторы:

- выявление перечня основных функций системы и ее декомпозиция на отдельные подсистемы по функциональным признакам $\{\varphi_l, l = \overline{1, L}\}$;
- определение альтернативных способов реализации каждой подсистемы и задание допустимых вариантов их построения $\Phi_l = \{\phi_{l1}, \phi_{l2}, \dots, \phi_{lk_l}\}$;
- формирование различных вариантов построения системы в целом на основе морфологических классов — множества вариантов построения каждой подсистемы, для которых выполняются условия $\sigma(l) = \Phi_l, l = \overline{1, L}, \sigma(l) \cap \sigma(j) = 0$.

Формируется морфологическая таблица (табл. 2.1). Каждый вариант построения системы определяется разными возможными вариантами подсистем. При формировании допустимого множества вариантов системы должны учитываться ограничение на структуру, параметры и техническую реализацию отдельных подсистем и системы в целом, а также допустимые комбинации объединения отдельных вариантов подсистем между собой. Количество возможных вариантов системы определяется как $Q = \prod_{l=1}^L K_l$.

Следует заметить, что с одной стороны, желательно рассматривать все возможные допустимые варианты подсистем. С другой стороны, могут существовать определенные ограничения на объем исходного множества вариантов системы, которые задаются временем либо стоимостью проектирования системы.

**Морфологическая таблица формирования множества
исходных вариантов системы**

| Морфологические классы | Возможные способы реализации подсистемы | Количество способов реализации системы |
|------------------------|---|--|
| $\sigma(1)$ | $\varphi_{11} \varphi_{12} \varphi_{13} \quad \varphi_{1K_1}$ | K_1 |
| $\sigma(2)$ | $\varphi_{21} \varphi_{22} \varphi_{23} \quad \varphi_{2K_1}$ | K_2 |
| | ... | ... |
| $\sigma(l)$ | $\varphi_{l1} \varphi_{l2} \varphi_{l3} \quad \varphi_{lK_l}$ | K_l |
| ... | ... | ... |
| $\sigma(L)$ | $\varphi_{L1} \varphi_{L2} \varphi_{L3} \quad \varphi_{LK_L}$ | K_L |

2.3. Методы нахождения Парето- оптимальных проектных решений

Парето-оптимальные проектные решения могут быть найдены как непосредственно на исходном множестве X с применением введенных бинарных отношений предпочтения, так и в критериальном пространстве оценок значений целевых функций Y . Отношению предпочтения \succ на множестве X соответствует отношение нестрогого предпочтения \geq на множестве Y . Для любых двух решений $x', x'' \in X$, для которых верно векторное неравенство $\vec{f}(x') \geq \vec{f}(x'')$, всегда имеет место отношение $x' \succ x''$.

Рассматриваются разные методы нахождения подмножества Парето-оптимальных решений. В частности, когда множество X является дискретным и имеет конечную мощность, для нахождения подмножества Парето-оптимальных решений может использоваться *метод дискретного выбора*. Этот метод состоит в том, что включение решений $x^{(o)}$ в подмножество Парето $x^{(o)} \in P_f(X)$ имеет место тогда и только тогда, когда не существует других альтернативных решений $x \in X$, чтобы выполнялось неравенство $\vec{f}(x) \geq \vec{f}(x^{(o)})$. Формализованная процедура нахождения подмножества Парето-оптимальных оценок, которые соответствуют недоминируемым проектным решениям определяется соотношением

$$P(Y) = \text{opt}_{\geq} Y = \left\{ \vec{f}(x^o) \in Y : \exists \vec{f}(x) \in Y : \vec{f}(x) \geq \vec{f}(x^o) \right\}. \quad (2.4)$$

При нахождении подмножества Парето-оптимальных оценок, согласно процедуре (2.4), исключаются безусловно худшие оценки, а следовательно, и соответствующие им безусловно худшие проектные решения из множества X . Выбранные Парето-оптимальные проектные решения, которые являются нехудшими, являются несравнимыми между собой по отношению нестрогого предпочтения (2.3а).

В общем случае для нахождения Парето-оптимальных решений могут быть использованы также разные специальные методы, например, весовой метод, метод рабочих характеристик, метод главного критерия, метод последовательных уступок и другие методы.

Весовой метод. В случае применения этого метода Парето-оптимальные проектные решения находятся путем оптимизации взвешенной суммы частных целевых функций

$$P_{\vec{f}}(X) = \left\{ x^{(s)} \in X : \arg \text{extr}_{x \in X} [f_{@}(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) + \dots + \lambda_m f_m(x)] \right\}, \quad (2.5)$$

в которой весовые коэффициенты $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ выбираются из условия $\lambda_i > 0$, $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$. Подмножество Парето-оптимальных решений содержит те проектные варианты, которые удовлетворяют условию (2.5) при разных допустимых комбинациях весовых коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$.

Метод рабочих характеристик. Этот метод состоит в том, что все целевые функции, кроме одной, например, первой, переводятся в разряд ограничений типа равенства, и ищется её экстремум на множестве допустимых решений X

$$P_{\vec{f}}(X) = \left\{ x^{(o)} \in X : \arg \text{extr}_{x \in X} [f_1(x)], f_2(x) = b_2; f_3(x) = b_3, \dots, f_m(x) = b_m \right\}. \quad (2.6)$$

Здесь b_2, b_3, \dots, b_m — некоторые фиксированные, но произвольные значения целевых функций.

Оптимизационная задача (2.6) решается последовательно для всех допустимых комбинаций значений ограничений b_2, b_3, \dots, b_m . При этом определяется некоторое подмножество Парето-оптимальных проектных решений и соответствующая им многомерная рабочая поверхность в критериальном пространстве, которая при определенных условиях совпадает с Парето-оптимальной поверхностью. Следует отметить, что каждая точка Парето-оптимальной

поверхности обладает свойством m -кратного согласованного по критерию Парето оптимуму. Каждой точке этой поверхности соответствует потенциально достижимое значение одной из целевых функций при фиксированных (соответствующих этой точке) значениях остальных $(m-1)$ целевых функций. Значения целевых функций для каждого проектного решения определяют значения соответствующих показателей качества для проектных решений: $k_1 = f_1(x)$, $k_2 = f_2(x)$, ..., $k_m = f_m(x)$.

Парето-оптимальная поверхность в критериальном пространстве может быть описана любым из следующих соотношений

$$k_{1opt} = F_{no}^1(k_2, k_3, \dots, k_m), \dots, k_{mopt} = F_{no}^m(k_1, k_2, \dots, k_{m-1}). \quad (2.7)$$

Эти соотношения представляют собой многомерные диаграммы обмена (МДО) между показателями качества проектного решения. МДО показывают, как потенциально достижимое значение соответствующего показателя зависит от потенциально достижимых значений других показателей качества.

В случае, если проектные решения это варианты построения проектируемой системы, можно сделать выводы о характерных свойствах Парето-оптимальных вариантов системы:

1. Все элементы множества допустимых вариантов системы, которые не принадлежат подмножеству Парето-оптимальных вариантов, являются безусловно худшими.

2. Ни один вариант системы из подмножества Парето-оптимальных не может быть признан худшим или лучшим по сравнению с другим вариантом системы из этого подмножества. Это означает, что все они являются несравнимыми по безусловному критерию предпочтения (критерию Парето).

3. Если множество Парето согласованно, то есть содержит лишь один элемент, то соответствующий вариант системы является наилучшим.

4. Каждому Парето-оптимальному варианту системы соответствует потенциально возможное значение каждой из целевых функций (показателей качества), которое может быть достигнуто при фиксированных, но произвольных значениях других целевых функций (показателей качества). Это свойство m -кратного согласованного экстремума векторной целевой функции. Совокупность таких оптимальных значений целевых функций определяет потенциальные значения соответствующих показателей качества системы и называются многомерными потенциальными характеристиками системы (МПХ).

5. Оптимальная поверхность, которая является геометрическим местом Парето-оптимальных оценок целевых функций, имеет строго монотонный характер, то есть любая из функций (2.7) для Парето-оптимальных оценок монотонно спадает относительно любого из аргументов. Эти зависимости являются многомерными диаграммами обмена показателей качества для Парето-оптимальных вариантов систем.

МДО отражают наилучшее (потенциально возможное) значение не одного, а любого из выбранных показателей качества при фиксированных значениях других показателей качества. Кроме того, они указывают, каким образом следует изменить значения одних показателей качества системы для улучшения других показателей качества и за счет какого изменения структуры или параметров системы это можно сделать.

Следует отметить, что формальная модель задачи Парето-оптимизации не содержит информации для выбора единого проектного варианта системы. При этом не вводятся разного рода условия для выбора решений, а используется безусловный критерий предпочтения (критерий Парето), основанный на бинарном отношении нестрого предпочтения в критериальном пространстве оценок. В результате исходное множество допустимых проектных вариантов системы лишь сужается до подмножества Парето путем исключения безусловно худших вариантов.

Однако в ряде случаев для последующих этапов проектирования системы должно быть выбрано единственное проектное решение. Если найденное подмножество Парето оказалось узким, то в качестве оптимального варианта системы можно использовать любое из Парето-оптимальных проектных решений, поскольку они являются между собой несравнимыми. В таком случае можно считать, что отношение строгого предпочтения в пространстве допустимых решений \succ совпадает с отношением нестрого предпочтения в критериальном пространстве оценок \geq и поэтому множество оптимальных решений $opt_{\succ} X$ и $P(Y)$ совпадают (согласованы между собой). Однако часто на практике подмножество Парето-оптимальных оценок $P(Y)$ оказывается достаточно широким. Это означает, что отношения предпочтения \succ и \geq хотя и связаны между собой, однако не совпадают.

В ряде задач проектирования возникает необходимость сужения найденного подмножества Парето-оптимальных решений до единственного проектного варианта с привлечением дополнительной информации от экспертов, которая отражает отношения предпо-

чтения ЛПР. Для этого могут быть использованы условные критерии предпочтения, основанные на разных способах учета дополнительной информации от экспертов. Такая информация появляется в результате анализа структуры и параметров Парето-оптимальных вариантов системы, полученных МПХ и МДО показателей качества системы, а также относительной важности показателей качества и сравнительного анализа полученных вариантов системы между собой.

Необходимо заметить, что окончательный выбор единственно-го проектного решения должен производиться лишь в рамках найденного подмножества Парето-оптимальных решений, которое получено за счет исключения безусловно худших проектных решений.

2.4. Методы сужения подмножества Парето-оптимальных решений до единственного предпочтительного варианта системы

2.4.1. Выбор предпочтительного варианта системы на основе теории полезности и теории размытых множеств

Полученная дополнительная информация от экспертов может быть использована для формализованного построения некоторого условного критерия предпочтения и выбора единственного предпочтительного варианта системы. В частности, такой условный критерий предпочтения может быть основан на использовании некоторой скалярной целевой функции многих переменных $U(k_1, \dots, k_m)$, где — оценки показателей качества системы, определяемыми значениями соответствующих целевых функций для варианта системы. Оптимизация этой функции на подмножестве Парето-оптимальных оценок системы $P(Y)$ приводит к выбору единственного предпочтительного варианта системы

$$\phi_0 = \arg \text{extr } U(k_1, \dots, k_m). \quad (2.8)$$

Общее требование к функции $U(k_1, \dots, k_m)$ сводится к тому, чтобы она была монотонной (возрастающей или спадающей) по каждому из своих аргументов.

Существуют как объективные, так и субъективные подходы к построению такой функции. В ряде случаев на основе рассмотрения назначения системы, которая проектируется в составе более

сложной надсистемы (комплекса), объективными методами может быть установлена функциональная взаимосвязь целевых функций и соответствующих показателей качества системы с целевой функцией и некоторым показателем качества надсистемы. Однако в большинстве случаев объективно ввести такую функцию не удастся и приходится прибегать к ее построению в значительной мере субъективными методами с привлечением разного рода дополнительной информации, получаемой от экспертов. При этом существуют разные методы получения и обработки этой информации.

Одним из широко используемых методов сужения подмножества Парето-оптимальных решений до единственного предпочтительного варианта является использование скалярной функции ценности (полезности) [29]. Функцию $U(\vec{k})$ (здесь $\vec{k} = (k_1, \dots, k_m)$) называют функцией ценности для отношения строгого предпочтения, если для произвольных оценок $\vec{k}', \vec{k}'' \in Y$ в критериальном пространстве неравенство $U(\vec{k}') > U(\vec{k}'')$ имеет место тогда и только тогда, когда $\vec{k}' \geq \vec{k}''$. Если существует такая функция ценности $U(\vec{k})$, то единственное предпочтительное решение находится путем максимизации этой функции на подподмножестве Парето-оптимальных оценок

$$\max_{\vec{k} \in \text{opt}_2 V} U(\vec{k}). \quad (2.9)$$

Вопрос существования функций ценности и способы их оценивания детально рассматриваются во многих работах.

Процедура формирования функции ценности $U(\vec{k})$ иногда называется сверткой векторного критерия $\vec{k} = (k_1, \dots, k_m)$. Операция свертки возможна, если:

- частичные критерии количественно суммарны по важности, то есть любому из них отвечает определенное число, которое определяет его относительную важность соответственно другим критериям;
- частичные критерии являются однородными, то есть количественно сравниваются в одной размерности;
- формируется обобщенный критерий, числитель которого составляет произведение показателей, которые подлежат максими-

зации, а знаменатель — произведение показателей, которые подлежат минимизации;

- формируется обобщенный критерий на основе использования элементов теории адитивной полезности, то есть суммирование частичных показателей с определенными весовыми коэффициентами в числителе и знаменателе;
- формируется обобщенный критерий относительно всех частичных показателей.

При этом могут быть построены адитивная, мультипликативная, полинейная функции ценности.

В ряде случаев обобщенная функция ценности может принимать вид

$$U(k_1, \dots, k_m) = \sum_{j=1}^m c_j \phi_j(k_j), \quad (2.10)$$

где $\phi_j(\cdot)$ — одномерные функции ценности, которые характеризуют ценность системы по j -му показателю качества; c_j — весовые коэффициенты.

Задача построения функции (2.10) сводится к оценке коэффициентов c_j , выбору вида функций $\phi_j(k_j)$, проверке их независимости по отношению предпочтения, проверке согласованности построенной функции ценности. Иногда может быть использована более простая функция ценности в виде

$$U\left(\vec{k}\right) = \sum_{j=1}^m c_j k_j. \quad (2.11)$$

При этом используются разные методы получения дополнительной информации о значении коэффициентов c_j . В частности, это хорошо разработанные методы экспертных оценок. Они сводятся к опрашиванию выбранной группы экспертов с учетом информации о ценности полученных Парето-оптимальных вариантов системы, относительной важности показателей качества и др.

Фактически соотношение (2.11) определяет байесовый детерминированный критерий оптимальности. При неопределенности об условиях выбора решений используют методы теории игр. Такие ситуации выбора проектных решений при создании систем часто называют «играми с природой». Для принятия решений выбирают наилучшую стратегию, с использованием критерия Вальда, критерия Севиджа, критерия Гурвица, критерия Лапласа и других.

В ряде случаев скалярную целевую функцию и выбор предпочтительного варианта системы строят на основе теории размытых множеств. Этот подход базируется на том, что через априорную

неопределенность понятие «наилучший вариант системы» невозможно определить точно. Можно считать, что это понятие представляет собой размытое множество и для оценки системы могут быть использованы основные положения теории размытых множеств. В общем случае размытое множество G на множестве X задается функцией принадлежности: $\xi_G : X \rightarrow [0, 1]$, которая сопоставляет с каждым элементом $x \in X$ действительное число ξ_G на интервале $[0, 1]$. Это число называется степенью принадлежности элемента x размытому множеству G . Чем оно более близко к 1, тем выше степень принадлежности системы к наилучшей системе. Функция $\xi_G(x)$ является обобщением обычной характеристической функции множеств, которая приобретает лишь два значения: 1 — при $x \in G$ и 0 — при $x \notin G$. В случае дискретных множеств используется запись размытого множества как множество пар $G = \{x, \xi_G(x)\}$.

В соответствии с этими основными положениями каждый показатель качества системы может задаваться в виде элемента размытого множества $k_j = \{k_j, \xi_{k_j}(k_j)\}$, где $\xi_{k_j}(k_j)$ — функция принадлежности конкретного j -го показателя качества размытому множеству наилучшего значения. Такая запись отдельного показателя качества имеет высокую информативность, поскольку дает представление о физической природе показателя качества, конкретном его значении и ценности относительно наилучшего значения, которое характеризует функция принадлежности. Универсальная форма функции принадлежности, которая может быть использована как скалярная целевая функция, может иметь такой вид

$$U(k_1, \dots, k_m) = \frac{1}{m} \left\{ \sum_{j=1}^m [\xi_{k_j}(k_j)]^\beta \right\}^{\frac{1}{\beta}}. \quad (2.12)$$

Преимуществом такой функции является то, что выбором параметра β может быть реализован широкий класс функций от линейной адитивной при условии $\beta = 1$, до сугубо нелинейной при $\beta \rightarrow \infty$.

2.4.2. Выбор предпочтительного варианта системы на основе лексографических отношений

Иногда для заказчика системы по результатам анализа Парето-оптимальных вариантов становится желательным получить как можно большее значение одного из показателей качества, например k_1 , без учета других показателей качества. Это означает, что по-

казатель k_1 является самым важным по сравнению с другими показателями качества. Возможен также случай, когда весь набор показателей качества систем $k_1(\varphi), k_2(\varphi), \dots, k_m(\varphi)$ строго упорядоченны по важности. Это означает что показатель k_1 более важный, чем показатели k_2, \dots, k_m , показатель k_2 более важный, чем показатели k_3, k_4, \dots, k_m и т. д. Этому отвечает ситуация, когда при сравнении систем используется лексикографическое отношение. Приведем определение этого отношения и особенности его использования при выборе единственного предпочтительного варианта системы.

Рассмотрим два вектора оценок показателей качества \vec{k}', \vec{k}'' . Лексикографическое отношение $\vec{k}' > \vec{k}''$ имеет место тогда и только тогда, когда выполняется одно из таких условий

$$\begin{aligned} & \vec{k}'_1 > \vec{k}''_1, \\ & \vec{k}'_1 = \vec{k}''_1, \quad \vec{k}'_2 > \vec{k}''_2, \\ & \dots\dots\dots \\ & \vec{k}'_j = \vec{k}''_j, \quad j = 1, 2, \dots, m-1; \quad \vec{k}'_m > \vec{k}''_m. \end{aligned} \tag{2.13}$$

Для $m=1$ лексикографическое отношение совпадает с отношением $>$ на подмножестве действительных чисел.

При выполнении отношения $\vec{k}' > \vec{k}''$ говорят, что вектор \vec{k}' лексикографически предпочтителен, чем вектор \vec{k}'' . Если используется лексикографическое отношение при выборе единственного предпочтительного варианта системы, то это означает, что из пары оценок показателей качества (и соответствующих им систем) предпочтение отдается той системе, для которой первая компонента вектора \vec{k}' (то есть оценка показателя качества k_1) больше, независимо от соотношения по другим компонентам вектора \vec{k} . Если первые компоненты оценок векторов \vec{k}' и \vec{k}'' одинаковы, то предпочтение отдается той оценке, у которой больше вторая компонента вектора \vec{k}' (оценка показателя качества k_2). Следующие компоненты вектора \vec{k}' могут при этом значительно проигрывать соответствующим компонентам вектора \vec{k}'' .

Аналогичные выводы принимаются при равенстве первых двух компонент, трех компонент и так далее $(m-1)$ компонентам векторов \vec{k}' и \vec{k}'' . В определении лексикографического отношения важную роль играет порядок перечисления показателей качества.

Изменение нумерации показателей качества приводит к другому лексикографическому отношению.

В рассмотренных методах при задании условного критерия предпочтения для выбора единственного предпочтительного варианта системы из подмножества Парето-оптимальных используется различного рода субъективная информация от экспертов, которая может отражать предпочтения заказчика. В частности, это значения относительной важности показателей качества системы или или порядок упорядочения показателей качества системы по важности.

2.4.3. Методы экспертного оценивания при выборе предпочтительного варианта системы

При учете информации от экспертов применяются методы экспертного оценивания. Это методы организации работы со специалистами — экспертами и обработки мнений экспертов, выраженных в количественной или качественной форме с целью подготовки информации для принятия решений [20,23,54]. В задачи экспертной комиссии входит оценка не только самих систем, но и их характеристик, в частности, их показателей качества. Каждый эксперт выставляет соответствующие оценки, после чего производится обработка и анализ результатов экспертизы.

При экспертном оценивании прежде всего оценивается согласованность оценок разных экспертов. Если все оценки одинаковы, то проблема измерения решена. Однако обычно не все оценки совпадают. Более того, иногда мнения экспертов сильно расходятся. Тогда в задачи анализа входит выявление точек зрения экспертов, особенно тех, кто дал крайние оценки. Если полученные результаты не дают возможности принять решение, то экспертиза проводится повторно.

Очень важно определение необходимого числа экспертной группы. При недостаточном числе экспертов результаты экспертизы не будут надежными. Многочисленную группу квалифицированных экспертов трудно сформировать и трудно организовать их работу.

Численный состав экспертной группы вычисляется по формуле

$$Q = \left[\beta t_{p,k-1} / \alpha \right]^2, \quad (2.14)$$

где Q – число экспертов; β – вариация (мера надежности проведенной экспертизы); $t_{p,k-1}$ – коэффициент Стьюдента; α – относительная ширина доверительного интервала.

Вариация определяется как $\beta = \sigma / \bar{x}$, где σ – среднеквадратический разброс экспертных оценок; \bar{x} – среднее значение оценки. Относительная ширина доверительного интервала вычисляется из соотношения $\alpha = \Delta x / \bar{x}$, где Δx — доверительный интервал оценок.

Для статистической обработки допускается лишь такие экспертные оценки, относительное отличие которых от среднего значения по абсолютной величине не превышает $|\Delta x / \bar{x}|$. Привлекаются к экспертизе только квалифицированные специалисты, для которых изменение вариации при изменении числа оценок будет не очень значительным.

Коэффициент Стьюдента $t_{p, Q-1}$ определяется по таблицам. Выбрав доверительную вероятность p , для различных Q находят соответствующие значения $t_{p, Q-1}$. Затем для каждой пары Q и $t_{p, Q-1}$ из уравнения (2.14) находят β / α и для выбранной p получают зависимость $\beta / \alpha = f(Q)$. Вычислив таким образом соотношение β / α и задав доверительную вероятность p , из полученных зависимостей находят численный состав экспертной группы Q .

Распределение Стьюдента, использованное в формуле (2.14) при увеличении Q сходится к нормальному распределению. Поэтому число экспертов приближенно можно определить с помощью выражения

$$\beta / \alpha = \sqrt{Q} / z(Q), \quad (2.15)$$

где $z(Q)$ – значение интеграла вероятности, которое определяется по таблицам.

Простейший способ получения групповой оценки — вычисление средних баллов

$$x_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (2.16)$$

где x_{ij} — оценка i -го объекта j -м экспертом.

Эта формула означает фактически, что усреднение оценок производится в предположении равноправия всех экспертов: x_{ij} входит в сумму с одинаковым для всех j весовых коэффициентов $1/n$. Для отражения реального «неравенства» экспертов, возникающего из-за различий в компетентности, объективности и информированности, вводят весовые показатели компетентности $q_j (j \in M)$. Тогда

$$x_i = \sum_{j=1}^n q_j x_{ij}. \quad (2.17)$$

Показатель компетентности должен отражать то, насколько близки оценки экспертов к «истинным» значениям.

2.4.4. Выбор предпочтительного варианта системы на основе метода анализа иерархий

Метод анализа иерархий (МАИ) состоит в декомпозиции проблемы выбора единственного предпочтительного варианта системы на простые составляющие части и получении суждений экспертов по парным сравнениям различных элементов проблемы выбора. В результате обработки полученных численных данных суждений экспертов формируется матрица парных сравнений. Для этой матрицы вычисляется главный собственный вектор и согласно определенной математической процедуры получают компоненты глобального вектора приоритетов, компоненты которого характеризуют приоритетность выбора вариантов проектируемой системы. Единственному предпочтительному варианту системы из заданного множества вариантов соответствует максимальное значение компонент глобального вектора приоритетов.

Принцип декомпозиции предусматривает структурирование проблемы выбора в виде иерархии уровней с вершины (цель выбора) через промежуточные уровни (показатели качества системы) к самому низкому уровню (альтернативные варианты построения системы).

Принцип сравнительных суждений экспертов в МАИ состоит в том, что объекты проблемы выбора сравниваются экспертами попарно по важности. Попарно сравниваются важности разных вариантов систем (на уровне 3) и разных показателей качества (на уровне 2). Результаты парных сравнений элементов приводятся к матричной форме

$$A = \begin{pmatrix} a_{11}a_{12} \dots a_{1j} \\ a_{21}a_{22} \dots a_{2j} \\ \dots \\ a_{n1}a_{n2} \dots a_{nj} \end{pmatrix}, \quad (2.18)$$

где $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ — оценки парных сравнений элементов выбора.

Диагональ этой матрицы заполняется значениями «1», а элементы матрицы, лежащие ниже диагонали, заполняются соответствующими обратными значениями.

Оценки парных сравнений элементов a_{ij} находятся с использованием субъективных суждений экспертов, численно определяемых по шкале относительной важности элементов, которая представлена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Шкала относительной важности элементов сравнения

| Интенсивность относительной важности | Определение |
|--------------------------------------|--|
| 1 | Равная важность элементов сравнения |
| 3 | Умеренное превосходство одного элемента над другим |
| 5 | Существенное превосходство одного элемента над другим |
| 7 | Значительное превосходство одного элемента над другим |
| 9 | Очень сильное превосходство одного элемента над другим |
| 2,4,6,8 | Промежуточные решения между двумя суждениями |

Далее выполняется некоторая обработка сформированных матриц парных сравнений элементов иерархий (2.18) на уровнях 2 и 3. С математической точки зрения эта задача обработки сводится к вычислению главного собственного вектора, соответствующего максимальному собственному значению матрицы.

В частности, компоненты главного собственного вектора матрицы парных сравнений показателей качества вычисляются как среднее геометрическое значение в строке матрицы парных сравнений

$$V_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.19)$$

где n — число показателей качества.

Через компоненты главного собственного вектора вычисляются соответствующие компоненты вектора приоритетов показателей качества как нормированные значения

$$P_j = \frac{V_j}{S}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.20)$$

где

$$S = \sum_{j=1}^n V_j. \quad (2.21)$$

Аналогично находятся оценки матриц парных сравнений вариантов систем на уровне 3 в отдельности по отношению к каждому показателю качества системы. На основе этих матриц вычисляются компоненты соответствующих главных собственных векторов и векторов приоритетов систем \vec{Q}_j по отношению к отдельным показателям качества систем.

С использованием полученных данных вычисляются значения компонент вектора глобальных приоритетов \vec{C} согласно

$$C_i = \sum_{j=1}^n P_j Q_{ij}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.22)$$

где N — число сравниваемых вариантов систем.

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов (2.22) выбирается соответствующий предпочтительный вариант системы.

В качестве меры согласованности суждений экспертов рассматривают два показателя:

- индекс согласованности (I_c);
- отношение согласованности (OC).

Из теории матриц известно, что согласованность обратно симметричной матрицы парных сравнений в шкале относительной важности эквивалентна требованию равенства ее максимального собственного значения λ_{\max} и числа сравниваемых объектов ($\lambda_{\max} \geq n$).

В качестве меры рассогласования рассматривают нормированное отклонение λ_{\max} от n , называемое индексом согласованности

$$I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (2.23)$$

Чтобы оценить, является ли полученное согласование суждений экспертов приемлемым или нет, его сравнивают со случайным индексом C_H . Случайным индексом называют индекс согласованности, рассчитанный для квадратной n -мерной положительной обратно симметричной матрицы, элементы которой сгенерированы случайным образом с помощью датчика случайных чисел, распределенных по равномерному закону для интервала значений от 1 до 15. В табл. 2.3 представлены средние согласованности для случайных матриц порядка от 1 до 15 [53].

Величина случайного индекса

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Размер матрицы, n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Случайный индекс, C_{II} | 0 | 0 | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 | 1,51 | 1,54 | 1,56 | 1,57 | 1,59 |

Получив в результате расчета по формуле (2.23) индекс согласованности и выбрав из табл. 2.2 случайный индекс для заданного порядка матрицы, рассчитывают отношение согласованности

$$OC = \frac{I_c}{C_{II}}. \quad (2.26)$$

Если полученная величина $OC \leq 0,15$, то степень согласованности суждений экспертов следует считать приемлемой. В противном случае экспертам рекомендуется пересмотреть свои суждения. Для этого необходимо выявить те позиции в матрице суждений, которые вносят максимальный вклад в величину отношения согласованности, и попытаться изменить меру несогласованности в меньшую сторону.

Кроме упомянутых выше методов выбора единственного предпочтительного варианта из подмножества Парето-оптимальных, существует и много других методов. Выбор подходящего метода определяется исходными данными, которые можно получить от экспертов, и типом конкретной оптимизационной задачи. Но, как бы то ни было, предпочтительные варианты системы следует искать среди Парето-оптимальных вариантов. То есть, этап Парето-оптимизации является обязательным при проектировании систем, оптимальных с учетом совокупности показателей качества.

РАЗДЕЛ 3

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ И СЕТЕЙ СВЯЗИ

На основе современной теории связи можно предложить большое число возможных вариантов построения отдельных блоков и в целом систем и сетей связи. Как из этого множества вариантов выбрать наиболее предпочтительный? По каким критериям следует делать этот выбор? Насколько оправдано применение тех или иных новых систем и как совершенствовать существующие системы связи? Решение этих вопросов в конечном итоге сводится к решению задач оптимизации с учетом совокупности показателей качества. Поэтому при проектировании оптимальных систем связи и сетей связи следует использовать методы многокритериальной оптимизации. В данном разделе приведены решения некоторых задач оптимизации систем и сетей связи с учетом совокупности показателей качества.

3.1. Оптимизация системы передачи информации с учетом показателей энергетической и частотной эффективности

Известно решение задачи оптимизации пропускной способности системы передачи (СПИ) непрерывных сообщений, которое было получено К. Шенноном [28]. Полагалось, что структура СПИ задана в самом общем виде, то есть она состоит из кодера, канала связи и декодера. Полагается, что информационный сигнал $x(t)$ описывается стационарным случайным процессом с плотностью вероятности $W(x)$. Информационный сигнал передается по непрерывному каналу связи и имеет среднюю мощность P_c и ширину спектра, который совпадает с полосой пропускания канала связи Δf . Сигнал $x(t)$ представляется в соответствии с теоремой Котельникова дискретными отсчетами $x(i\Delta t)$, $i = 0, 1, \dots, n$, взятыми в дискретные моменты времени через интервал $\Delta t = \frac{1}{2\Delta f}$. При этом передача информационного сигнала по каналу связи рассматривается как передача независимых отсчетов $x(i\Delta t)$ со скоростью $V_k = 1/\Delta t = 2\Delta f$.

В канале связи действует аддитивная флуктуационная помеха в виде гауссовского белого шума со спектральной плотностью N_0 .

К. Шеннон ставил задачу оптимизировать пропускную способность СПИ C при вариациях относительно произвольных видах информационного сигнала, то есть относительно всех возможных видов плотности вероятности $W(x)$. Оптимизация проводилась для одного показателя качества — пропускной способности системы C , а Δf , P_c , N_0 рассматривались как фиксированные, но произвольные параметры системы. При этом было получено соотношение для потенциальной скорости передачи — пропускной способности системы в виде [28]

$$C = \Delta f \log_2 (1 + P_c / N_0 \Delta f). \quad (3.1)$$

Рассмотрим решение этой задачи с точки зрения многокритериального подхода при учете совокупности показателей качества [3, 33]. Будем характеризовать СПИ совокупностью показателей качества, определяемых через технические параметры системы, в частности, в виде $k_1 = 1/C$, $k_2 = \Delta f$, $k_3 = P_c$, $k_4 = 1/N_0$. Это показатели качества, связанные соответственно с пропускной способностью, затратами полосы частот, мощностью сигнала и помехоустойчивостью СПИ. Нетрудно видеть, что введенные показатели качества связаны между собой и носят конкурирующий характер. Поэтому оптимизация СПИ по совокупности показателей качества может быть выполнена методами многокритериальной оптимизации и приведет к Парето-оптимальным решениям, которым соответствует согласованный оптимум показателей качества.

Для решения такой задачи многокритериальной оптимизации может быть использован описанный в п. 2.3 метод рабочих характеристик, который сводится к оптимизации одного из показателей качества СПИ при фиксированных, но произвольных значениях других показателей качества. Нетрудно показать, что использование этого метода приводит к решению многокритериальной оптимизационной задачи, которое с точностью до обозначений совпадает с решением, полученным К. Шенноном (3.1). Это соотношение фактически определяет многомерные потенциальные характеристики СПИ в виде [3, 33]

$$k_1 = 1/k_2 \log_2 (1 + k_3 k_4 / k_2). \quad (3.2)$$

Поскольку в (3.2) зависимости по каждому показателю качества монотонно спадающие, то это подтверждает, что полученная рабочая поверхность совпадает с Парето-оптимальной поверхностью

и она соответствует Парето-оптимальным решениям.

Таким образом, К. Шеннон, отыскивая потенциальное значение скорости передачи информационных сигналов, то есть пропускной способности СПИ, в общем виде (3.1) при произвольных значениях параметров Δf , P_C , N_0 , фактически получил Парето-оптимальные решения задачи многокритериальной оптимизации СПИ. Многомерные диаграммы обмена показателей качества (3.2) дают возможность проанализировать, какие потенциальные значения могут быть достигнуты для связанных и конкурирующих между собой показателей качества, а также показывают, каким образом выполнить «обмен» потенциальных значений одних показателей качества на значения других показателей качества СПИ.

Полученная МДО показателей качества (3.2) является четырехмерной и в общем случае неудобна для анализа и интерпретации. Поэтому возникает необходимость сокращения ее размерности. На практике часто используют МДО в виде двумерной зависимости показателей качества. Сокращение размерности четырехмерной МДО выполняют, вводя обобщенные показатели качества, в частности, такие, как удельные затраты средней мощности сигнала $\beta_E = P_C / N_0 C = k_1 k_3 k_4$, а также полосы пропускания $\beta_{\Delta f} = \Delta f / C = k_1 k_2$. Эти обобщенные показатели качества называют показателями энергетической и частотной эффективности СПИ [3, 33]

$$\beta_E = \beta_{\Delta f} (\exp[(\ln 2) / \beta_{\Delta f}] - 1). \quad (3.3)$$

Эта двумерная диаграмма обмена широко используется для анализа потенциальных возможностей СПИ и называется кривой граничной эффективности Шеннона, при которой достигается предельное значение информационной эффективности $\beta_R = R / C = 1$. Эта МДО приведена на рис. 3.1а.

Следует заметить, что в рассмотренной задаче оптимизации СПИ принят ряд идеализаций, которые привели к потенциальным характеристикам, которые не могут быть достигнуты в реальных системах. Наиболее важными идеализациями были такие. Не учитывалось действие любых других источников погрешностей кроме помехи в виде гауссовского белого шума. Полагалась также возможность идеального кодирования сообщений даже при значительной задержке сообщений. Это обеспечивало сколь угодно малую погрешность передачи сигналов δ^2 при произвольных конечных значениях пропускной способности C и спектральной плотности мощности помехи N_0 . Поэтому при решении этой оптимизационной задачи не учитывалась погрешность передачи информационного сигнала.

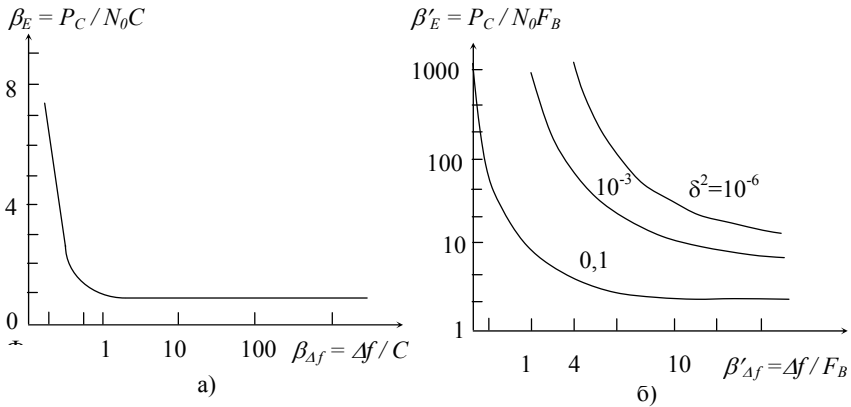


Рис. 3.1. Диаграммы обмена показателей энергетической и частотной эффективности системы передачи непрерывных сообщений

Аналогично, как и в предыдущем случае, была решена задача оптимизации системы СПИ с дополнительным учетом также и показателя погрешности передачи δ^2 непрерывных сообщений $x(t)$. Полученные МДО в виде семейства зависимостей показателей энергетической и частотной эффективности СПИ при некоторых значениях δ^2 изображены на рис. 3.16 [3, 33].

Рассмотрим еще одну задачу оптимизации системы передачи дискретных сообщений, в которой осуществляется блочное кодирование сообщений ортогональными сигналами. При этом передаваемые сообщения представляют собой последовательность независимых двоичных символов. В кодере накапливается блок из m таких символов, который передается одним из $M = 2^m$ ортогональных сигналов $s_i(t)$, $i = 1, M$. Прием закодированных таким образом сообщений выполняется поблочно — на протяжении каждого интервала времени $T = mT_c$ передачи блока из m двоичных символов длительностью T_c . В приемнике принимается решение о том, какой из M ортогональных сигналов был передан. Полагается, что все ортогональные сигналы имеют одинаковую энергию E , а в канале связи действует помеха типа гауссовский белый шум со спектральной плотностью мощности N_0 .

При этом достигается максимальная скорость передачи M ортогональных сигналов (то есть пропускная способность СПИ), которая определяется соотношением [28]

$$C = [(P_A / N_0) / \ln 2] [1 + \log_2(1 / P_{\text{ш}}) / \log_2 M]. \quad (3.4)$$

Соотношение (3.4) связывает между собой стандартные для системы связи показатели качества передачи дискретных сообщений

$$k_1 = P_{ou}, \quad k_2 = 1 / N_0, \quad k_3 = 1 / C. \quad (3.5)$$

Эти показатели качества можно рассматривать как показатели точности передачи, помехоустойчивости и пропускной способности СПИ.

Соотношение (3.4) было получено путем оптимизации СПИ, которая обеспечивает минимальное значение вероятности ошибки передачи битовых сигналов $k_1 = P_{ou}$ при фиксированных, но произвольных значениях показателей k_2, k_3 . С учетом (3.5) соотношение (3.4) представляется в виде

$$1 / k_3 = [(P_c k_2 / \ln 2) [1 + \log_2(1 / k_{1\min}) / \log_2 M]]. \quad (3.6)$$

Анализируя это соотношение, нетрудно убедиться, что зависимости между показателями качества являются монотонно спадающими. Поэтому соотношение (3.6) представляет собой многомерные потенциальные характеристики и многомерные диаграммы обмена введенных показателей качества такой СПИ.

Аналогично можно рассмотреть с многокритериальных позиций известную задачу оптимизации точности передачи непрерывных сообщений на интервале времени T в СПИ с гауссовским белым шумом, которая была решена В.А. Котельниковым [3, 33]. При этом можно ввести совокупность показателей качества, характеризующих соответственно точность, помехоустойчивость и скорость передачи непрерывных сообщений

$$k_1 = \delta^2, \quad k_2 = 1 / N_0, \quad k_3 = 1 / T. \quad (3.7)$$

Фактически В.А. Котельников решал задачу минимизации показателя качества $k_1 = \delta^2$ при фиксированных, но произвольных значениях двух других показателей $k_2 = 1 / N_0, k_3 = 1 / T$. А это согласно методу рабочих характеристик дает Парето-оптимальные решения указанной оптимизационной задачи и многомерные диаграммы обмена введенных показателей качества (3.6).

Известно также решение задачи оптимизации симплексной системы связи с учетом совокупности показателей качества, которая была рассмотрена в работе Н.С. Губонина [29]. Полагалось, что система состоит из кодера (устройства формирования сигналов), передатчика, передающей антенны, канала связи с аддитивным флуктуационным шумом, приемной антенны, входной высокочастотной части приемника, устройства обработки сигналов (декоде-

ра). В системе связи предусмотрено поэлементное резервирование, причем время жизни каждого элемента подчиняется экспоненциальному закону распределения. Система связи характеризуется такой совокупностью показателей качества: k_1 — величина, обратная скорости передачи, k_2 — стоимость системы, k_3 — аппаратурная ненадежность системы, k_4 — помехоустойчивость системы.

В этой многокритериальной оптимизационной задаче минимизировался показатель k_1 при фиксированных, но произвольных значениях других показателей качества. Путем параметрической оптимизации с ограничениями типа равенств методами геометрического программирования найдена Парето-оптимальная поверхность, определяющая взаимосвязь потенциальных значений введенных показателей качества.

В рассмотренных выше оптимизационных задачах, а также и при решении многих других задач оптимизации СПИ в явной или скрытой форме учитывается не один, а некоторая совокупность связанных между собой и антагонистических показателей качества. Таким образом, в общем случае практически все оптимизационные задачи в области связи являются многокритериальными по своей сути. Игнорирование остальных показателей качества, кроме одного (наиболее важного), при оптимизации СПИ недопустимо. Это связано с тем, что при этом задача оптимизации СПИ вырождается в тривиальную и оптимизируемый показатель качества достигает нуля. Поэтому много классических задач оптимизации в области связи, которые решены как задачи скалярной оптимизации, можно рассматривать с позиций многокритериальной оптимизации. Это дает возможность иначе посмотреть на результаты решения задачи оптимизации, получить и проанализировать многомерные потенциальные характеристики, а также многомерные диаграммы обмена показателей качества и сделать соответствующие выводы о путях повышения эффективности соответствующих СПИ.

3.2. Многомерные потенциальные характеристики и многомерные диаграммы обмена показателей качества СПИ

В предыдущем подразделе приведены МПХ и МДО показателей качества для некоторых СПИ. Теперь рассмотрим МПХ и МДО показателей качества для СПИ с различным видом модуляции и по-

мехоустойчивого кодирования. Представим эти характеристики в традиционном для теории связи виде. В частности, будем рассматривать показатели качества СПИ в виде относительной скорости $\eta = R / C$ и удельной скорости передачи, отнесенные соответственно к полосе пропускания $\gamma = R / F$ и к отношению сигнал-шум $\beta = R / (P_c / N_0)$ [28]. Показатель η характеризует информационную эффективность СПИ, то есть степень использования пропускной способности канала связи. Показатели γ и β соответственно характеризуют частотную и энергетическую эффективность СПИ. По этим показателям осуществляют оптимизацию не только кодеков, но и модема или их совместную оптимизацию, т. е. оптимизацию СПИ в целом, с учетом способов как модуляции-демодуляции, так и кодирования-декодирования.

Пропускная способность СПИ для непрерывного канала связи с аддитивным гауссовским шумом определяется известной формулой Шеннона (3.1). С учетом приведенных выше выражений для показателей эффективности η , γ , β соотношение (3.1) принимает вид [28]

$$\eta = \gamma / \log(\gamma / \beta + 1). \quad (3.8)$$

Рассматривая эту функцию как целевую $Q(\beta, \gamma) = \eta(\beta, \gamma)$ для СПИ и определяя ее максимальное значение η_{\max} , которое стремится к единице при соответствующих способах передачи (кодирования и модуляции) и приема (демодуляции и декодирования). При этом ошибка передачи может быть сделана сколь угодно малой. В этом случае из условия $\eta = 1$ получают следующую предельную зависимость между β и γ :

$$\beta = \gamma / (2^\gamma - 1).$$

Эта зависимость граничной энергетической и частотной эффективности СПИ отображает обмен между потенциальными значениями показателей энергетической и частотной эффективности для идеальной СПИ (при $\eta = 1$). Эту кривую называют также пределом или границей Шеннона. Её удобно изображать графически в логарифмическом масштабе (рис. 3.2).

В реальных СПИ вероятность ошибки передачи битовых символов $P_{\text{ош}}$ всегда имеет конечное значение и показатель информационной эффективности обычно получается меньше 1 ($\eta < 1$). При этом для реальных СПИ соответствующие значения показателей энергетической и частотной эффективности β и γ находятся ниже и левее границы Шеннона. Эти значения представляют графически в виде

точек в координатах β - γ при фиксированном значении вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$, которая зависит от вида и параметров модуляции, используемых для передачи сообщений, а также отношения сигнал-шум.

Для примера на рис 3.2 приведены кривые обмена значений показателей эффективности β и γ для реальных СПИ с различным видом и кратностью многопозиционной модуляции, которым соответствуют различные типа модулированных сигналов — ортогональные сигналы (ОС), биортогональные сигналы (БС), фазоманипулированные сигналы (ФМ) при различных параметрах (кратности многопозиционной модуляции) и вероятности ошибки $p = 10^{-5}$. Полученные кривые являются многомерными потенциальными характеристиками и многомерными диаграммами обмена показателей качества СПИ, которые отражают обмен между потенциальными значениями показателей энергетической и частотной эффективности СПИ β и γ при конкретных видах и параметрах модуляции. Соотношениям $\gamma = \beta q$ соответствуют прямые с углом наклона 45° (линии для одинаковых значений соотношения сигнал-шум q , которое определяет вероятность ошибки передачи $P_{\text{ош}}$).

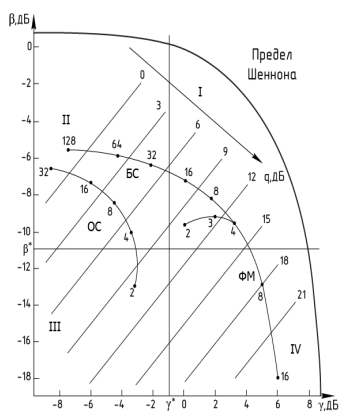


Рис.3.2. Показатели энергетической и частотной эффективности СПИ при различных видах и параметрах модуляции

Диаграммы обмена показателей качества β и γ позволяют выбрать системы, удовлетворяющие заданным требованиям, т. е. осуществить оптимизацию по показателям качества β и γ . При этом можно осуществить оптимизацию по одной из частичных стратегий:

1) максимизировать энергетическую эффективность β при допустимых изменениях $\gamma \in \gamma'$ и заданной вероятности ошибки передачи $p \leq p_{\text{дон}}$,

2) максимизировать частотную эффективность γ при допустимых изменениях $\beta \in \beta'$ и заданной вероятности ошибки

передачи $p \leq p_{\text{дон}}$, где γ' и β' — области допустимых изменений γ и β .

Область возможных значений β и γ можно разбить на четыре квадранта (рис 3.2). Системы, расположенные в квадранте I, удовлетворяют требованиям по обоим показателям: $\beta > \beta^*$ и $\gamma > \gamma^*$. Систе-

мы, расположенные в квадранте II, удовлетворяют требованиям только по β , а системы квадранта IV удовлетворяют требованиям только по γ . Системы квадранта III не удовлетворяют требованиям по обоим показателям: $\beta > \beta^*$ и $\gamma > \gamma$.

Возможные варианты реальных СПИ можно условно разбить на 2 группы: системы с высокой β -эффективностью (но малой γ) и системы с высокой γ -эффективностью (и соответственно малой β). К первой группе относятся системы, в которых первостепенное значение имеют энергетические показатели, в частности космические и спутниковые системы связи. Для них определяющей является первая стратегия, согласно которой необходимо обеспечить наилучшее использование мощности сигнала при заданной верности передачи. В системах проводной связи важнейшим показателем является γ -эффективность. Оптимизация таких систем производится по второй стратегии, согласно которой необходимо добиться наилучшего использования полосы частот канала при заданной верности передачи. В ряде случаев требуется выбирать компромиссное решение, при котором одновременно достигаются заданные (достаточно высокие) значения β и γ . Диаграммы обмена показателей эффективности позволяют решить и эту задачу.

В работе [169] рассмотрены особенности оптимизации системы связи путем уменьшения вероятности ошибки передачи с использованием корректирующих кодов, в частности, блочных кодов Хемминга, Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ), Рида-Соломона (РС); сверточных кодов; многопорогового декодирования самоортогональных (МПД-СОК) кодов; комбинаций кодов — каскадного кода и турбокода. На рис. 3.3 показана граница Шеннона для канала связи с аддитивным белым гауссовским шумом, а также точки, соответствующей системам связи с использованием перечисленных видов корректирующих кодов. Здесь цифрами обозначены точки, соответствующие системам связи: 1 — с кодом Хемминга; 2 — с кодом Боуза-Чоудхури-Хоквингема; 3 — с кодом Рида-Соломона; 4 — с многопороговым декодированием самоортогональных кодов; 5 — со сверточным кодом и свободным расстоянием 18; 6 — со сверточным кодом и свободным расстоянием 5; 7 — с каскадным кодом; 8 — с турбокодом.

В работе [171] приведены диаграммы обмена показателей энергетической и частотной эффективности для систем связи с заданным видом кодирования при различных параметрах корректирующих кодов, которые позволяют сравнить их между собой, а также вы-

брать конкретный вид помехоустойчивого кодирования и оценить выигрыш, который достигается при использовании конкретных типов помехоустойчивого кодирования.

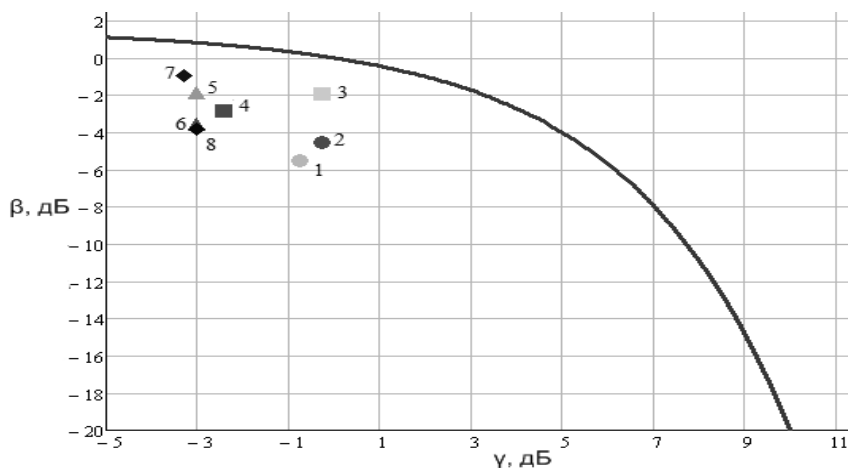


Рис. 3.3. Энергетическая и частотная эффективность систем связи с различным видом корректирующих кодов при вероятности ошибки передачи 10^{-12}

В работе [88] приведены оценки показателей энергетической и частотной эффективности β и γ для цифровых систем связи, в которых используются различные виды многопозиционной фазовой, частотной квадратурной модуляции (MPSK, MFSK, QAM) при различном числе позиций многопозиционной модуляции сигналов, а также с дополнительным использованием различных типов помехоустойчивого кодирования. Полученные диаграммы обмена этих показателей качества дают возможность анализировать различного типа компромиссы по достижению энергетической и частотной эффективности систем связи при переходе от одного варианта системы связи к другому. Это дает возможность проектировщикам выбрать конкретную структуру и параметры системы связи (тип и параметры модема и кодека), а также анализировать разные компромиссы по обмену значений этих показателей качества для достижения требуемой эффективности системы связи в конкретных условиях работы.

Таким образом, существует некоторое множество вариантов построения различных типов систем связи, которые характеризуются

различными потенциальными значениями показателей энергетической и частотной эффективности β и γ . Среди этих вариантов разработчику системы связи необходимо выбирать единственный предпочтительный вариант структуры системы с привлечением некоторой дополнительной информации. Для выбора предпочтительного варианта могут быть использованы методы выбора предпочтительного варианта системы, которые описаны в п. 2.4.

В частности, по значениям показателей энергетической и частотной эффективности β и γ для различных вариантов систем связи можно вычислить показатель информационной эффективности на основе выражения (3.8), которое может рассматривать как скалярную целевую функцию. По максимальному значению функции (3.8) можно выбрать предпочтительный вариант системы связи. Например, по значениям показателей энергетической и частотной эффективности систем связи с различными видами многопозиционной модуляции, приведенными в работе [28], можно получить такие значения показателя информационной эффективности: $\eta = 0,23$ — для системы с АМ-2; $\eta = 0,15$ — для системы с ЧМ-2; $\eta = 0,25$ — для системы с ФМ-2 и $\eta = 0,47$ — для системы с ФМ-4. При том среди рассмотренных вариантов систем связи предпочтительным вариантом является система связи с видом модуляции ФМ-4.

В п. 7.1 рассмотрен способ выбора предпочтительного варианта построения цифровой системы связи с различным видом многопозиционной модуляции на основе метода анализа иерархий, который использует информацию о парных сравнениях показателей качества и вариантов систем с модуляцией.

3.3. Оптимизация сети связи по совокупности показателей среднего времени задержки и стоимости

Сети связи представляют собой совокупность конечных узлов и узлов коммутации, а также каналов (линий) связи (КС) которые соединяют их между собой [9, 10, 21, 22]. Это более сложные системы связи, в которых в качестве линий связи фактически используются одноканальные либо многоканальные системы передачи информации. В сетях связи наряду с процессами передачи информации в КС имеют место процессы распределения информации, которые проходят в узлах коммутации [8]. Поэтому в сетях связи на-

ряду с показателями качества, характеризующими процессы передачи информации, следует учитывать показатели, характеризующие процессы распределения информации. Это показатели качества, связанные с задержкой и потерей сообщений, ошибками по доставке сообщений конкретным адресатам и др.

Рассмотрим известную задачу минимизации среднего времени задержки в сети связи с коммутацией сообщений и фиксированной процедурой выбора маршрутов, который возникает при проектировании сетей связи. Аналитическое решение такой задачи было предложено Л. Клейнроком в работе [9]. Здесь приведено решение задачи многокритериальной оптимизации с двумя показателями качества в виде среднего времени задержки сообщений в сети связи и стоимости арендной оплаты за пользование сетью. Минимизировался один из показателей качества (среднее время задержки сообщений в сети) при условии, что второй показатель (арендная плата) переведен в разряд ограничений, то есть принимал фиксированное значение. Решение такой оптимизационной задачи достигалось путем выбора оптимальных пропускных способностей каналов связи.

Остановимся на основных этапах решения этой задачи. Процесс передачи сообщений в сети связи порождает систему случайных (во времени и в пространстве) потоков данных. Полагается, что качество функционирования сети связи определяется в первую очередь средним временем задержки сообщений, которое характеризуется промежутком времени от момента подключения отправителя к сети к моменту выдачи сообщения данных получателю. Сообщения возникают в случайные моменты времени, а их продолжительности во времени являются случайными величинами. Для передачи сообщений в сети связи используются КС с определенными пропускными способностями, значение которых влияет на время задержки сообщений в сети. В качестве критерия оптимальности сети связи выбирается минимум среднего времени задержки сообщений при заданных ограничениях на стоимость сети (арендную плату за пользование сетью).

Рассмотрим математическую модель сети связи с точки зрения ее использования при решении указанной оптимизационной задачи. Модель сети связи с коммутацией сообщений имеет V каналов связи (КС) и W узлов коммутации (УК). Считается, что в КС отсутствуют ошибки и аппаратные отказы, а пропускная способность i -го КС равняется c_i (бит/с). Продолжительность обработки сообщений во всех УК является постоянной и равняется $t_{обп}$. Как правило, вели-

чина $t_{обр}$ является значительно меньшей по отношению к продолжительности передача сообщений по КС.

С точки зрения математической модели массового обслуживания каждый КС рассматривается как обслуживающий прибор и может иметь очередь заявок на обслуживание (передачу сообщений), из-за чего возможны задержки при передаче сообщений от отправителя к получателю сети. Полагается, что трафик, который поступает от источников сообщений, образует пуассоновский поток со средним значением γ_{ik} . Это количество сообщений за секунду, которые возникают в УК w_j и предназначены для передачи в УК w_k . Полный внешний трафик, который поступает в сеть, определяется соотношением

$$\gamma = \sum_{j=1}^W \sum_{k=1}^W \gamma_{jk}.$$

Длины сообщений являются независимыми величинами и распределены по показательному закону со средним значением $1/\infty$ бит. Для размещения этих сообщений в УК имеется буферная память неограниченного объема. Считается, что объем буферной памяти настолько большой, что вероятность одновременного обращения разных пользователей к этому ресурсу меньше чем 10^{-3} . При этом предположение о неограниченном объеме буферной памяти является вполне приемлемым. Сообщения посылаются по сети от узла-источника к узлу-получателю в соответствии с фиксированной процедурой выбора маршрутов.

Если сообщение имеет длину n бит, то время, на протяжении которого оно занимает i -й КС, будет n/c_i . Если обозначить через λ_i среднее число сообщений в секунду, которые проходят по i -му каналу, тогда полный внутренний трафик в сети определяется соотношением

$$\lambda = \sum_{i=1}^V \lambda_i.$$

Стоимость аренды i -го КС с пропускной способностью c_i задается некоторой функцией $d_i(c_i)$, которая зависит от номера и пропускной способности КС. Обозначим через D стоимость всей сети связи, которая определяется в основном стоимостью построения (или аренды) КС. При этом стоимость УК можно включить непосредственно в стоимость каналов. Тогда стоимость всей сети связи равняется

$$D = \sum_{i=1}^V d_i(c_i). \quad (3.9)$$

Наибольший интерес составляет среднее время задержки сообщений в сети \bar{T} , которое считается пользователем одной из основных характеристик сети связи. Обозначим через \bar{Z}_{jk} величину задержку сообщения, которая возникла в УК w_j и передается в УК w_k . Тогда величины \bar{T} и Z_{jk} связаны соотношением

$$\bar{T} = \sum_{j=1}^W \sum_{k=1}^W (\gamma_{jk} / \gamma) \bar{Z}_{jk}, \quad (3.10)$$

где γ_{jk} / γ — часть полного входного трафика, которая имеет задержку \bar{Z}_{jk} .

Выражение (3.10) отображает разложение сети по парам «источник-получатель».

Определим критерий качества сети связи — среднее время задержки сообщений \bar{T} в сети — и будем минимизировать его значения за счет соответствующего выбора оптимальных значений пропускных способностей КС при учете ограничений на стоимость сети типа равенства (3.9).

Таким образом, в этой оптимизационной задаче рассматривается основная техническая характеристика сети связи — среднее время задержки сообщений \bar{T} и ограничение на стоимость сети D , а также топология и параметры сети — $\{c_i\}, \{\lambda_i\}$. При этом варьируемыми параметрами являются пропускные способности КС $\{c_i\}$.

Рассмотрим среднее время задержки \bar{T} , определяемое соотношением (3.10), для выяснения природы его случайного характера. Обозначим через l_{jk} путь, по которому передается сообщение от УК w_j до УК w_k . Считается, что трафик γ_{ik} для i -го КС с пропускной способностью c_i включен в путь l_{jk} , если сообщения, переданные по этому пути, проходят через указанный КС. В таком случае интенсивность потока заявок λ_i по i -му КС должна равняться сумме интенсивностей потоков заявок по всем путям, которые проходят через этот КС

$$\lambda_i = \sum_j \sum_k \gamma_{jk}. \quad (3.11)$$

Поскольку \bar{Z}_{jk} представляет собой сумму средних времен задержек, которые получило сообщение при его передаче по разным КС пути l_{jk} , то

$$\bar{Z}_{jk} = \sum_{i: c_i \in l_{jk}} \bar{T}_i, \quad (3.12)$$

Здесь \bar{T}_i — среднее время, проведенное сообщением в i -м КС, то есть среднее время задержки. Оно определяется как время, потраченное на ожидание и передачу по i -му КС.

С учетом (3.10), (3.11) получается следующее выражение для среднего времени задержки

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^V (\gamma_i / \gamma) \bar{T}_i. \quad (3.13)$$

К этому же результату можно прийти также, воспользовавшись формулой Литла. Действительно, среднее число сообщений, которые ожидают обслуживания в i -м КС, равно $\lambda_i \bar{T}_i$. Тогда среднее

число сообщений в сети будет $\sum_{i=1}^V \lambda_i \bar{T}_i$. С другой стороны, среднее

число сообщений в сети равняется $\gamma \bar{T}$. Приравнивая эти величины

$\gamma \bar{T} = \sum_{i=1}^V \lambda_i \bar{T}_i$, получаем

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^V \lambda_i \bar{T}_i / \gamma. \quad (3.14)$$

Выразим среднее время, проведенный сообщением в сети, через характеристики КС. В рассмотренной модели сети интервалы между моментами поступления сообщений зависят от времени обслуживания в КС. Это означает, что время обслуживания для данного сообщения в разных КС связано с длиной сообщения n и фиксированными параметрами каналов: длиной l_{ij} и временем распространения сигнала в КС t_i . Если v — скорость распространения энергии сигнала одной битовой посылки сообщения в канале, то $t_i = l_{ij} / v$. Если сообщение состоит из n битовых символов, то время, на протяжении которого оно занимает i -й КС, будет определяться суммой $t_i + n / c_i$. Учитывать значения t_i следует для сети связи, которая имеет большую географическую длину. Полагается, что КС не вносят ошибок и являются надежными.

Для сети со средней связностью УЖ имеют более чем один входной канал и более чем один выходной канал. Используя предположение о независимости КС, отдельный КС можно представлять в виде однолинейной системы массового обслуживания с пуассоновским потоком λ_i на входе и экспоненциальным временем обслуживания со средним значением $1 / \mu_i$. Для такой системы среднее время задержки, обусловленное временами ожидания и временами обслуживания, представляется в виде $\bar{T}_i = n_c / (\mu_i) + 1 / (\mu_i)$.

Используя выражение для среднего числа сообщений, которые ожидают обслуживания в i -м КС $n_c = \lambda_i \bar{T}_i$, и выполняя соответствующие преобразования, получаем выражение для среднего времени задержки в i -м КС

$$\bar{T}_i = 1 / (\mu c_i - \lambda_i). \quad (3.15)$$

Подставив это выражение в (3.14), окончательно получаем соотношение для среднего времени задержки сообщений в сети связи

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^K (\lambda_i / \gamma) [1 / (\mu c_i - \lambda_i)]. \quad (3.16)$$

Анализируя выражение (3.16), можно сделать некоторые выводы в отношении среднего времени задержки сообщений в сети. В том случае, когда множество пропускных способностей КС $\{c_i\}$ относительно однородное, при увеличении нагрузки на сеть никакое слагаемое в выражении для среднего времени задержки сообщений в сети не будет доминирующим до тех пор, пока поток сообщений в одном из КС (например, в i -м) не достигнет пропускной способности этого КС. Этот КС становится «узким» местом в сети и тогда значение \bar{T} быстро возрастет.

После выполненного анализа причин задержки сообщений при передаче через сеть можно перейти к рассмотрению задачи минимизации \bar{T} путем выбора соответствующих оптимальных пропускных способностей КС $\{c_i\}$.

Таким образом, задача выбора оптимальных пропускных способностей КС в сети связи формулируется следующим образом. Заданы потоки $\{\lambda_i\}$ и топология сети. Требуется минимизировать \bar{T} за счет вариации $\{c_i\}$ при учете ограничения (3.9). Будем рассматривать случай линейных стоимостных функций относительно пропускных способностей КС

$$d_i(c_i) = d_i c_i \quad (3.17),$$

где d_i — стоимость единицы пропускной способности для i -го КС.

Стоимостный коэффициент d_i может произвольно меняться в зависимости от какого-то параметра КС, но он должен линейно зависеть от пропускной способности. Например, d_i часто берется пропорциональным физической длине канала. Таким образом, в случае линейной зависимости сохранение общей стоимости на фиксированном уровне будет эквивалентной поддержке общей пропускной способности сети на некотором постоянном уровне.

Из выражения (3.16) вытекает, что любое реализуемое решение задачи ВПС должно быть таким, чтобы выполнялось условие: i -й КС должен иметь пропускную способность $c_i > \lambda_i / \mu$. С точки зрения задержки сообщений в сети связи несущественно, таким образом распределяется избыточная стоимость относительно входного трафика и пропускных способностей КС. Важно только, чтобы выполнялось указанное выше условие,

При заданном виде функционала для основного показателя качества сети связи (3.16) можно отыскать его минимальное значение при введении ограничений на другой показатель качества (3.9). Для решения такой двухкритериальной оптимизационной задачи можно использовать метод неопределенных множителей Лагранжа. При этом составляется функционал Лагранжа $G = \bar{T} + \beta \left[\sum_{i=1}^V d_i c_i - D \right]$, где β — множитель Лагранжа. Если найти минимальное значение этого функционала путем вариации пропускных способностей $\{c_i\}$, то тем самым будет решена сформулированная выше оптимизационная задача. При этом определяются оптимальные пропускные способности КС, при которых достигается минимальное значение среднего времени задержки сообщений в сети. Оптимальные пропускные способности КС определяются выражениями

$$c_{i,opt} = \lambda_i / \mu + D_e \sqrt{\lambda_i d_i} / d_i \sum_{j=1}^V \sqrt{\lambda_j d_j}, \quad (3.18)$$

где $D_e = D - \sum_{i=1}^V \lambda_i d_i / \mu$ — некоторая добавочная стоимость. (3.19)

Из (3.19) следует, что в начале проектирования СПД на каждый КС выделяется пропускная способность, которая отвечает нагрузке λ_i / μ . Резервная пропускная способность, которая осталась, распределяется между каналами пропорционально квадратному корню их нагрузок. Чтобы получить конечную величину среднего времени задержку сообщений в проектируемой сети, ее полная стоимость должна быть больше суммы стоимостей по всем V каналам. Тогда выражение (3.19) определяет добавочную стоимость, которая предназначена на поддержку необходимых характеристик сети в реальных условиях работы.

Подставив выражение (3.18) в (3.16), получим выражение для минимального среднего времени задержки сообщений в СПД, которое достигается при выборе оптимальных пропускных способностей КС,

$$\bar{T}_{\min} = \left[\bar{T} / (\mu D_e) \right] \left[\sum_{i=1}^V \sqrt{\lambda_i d_i / \lambda} \right]^2, \quad (3.20)$$

где \bar{T} — средняя длина КС.

Соотношение (3.20) определяет выражение для минимального среднего времени задержки в сети для случая, когда пропускные способности КС выбраны оптимальными. При $D_e \rightarrow 0$ среднее время задержки сообщений неограниченно возрастает. Если $D_e > 0$, то задача имеет реализуемое на практике решение, при котором $\bar{T} < \infty$. Если $D_e \leq 0$, задача не имеет реализуемого решения.

Таким образом, соотношения (3.18) и (3.20) дают полное решение сформулированной оптимизационной задачи в случае линейной стоимостной функции затрат.

Анализируя выражение (3.20), можно сделать ряд полезных выводов. Прежде всего, \bar{T} является строго возрастающей функцией средней длины КС \bar{l} . Поэтому топология сети должна выбираться такой, чтобы получить минимальную величину \bar{T} . Это, естественно, достигается в полносвязной сети, то есть такой, где каждая пара УК соединена КС. Но на практике часто это невыполнимо с точки зрения затрат. Поэтому часто применяется выбор оптимальных путей передачи сообщений в сети с использованием метода Краскала.

Выше приведенные результаты оптимизации получены при условии, когда трафики γ_{jk} известны и постоянны, а процедуры выбора маршрутов фиксированы. Если они или неизвестны, или меняются во времени, то нельзя задать параметры трафика в КС λ_i , а значит оптимально распределить трафик согласно (3.18). Это определяет необходимость введения адаптивной процедуры маршрутизации, которая допускает альтернативы выбора маршрутов с целью поиска путей с недогруженной пропускной способностью КС.

При проектировании сложных СПД возникает необходимость решения частных задач оптимизации [10, 13]. В частности, при анализе и синтезе систем связи возникает необходимость решения задачи поиска множества путей, которые существуют между заданными парами узлов связи. Все методы поиска путей в сети делятся на два класса: матричные и сетевые. Матричные методы базируются на преобразовании разных матриц — топологических или матриц характеристик ребер графа, который описывает сеть. Сетевые методы основаны на построении дерева путей из фиксированных вершин-истоков к вершинам-стокам некоторых графов.

Сетевые методы являются графическим эквивалентом матричных методов.

Другими частными оптимизационными задачами, которые возникают при проектировании сложных сетей связи, являются задачи распределения каналов и потоков информации с учетом разных критериев весовой характеристики путей. Наиболее распространенными методами распределения каналов являются методы, которые используют «кратчайшие» пути. Под «кратчайшими» понимают пути, кратчайшие по длине, с минимальным количеством транзитных участков, с максимальной пропускной способностью, с минимальной стоимостью, с максимальной надежностью. Существует ряд методов, которые позволяют привести в порядок процедуру определения длины ранга или других характеристик путей. Условно эти методы можно разделить на две группы: матричные и сетевые. К матричным методам относится алгоритм Флойда, который дает возможность получить как матрицу длин кратчайших расстояний, так и маршрутную матрицу, которая определяет вершины графа, которые составляют пути. Алгоритмы распределения потоков в сети основаны на теоремах Форда и Фалкерсона о максимальном потоке и минимальном разрезе в сети [10, 13].

3.4. Выбор оптимальных проектных вариантов сети передачи данных с учетом совокупности показателей качества

В предыдущем подразделе приведено аналитическое решение многокритериальной задачи оптимизации сети связи. Однако в ряде случаев не удастся получить аналитические выражения для показателей качества проектируемой сети и применить аналитические методы оптимизации. При этом находятся количественные оценки совокупности показателей качества путем статистического моделирования некоторого множества допустимых вариантов сети. Далее для выбора оптимальных вариантов из допустимого множества допустимых вариантов сети может быть использована методология многокритериального выбора оптимальных проектных вариантов, которая приведена в разделе 2.

Рассмотрим пример многокритериального выбора оптимального проектного варианта для сети передачи данных с пакетной коммутацией с учетом совокупности показателей качества [185, 209]. Выбраны показатели качества, определяемые временем доставки

и вероятностью потери пакетов в рамках дейтаграмной передачи сообщений. Эти показатели качества связаны между собой и являются антагонистическими, то есть при улучшении значения одного из показателей другой показатель качества ухудшается. Такая задача выбора оптимальных проектных вариантов сети передачи данных актуальна для практических приложений, которые критичны ко времени доставки сообщений, в частности, в системах передачи видео и речевых сообщений, системах банковских терминалов, системах сигнализации, системах устранения неисправностей на сетях связи.

При исследованиях построена математическая модель топологии сети передачи данных. В структуру математической модели сети введены имитаторы источников сообщений, процедуры упаковки сообщений в пакеты и передачи их по КС, процедуры маршрутизации и обслуживания в УК, имитаторы ошибок в КС. Моделировались источники сообщений с пуассоновским законом распределения и разными интенсивностями заявок. Предусмотрено также моделирование разных задержек при передаче пакетов, связанных с конечной скоростью распространения сигналов в каналах связи, фиксированной пропускной способностью каналов связи, а также временем пребывания пакетов в очереди на передачу по КС. Реализованы различные варианты работы сети, которые отличались дисциплинами обслуживания пакетов данных в очередях, способами маршрутизации при передаче пакетов и размером окна транспортного соединения.

В рассмотренном примере было рассмотрено тридцать шесть вариантов работы сети передачи данных. В результате статистического моделирования для каждого варианта сети найдены оценки показателей качества: среднего времени доставки пакетов $k_1 = \bar{T}$ и средней вероятности потери сообщения $k_2 = \bar{P}$. При этом допустимое множество вариантов работы сети передачи данных было представлено в критериальном пространстве. На рис. 3.5 приведены значения показателей качества вариантов сети, нормированные к максимальным значениям.

Здесь выделено подмножество Парето-оптимальных оценок вариантов сети путем исключения безусловно худших вариантов по критерию Парето. Подмножеству Парето-оптимальных вариантов сети соответствует левая нижняя граница множества допустимых вариантов, которая включает варианты: 1, 10, 11, 13, 17, 20. Среди Парето-оптимальных вариантов сети выбран единственный вариант с применением условного критерия предпочтения — из

условия минимума скалярной функции ценности в виде результирующего показателя качества в виде $k_p = C_1 k_1 + C_2 k_2$. Для случая $C_1 = 0,4$, $C_2 = 0,6$ выбран вариант работы сети 11, для которого установлены: дисциплина обслуживание заявок — в случайном порядке, способ маршрутизации — равномерный согласно весам, размер «окна» передачи — равный 8.

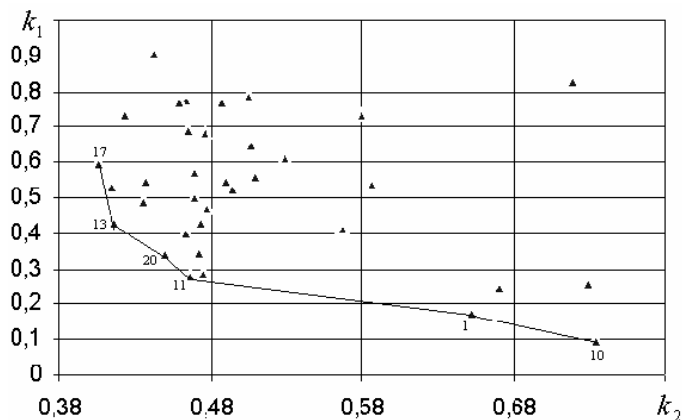


Рис. 3.5. Выбор Парето-оптимальных вариантов сети передачи данных в критериальном пространстве

3.5. Выбор оптимальных маршрутов в мультисервисных сетях связи с учетом совокупности показателей качества

Проблема маршрутизации становится одной из наиболее значимых областей в задаче управления мультисервисными сетями связи. Это важная задача, потому что такие сети является инфраструктурой, предоставляющей различные услуги с разным уровнем качества. В вопросе маршрутизации обычно рассматривается несколько критериев: стоимость, ширина полосы пропускания, задержка, джиттер, потерянные пакеты, вероятность ошибок [113,128]. Поэтому актуальным является решение задачи оптимальной маршрутизации с учетом совокупности показателей. Рассмотрим некоторые особенности применения методологии многокритериальной оптимизации при планировании маршрутов в сетях связи [201].

Задача оптимальной маршрутизации с учетом совокупности показателей качества представляется моделью $\{X, F\} \rightarrow x^*$, где $X = \{x\}$ — множество допустимых решений; $F(\infty)$ — целевая функция выбора; x^* — оптимальное решение задачи маршрутизации. Многокритериальный подход требует осуществить декомпозицию целевой функции $F(\bullet)$, то есть ее эквивалентное представление с помощью совокупности частных функций выбора $F_v(x)$, $v = 1, \dots, N$.

При этом может быть сформулирована следующая многокритериальная задача маршрутизации. Задано множество допустимых решений (маршрутов) на конечном графе сети $G = (V, E)$, где V — множество узлов, E — множество линий связи. Допустимое множество маршрутов — это те решения $x \in X$ в виде подграфов $x = (V_x, E_x)$ для графа $G = (V, E)$, которые удовлетворяют ограничениям $V_x \in V$, $E_x \in E$. Полагается, что на множестве X задана векторная целевая функция $\vec{F}(x) = (F_1(x), \dots, F_v(x), \dots, F_m(x))$, составляющие которой определяют значения соответствующих показателей качества маршрутов k_v . Показатели качества маршрутов, связаны между собой и антагонистичны. Требуется найти варианты маршрутов, оптимальные по совокупности показателей качества. Решением такой задачи является подмножество Парето-оптимальных вариантов маршрутизации, которым соответствует согласованный оптимум частных целевых функций $F_1(x), \dots, F_v(x), \dots, F_m(x)$.

Рассмотрим особенности выбора оптимальных маршрутов с учетом совокупности показателей качества сети связи, представляемой графом $G = (V, E)$. Каждый маршрут, определяемый соответствующими комбинациями линий связи $E_x \in E$, характеризуется совокупностью показателей качества обслуживания k_v , $v = 1, m$ и соответствующими им частными целевыми функциями $F_1(x)$, ..., $F_v(x)$, ..., $F_m(x)$.

Вариант маршрута $\tilde{x} \in X$ является Парето-оптимальным, если не существует другого маршрута $x^* \in X$, для которого выполняются неравенства $F_v(x^*) \leq F_v(\tilde{x})$, $v = 1, \dots, m$, причем, хотя бы одно из них является строгим. При сравнении маршрутов по этому векторному критерию предпочтения из множества допустимых вариантов исключаются безусловно худшие варианты маршрутов и остаются несравнимые между собой — Парето-оптимальные варианты маршрутов.

Для нахождения Парето-оптимальных вариантов маршрутизации использован весовой метод. Он сводится к нахождению экстремальных значений скалярной целевой функции маршрутов при

различных допустимых комбинациях значений коэффициентов λ_i
 ($\lambda_i > 0, \sum_{i=1}^v \lambda_i = 1$)

$$\underset{\text{var}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_v)}{\text{extrem}} \left(F_p(x) = \sum_{v=1}^m \lambda_v F_v(x) \right).$$

Рассмотрен пример решения сформулированной многокритериальной задачи оптимальной маршрутизации на примере фрагмента сети связи (рис. 3.5).

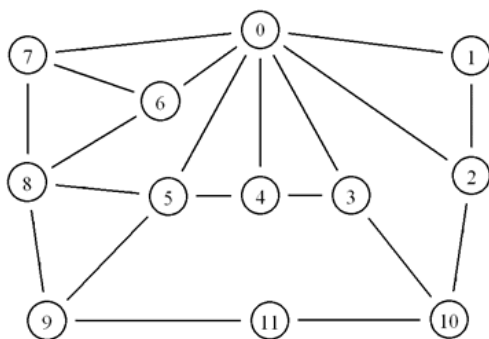


Рис. 3.5. Структура исследуемой сети связи

Информация передается из узла «0» во все остальные узлы. Введены следующие показатели качества линий связи: время задержки пакетов k_1 , вероятность потери пакетов k_2 , а также стоимость использования линии связи. Значения нормированных к максимальным значениям показатели качества линий связи приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Нормированные значения показателей качества линий связи

| Линия связи | Время задержки передачи | Вероятности потери пакетов | Стоимость линии связи |
|-------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 0-1 | 0.676 | 1 | 0.333 |
| 0-2 | 1 | 0.25 | 1 |
| 0-3 | 0.362 | 1 | 0.333 |

| Линия связи | Время задержки передачи | Вероятности потери пакетов | Стоимость линии связи |
|-------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 0-4 | 0.381 | 0.25 | 1 |
| 0-5 | 0.2 | 1 | 0.333 |
| 0-6 | 0.19 | 1 | 0.333 |
| 0-7 | 0.571 | 0.25 | 1 |
| 7-6 | 0.4 | 0.25 | 0.333 |
| 7-8 | 0.362 | 0.25 | 0.667 |
| 8-6 | 0.314 | 0.5 | 0.5 |
| 8-5 | 0.438 | 0.25 | 0.333 |
| 8-9 | 0.248 | 0.5 | 0.333 |
| 9-5 | 0.257 | 0.25 | 1 |
| 9-11 | 0.571 | 0.25 | 0.667 |
| 11-10 | 0.762 | 0.25 | 0.333 |
| 5-4 | 0.381 | 0.25 | 0.667 |
| 2-10 | 0.457 | 0.25 | 0.333 |
| 3-10 | 0.79 | 0.25 | 0.333 |
| 4-3 | 0.286 | 0.25 | 0.333 |
| 1-2 | 0.448 | 0.25 | 0.333 |

При анализе данной сети видно, что для каждого узла назначения существует значительное количество вариантов маршрута. Например, при передаче из узла «0» в узел «8» количество маршрутов составляет 22.

Для иллюстрации на рис. 3.6 изображено некоторое множество вариантов маршрутов между узлами «0» и «8» в пространстве оценок показателей качества k_1 и k_2 . Подмножеству Парето-оптимальных альтернатив маршрутов, найденных весовым методом, соответствует левая нижняя граница, включающая три точки, обозначенные (\blacktriangle). Этому подмножеству соответствует согласованный по Парето оптимум показателей качества, то есть минимально воз-

возможные значения одного показателя качества при изменении значений другого показателя качества.

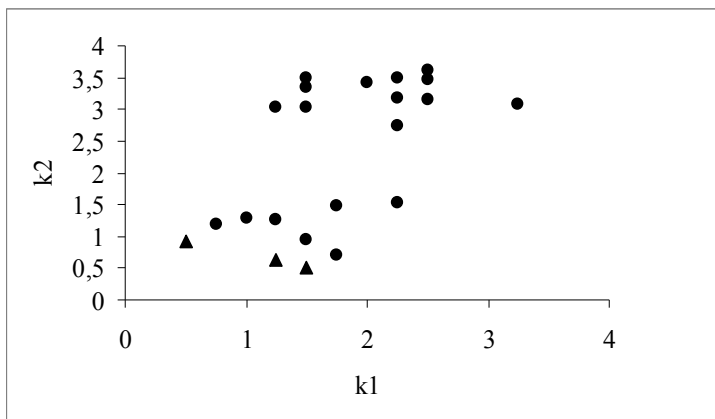


Рис. 3.6. Выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов маршрутов в критериальном пространстве

Найденные Парето-оптимальные варианты маршрутов эквивалентны с точки зрения безусловного критерия предпочтения — критерия Парето. Полученное подмножество Парето-оптимальных вариантов маршрутов может быть использовано для организации многопутевой маршрутизации, которая используется, в частности, в технологии MPLS. Такой подход позволит реализовать выравнивание нагрузки и управление трафиком, и обеспечить заданное качество обслуживания по совокупности показателей качества.

РАЗДЕЛ 4

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПРОЕКТНЫХ ВАРИАНТОВ СЕТЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

В настоящем разделе исследованы особенности построения сотовых сетей мобильной связи (ССМС), задач проектирования, планирования и оптимизации ССМС, проведен анализ существующих методов и программных продуктов планирования таких сетей. Проанализированы особенности номинального этапа планирования сотовых сетей мобильной связи второго и третьего поколений. Решена задача оптимизации ССМС на номинальном этапе планирования как задача дискретного выбора оптимальных проектных вариантов при учете совокупности выбранных показателей качества на основе методов многокритериальной оптимизации и описан программный комплекс для решения такой оптимизационной задачи. Проанализированы многомерные диаграммы обмена и получены многомерные потенциальные характеристики показателей качества ССМС. Предложены практические рекомендации по оптимизации ССМС на этапе номинального планирования сети.

4.1. Анализ задач планирования ССМС

4.1.1. Особенности построения ССМС

Стремительное развитие отрасли мобильной связи характеризуется быстро расширяющимся спектром новых услуг и технологий. Сегодня мобильная связь обеспечивает пользователей возможностью свободного общения и предоставляет широкий ряд мультимедийных услуг.

На настоящий момент общепринято выделять четыре поколения реализованных на практике систем мобильной связи. Каждое последующее поколение мобильной связи устраняет недостатки и ограничения предыдущего поколения, используя принципиально новые технологические возможности и предлагая лучшее качество обслуживания, более высокие скорости передачи речевой информации и цифровых данных [158, 163].

К первому поколению относятся аналоговые системы мобильной связи [129, 170]. Сети первого поколения использовали метод частотного разделения каналов FDMA (Frequency Division Multiple Access) и предоставляли пользователям основные услуги: входение в связь, регистрация стоимости разговоров, организация связи между подвижными абонентами и абонентами стационарной телефонной сети общего пользования и т.п. Эффективность использования аналоговых систем мобильной связи характеризуется такими параметрами, как число вызовов на соту в часы наибольшей нагрузки, средняя загрузка на соту и др.

Ко второму (2G) поколению мобильной связи относятся системы, основанные на цифровой технологии [130]. Большинство таких систем используют метод временного разделения каналов — TDMA (Time Division Multiple Access). Однако к ним относятся также первые системы (например, IS-95) основанные на технологии шумоподобных сигналов и кодовом разделении каналов CDMA (Code Division Multiple Access — множественный доступ с кодовым разделением).

По сравнению с аналоговыми цифровые системы 2G предоставляют абонентам больший набор услуг и обеспечивают повышенное качество связи, а также взаимодействие с цифровыми сетями с интеграцией служб (ISDN), пакетной передачи данных (PDN) и телефонными сетями общего пользования (PSTN).

Основными стандартами второго поколения являются следующие: GSM, D-AMPS (ADC), JDC, IS-95 [129, 135, 170]. Стандарт GSM является самым популярным и самым распространенным стандартом мобильной связи, занимающим лидирующие позиции в мире, как по площади покрытия, так и по числу абонентов.

Современные системы GPRS и EDGE считаются поколениями 2,1G и 2,75G. GPRS (General Packet Radio Service — пакетная радиосвязь общего пользования) — это не полноценный стандарт, а надстройка над технологией мобильной связи GSM, осуществляющая пакетную передачу данных. EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) — цифровая технология мобильной связи, которая функционирует как надстройка над 2G и 2.1G (GPRS) сетями. Для поддержки EDGE в сети GSM требуются определённые модификации и усовершенствования.

В настоящее время всё большее распространение в мире получают ССМС третьего (3G) поколения [97, 142, 146, 156, 161], функционирующие на основе множественного абонентского доступа

с кодовым разделением каналов CDMA [63, 83, 92, 106, 127, 131, 132, 149]. Сети 3G отличаются от сетей 2G гораздо большей скоростью передачи данных, а также более широким и более высоким качеством предоставления услуг. Эти сети обеспечивают симметричную и асимметричную передачу данных, поддержку канальной и пакетной коммутации, высокую эффективность использования спектра частот, возможность глобального роуминга, а также услуги, которые были недоступны в сетях второго поколения (потокосвое вещание, передачу мультимедийной информации, высокоскоростной интернет и др.).

Развиваются два направления ССМС третьего поколения [165]:

- WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) — технология, использующая широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов [101, 120, 121, 123, 131, 132, 140, 142, 144, 146, 147, 156]. Она совместима с сетями стандарта GSM. Эта система более известна как UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Следует отметить, что стандарт UMTS является одним из наиболее перспективных в настоящее время в Украине.

- CDMA2000 [96, 114, 131, 132, 158] — американская технология, которая использует тот же принцип расширения спектра, но в отличие от WCDMA не поддерживает межсетевое взаимодействие с сетями второго поколения.

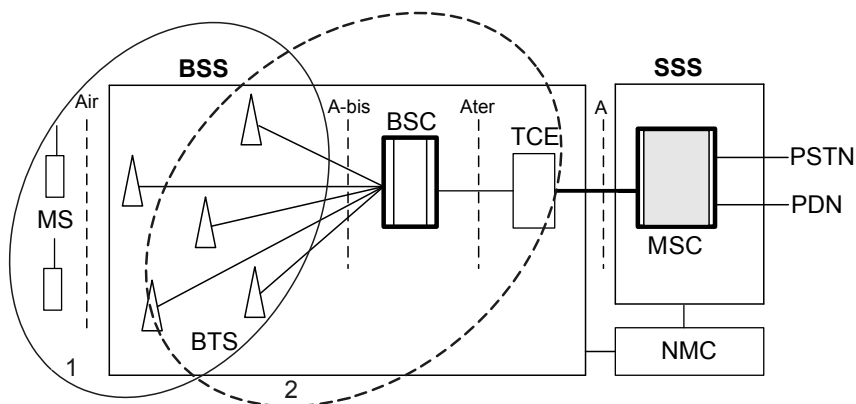
Дальнейшим развитием мировых телекоммуникационных технологий в области мобильной связи являются разработка и внедрение стандартов четвёртого (4G) поколения [140, 158, 162, 165, 168], обеспечивающих ещё большие скорости передачи данных и повышение качества предлагаемых пользовательских услуг при общем снижении издержек в эксплуатации телекоммуникационного оборудования. Системы 4G характеризуются более высокой пропускной способностью, полной конвергенцией с проводными IP-сетями, адаптивным управлением частотным спектром и высоким качеством обслуживания мультимедийного трафика [165].

К стандартам 4G относится технология LTE (Long Term Evolution). LTE сейчас интенсивно разрабатывается самыми крупными телекоммуникационными компаниями и исследовательскими центрами. Целями разработок технологии LTE являются: снижение стоимости и увеличение скорости передачи данных, возможность предоставления большего спектра услуг по более низкой цене и повышение гибкости использования уже существующих систем.

В настоящее время большая часть рынка услуг мобильной связи опирается на технологии 2G и 3G, именно поэтому исследо-

вания проводились для сетей мобильной связи второго и третьего поколений.

Структурные схемы ССМС второго поколения на примере стандарта GSM [100, 116, 138, 159] и третьего поколения на примере стандарта UMTS [100, 146] представлены соответственно на рис. 4.1 и рис. 4.2.



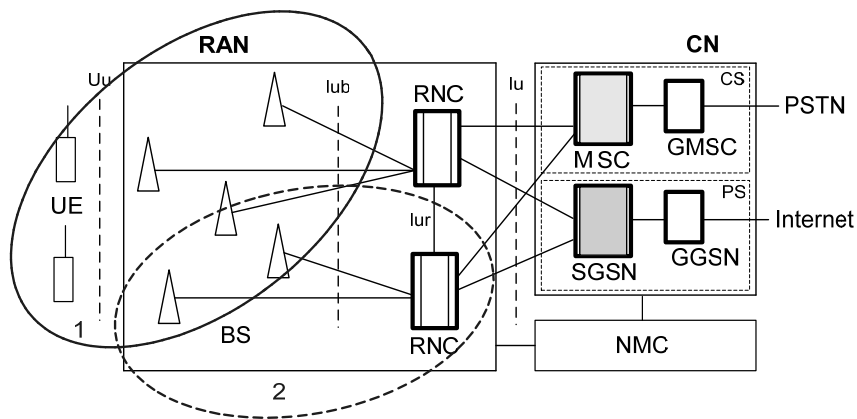
| | | |
|------|-----------------------------------|------------------------------------|
| BTS | Base Transceiver Station | Базовая приемо-передающая станция |
| BSC | Base Station Controller | Контроллер базовой станции |
| BSS | Base Station System | Подсистема базовой станции |
| MS | Mobile Station | Мобильная станция |
| MSC | Mobile Switching Center | Центр коммутации мобильной связи |
| NMC | Network Management Center | Центр управления сетью |
| PDN | Packet Data Network | Сеть пакетной коммутации |
| PSTN | Public Switched Telephone Network | Телефонная сеть общего пользования |
| SSS | Switching Subsystem | Коммутационная подсистема |
| TCE | Transcoder Equipment | Транскодер |
| 1 | Radio Network | Область радиосети |
| 2 | Transmission Network | Область транспортной сети |

Рис. 4.1. Структура ССМС второго поколения (GSM)

Сеть 3G строится на базе тех же компонентов, что и сети 2G. Это: мобильная телефонная станция (в системе UMTS она называется UE); базовая телефонная станция (BS); контроллер базовой станции (контроллер управления радиосетью — RNC) и центр коммутации мобильной связи (MSC).

Как видно из рис. 4.1 и 4.2, сети мобильной связи условно подразделяются на три основных части: радиосеть (Radio Network),

транспортная сеть (Transmission Network) и опорная сеть (Core Network) [100]. В данной работе внимание уделено планированию и оптимизации радиосети и транспортной сети мобильной связи.



| | | |
|------|-----------------------------------|---|
| BS | Base Station | Базовая станция |
| CN | Core Network | Опорная сеть |
| GGSN | Gateway GPRS Support Node | Шлюзовый узел поддержки пакетного трафика |
| GMSC | Gateway Mobile Switching Center | Шлюзовый центр коммутации |
| MSC | Mobile Switching Center | Центр коммутации мобильной связи |
| NMC | Network Management Center | Центр управления сетью |
| PSTN | Public Switched Telephone Network | Телефонная сеть общего пользования |
| RAN | Radio Access Network | Сеть наземного радиодоступа |
| RNC | Radio Network Controller | Контроллер управления радиосети |
| SGSN | Serving GPRS Support Node | Сервисный узел пакетного трафика |
| UE | User Equipment | Устройство пользователя |
| 1 | Radio Network | Область радиосети |
| 2 | Transmission Network | Область транспортной сети |

Рис. 4.2. Структура ССМС третьего поколения (UMTS)

Радиосеть является частью сети мобильной связи, которая включает в себя базовые станции, мобильные станции и взаимосвязь между ними [100]. Эта часть сети имеет особое значение, поскольку связана непосредственно с мобильными пользователями. Радиосеть должна быть в состоянии обеспечить пользователям необходимое покрытие, уровень мощности и должное качество связи.

Транспортная сеть включает в себя базовые станции, базовые контроллеры, центры коммутаций и обеспечивает взаимодействие между всеми этими узлами сети.

4.1.2. Задачи проектирования и оптимизации ССМС

Основные этапы построения и совершенствования современной сотовой сети мобильной связи [143] представлены на рис. 4.3.

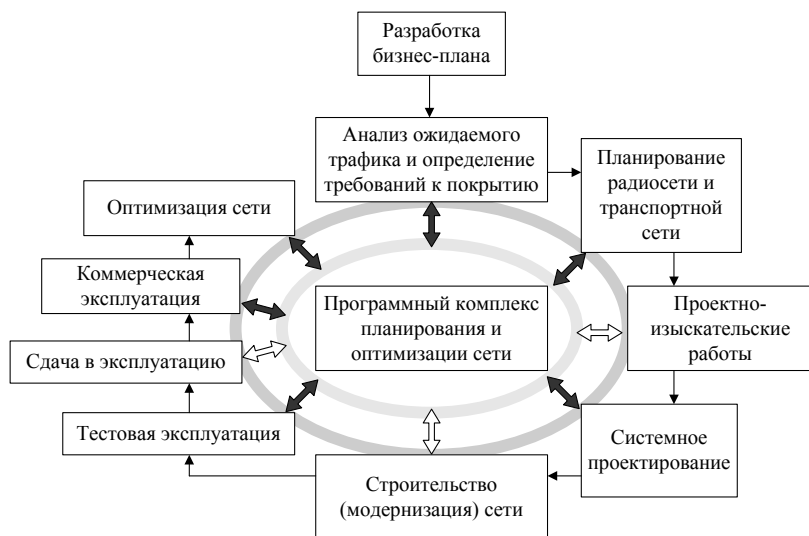


Рис. 4.3. Этапы построения сотовой сети мобильной связи

В процессе создания и совершенствования ССМС решаются две неразрывно связанные задачи: планирование сети и оптимизация сети (перепланирование по результатам эксплуатации с целью повышения эффективности сети).

Процесс планирования и проектирования ССМС

Целью проектирования является оптимальное построение сотовой сети мобильной связи по основному критерию: высокая эффективность — минимальная стоимость [100]. В связи с этим к задачам проектирования такой сети относят:

- определение мест установки базовых станций (BTS),
- распределение частотных каналов между сотами, то есть составление схемы повторного кластерного распределения частот в сотовой сети,
- определение числа пользователей по рассчитанному трафику,
- оптимизацию сотовой сети по минимальному числу сот (минимальной стоимости развертывания сети) и высокой надежности связи.

Естественно требования высокой эффективности и минимальной стоимости противоречивы: если чрезмерно увеличить число сот (то есть уменьшить размеры сот, создав микро- или пикосоты), то это увеличит надежность связи (то есть увеличит качество связи — заданное значение вероятности ошибки на бит), увеличит возможное число пользователей, уменьшит максимальные значения выходных мощностей мобильных станций на краях сот (то есть уменьшит уровень электромагнитного облучения пользователей), но все это приведет к тому, что увеличится стоимость развертывания сотовой сети и в определенной степени ее эксплуатация. В случае редкого расположения сот (малого их числа) при больших максимальных радиусах сот могут появиться «мертвые зоны», в которых невозможно обслуживание пользователей, возрастут мощности излучения мобильных телефонов на краях сот (увеличится уровень электромагнитного облучения пользователей). Так как технология и параметры сотовой сети существенно зависят от условий местности (рельефа, лесных массивов, застройки и т. п.), то при проектировании сотовой сети необходимо наличие:

- топографических карт местности со всеми параметрами и характеристиками (неровностей, лесных массивов, густоты застройки);
- характеристик намечаемой к использованию аппаратуры и результатов приближенной оценки энергетического баланса, а также результатов предварительного проектирования сот сети и мест расположения базовых станций (радиопокрытие территории);

- полученной схемы радиопокрытия территории с использованием соответствующих моделей распространения радиоволн и характеристик местности; при этом необходимо более точно рассчитать параметры электромагнитного поля в пределах обслуживаемой территории, позволяющие оценить качество радиопокрытия;

- составленного частотно-территориального плана (распределение частотных каналов по сотам в соответствии с принципом повторного использования частот) для ССМС 2G или кодово-территориального плана для ССМС 3G, а также оценок трафика и емкости для характерных участков, сот и сети в целом.

Если по каким-либо показателям (качеству радиопокрытия, трафику, емкости) составленная схема построения ССМС не удовлетворяет предъявленным к ней требованиям, производится повторная корректировка, и для уточненной схемы сети расчеты вновь повторяются. Также проводятся экспериментальные измерения уровней электромагнитного поля (обычно плотности потока мощ-

ности или напряженности электрического поля в различных точках от базовых станций) и по результатам измерений вновь корректируют схему ССМС. Окончательное качество проекта оценивается уже на этапе эксплуатации сети, где также необходимы корректировки и доработка сети. Особенно это относится к начальному этапу эксплуатации ССМС, когда реализуется настройка аппаратуры и оптимизация сети. Этот этап является наиболее трудоемким.

В процессе проектирования ССМС основными задачами являются:

- обеспечение радиопокрытия территории, на которой должны предоставляться пользователям услуги мобильной связи;
- построение ССМС, емкости которой будет достаточно для обслуживания создаваемого абонентами трафика с допустимым уровнем перегрузок;
- оптимизация решения указанных выше задач (с использованием минимального числа сетевых подсистем и элементов) на протяжении всего жизненного цикла ССМС.

Следует отметить, что на протяжении всего жизненного цикла ССМС число ее абонентов, объем трафика и его распределение по обслуживаемой территории постоянно изменяются. Кроме того, существуют сезонные изменения объема трафика и его территориального распределения. Конфигурация сотовой сети должна адаптироваться к происходящим изменениям. Поэтому проектирование сотовой сети является непрерывным процессом.

При проектировании ССМС должны быть выполнены следующие основные операции: оценка стоимости проектируемой сети; оценка емкости сети; оценка радиопокрытия и расположения элементов сотовой сети; оценка максимально допустимой плотности обслуживаемых абонентов; оценка количества вызовов; оценка будущего развития сети. До начала проектирования должна быть проведена подготовительная работа, а именно сбор информации по следующим разделам:

- правила и законы;
- ключевая информация относительно демографии, уровня доходов, прогноз расширения территории обслуживания, поддержка услуг, маркетинговые исследования и т.д.;
- номерные, адресные принципы и принципы маршрутизации;
- наличие арендованных линий связи, наличие рабочих диапазонов частот, требования соединений с другими системами;
- топографические карты;
- существующая инфраструктура.

Этапы планирования сотовой сети мобильной связи представлены на рис. 4.4.

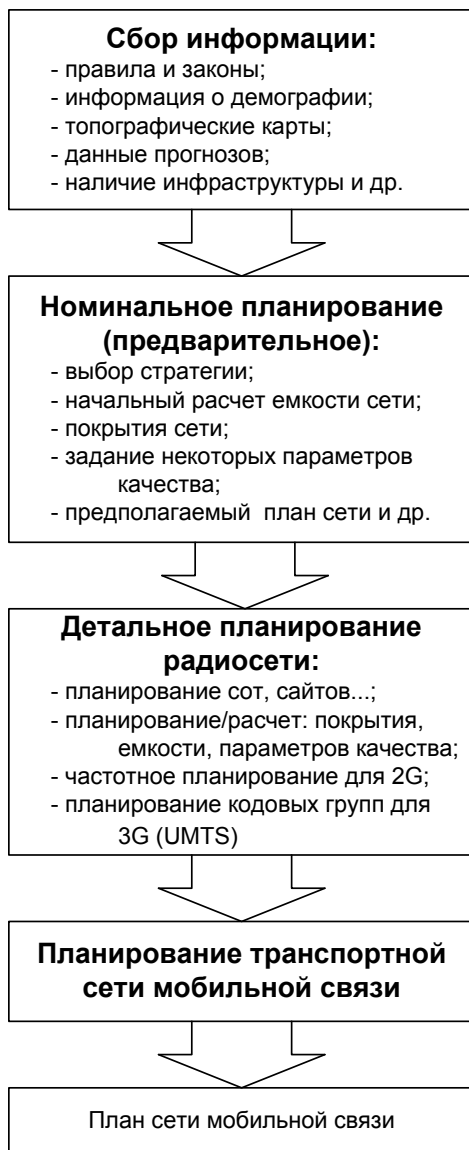


Рис. 4.4. Этапы планирования сотовой сети мобильной связи

Главными этапами самого процесса планирования сети являются следующие [100, 141]:

Этап номинального планирования (или предварительное планирование). На этом этапе определяются требуемые базовые параметры сети по радиопокрытию и емкости.

Главной проблемой этого этапа планирования является оптимизация сети по критерию стоимость — эффективность. Чтобы реализовать на практике эту задачу, необходимы детальная информация о сотовой сети (рост стоимости этапа плана, защита, имеющаяся в наличии, необходимая информационная инфраструктура), а также формулировка задач сети и требований к ее качеству. Результатом этого этапа является проект топологии интегрированной сети, в котором должны быть показаны различные услуги и требуемая для ее реализации аппаратура. Кроме того, должен быть представлен первоначальный развернутый план реализации сети. Главная цель номинального планирования — проиллюстрировать комплексный процесс планирования сети. На этом первом оценочном этапе проектирования ССМС реализуются приближенные оценки радиопокрытия зоны обслуживания, частотного распределения (по кластерам и сотам), трафика и числа возможных абонентов (в сотах и во всей сети).

Детальное планирование сотовой сети. Детальное планирование осуществляется на базе данных, полученных на этапе номинального планирования. На этапе детального планирования ССМС выполняются следующие операции:

- компьютерное проектирование сети и выбор аппаратных средств для создания необходимого радиопокрытия территории;
- анализ помех (сосканальных, внешних, шумов);
- частотное планирование;
- планирование радиоканалов;
- документирование и пр.

Кроме того, на этом этапе выполняется выбор оборудования для центра коммутации (MSC), базовых контроллеров (BSC) и базовых станций (BTS); мест расположения базовых станций и съемка местоположения для заданных MSC, BSC и BTS.

Этот этап включает планирование радиосети и системы коммутации сети.

Планировании радиосети. При планировании радиосети (RNP — Radio Network Planning) в ССМС определяется тип и точное месторасположение базовых станций, тип и размещение антенных систем, расчет зон покрытия и границ базовых станций с учетом

данных об абонентском трафике, а также оформляется детальный план сети, включающий результаты по предыдущему пункту, а также результаты измерений и тестирования радиопокрытия территории.

Тип и местоположение BTS зависят от характеристик окружающей среды. В условиях города соты обычно меньше по размерам, чем в сельской местности. Факторы, ограничивающие размеры сот: с ростом рабочей частоты, то есть с уменьшением рабочей длины волны, размер соты уменьшается; внешние условия: для открытых водных пространств затухание радиосигналов меньше, чем в лесных массивах или в городских условиях. Кроме того, объем трафика также влияет на число радиоканалов в обычной соте.

Планирования системы коммутации сети. В процессе планирования системы коммутации сети (SNP — Switching Network Planning) должны быть решены следующие задачи:

- путем измерений и учета необходимой емкости сети (среднего времени разговоров, числа хэндоверов, передач коротких сообщений и др.) оценивается объем переключений;
- устанавливается уровень сетевого исполнения в соответствии с заданной коммутационной емкостью сети;
- рассматривается реализация систем коммутации и сигнализации сети;
- отрабатываются правила для маршрутизации, защиты, синхронизации и управления коммутацией;
- определяются матрицы речевого и сигнального трафика;
- выбирается необходимая аппаратура для реализации вышеприведенных задач.

После этого выполняется детальный план с выбранным числом входов (например, схема сети, план маршрутизации, цифровой анализ, детали управления, план нумерации, план загрузки и др.). Кроме того, при планировании системы коммутации сети, помимо выполнения вышеперечисленных задач, рассматривается возможность будущего расширения плана сети.

Планирование транспортной сети (CTNP — Cellular Transmission Network Planning). На этом этапе главной задачей является разработка структуры (топологии) сети, обеспечивающей взаимодействие между всеми узлами сети (базовыми станциями, базовыми контролерами, центром коммутации).

При планировании сотовой сети передачи главной проблемой является проработка использования радиолиний или волоконно-оптических линий связи в проектируемой сети, обеспечивающих

взаимодействие между BTS и BSC. Возможны несколько путей планирования:

- установка собственных ретрансляционных линий связи (радиорелейных линий связи);
- аренда уже существующих радиорелейных линий, вписывающихся по местоположению и условиям устойчивой радиосвязи в разрабатываемую сотовую сеть;
- прокладка волоконно-оптических линий связи.

При выполнении данного пункта планирования сети необходимо учесть проблему соединения и координации больших потоков различной информации. На данном этапе необходимо разработать схему главной передающей сети для доступа BTS и сетевые узлы, что позволит получить четкое изображение сетевых соединений. Это также необходимо для определения требуемой емкости сети.

Как принципы синхронизации, так и шлюзовые и коммутирующие соединения должны быть идентифицированы. При планировании каналов связи необходимо выбрать высоконадежные широкополосные каналы, позволяющие обеспечить надежную связь между BTS и BSC. Кроме того, в сотовой сети вместо радиорелейных могут быть использованы волоконно-оптические каналы.

4. Выделяют также другие этапы планирования:

- FTP (Fixed Transmission Planning) — планирование фиксированной передачи;
- NAP (Network Access Planning) — планирование сетевого доступа;
- DCN (Data Communication Network Planning) — планирование сети передачи данных;
- INP (Intelligent Network Planning) — планирование интеллектуальной сети;
- 3G и IP Network Planning — планирование развития сотовой системы третьего поколения (3G), использования сетевых протоколов IP и т.д., что должно быть включено в полный процесс проектирования сотовой сети [116].

Оптимизация и развитие ССМС

Планирование сети, описанное выше, является лишь первой частью длительного процесса проектирования создаваемой ССМС. При дальнейшем совершенствовании спроектированной сотовой сети необходимо учитывать следующие факторы.

1. Увеличение числа абонентов требует расширения сети в данном месте и в данный период времени.

2. Учет стоимости сети для любого оператора является конкурентно-образующим параметром на рынке услуг мобильной связи.

3. Емкость сети, с одной стороны, необходимо минимизировать (обеспечивать необходимый трафик), а с другой, она не должна быть малой величиной, так как это ухудшит качество обслуживания (grade of service) абонентов.

То есть существуют противоречивые требования:

- сеть должна обладать высоким качеством и иметь широкое радиопокрытие;

- но в то же время для уменьшения стоимости сеть не должна быть избыточной.

4. Необходимость обеспечения качества услуг (quality of services) связана с требованиями уменьшения помех в радиоинтерфейсе и уменьшения числа вызывных сигналов в единицу времени при обеспечении оптимальной стоимости.

5. Для основных и дополнительных услуг настоящие и будущие требования должны быть удовлетворены.

В настоящее время большие капиталовложения реализуются в направлении использования высокоскоростных сетей передачи данных, к которым относятся:

- высокоскоростные цепи коммутации данных (HSCSD — High Speed Circuit Switched Data);

- общая служба пакетной радиопередачи (GPRS);

- улучшенная передача данных для GSM сетей (EDGE);

- синхронная цифровая иерархия SDH (использующая волоконно-оптические линии связи между узлами в сотовой сети) и т.д.

Главной причиной внедрения высокоскоростных систем передачи данных является рост числа пользователей и связанный с ним рост трафика и объема разнообразных услуг в сотовых сетях мобильной связи.

Поэтому для оптимизации и развития ССМС следует:

- 1) проводить полевые испытания созданной сети (достаточно дорогостоящие), которые позволили бы уточнить качество передачи информации и аппаратные проблемы, а также возможности сжатия (gathering) информации, увеличения числа пользователей при неизменной структуре и аппаратном обеспечении сети и т.п.

- 2) использовать информацию, которая получена в центре управления сетью, по оценке условий географического радиопокрытия (station map), по уровню мощности BTS (serving BTS), по уровням излучений соседних станций (neighbor stations).

Данная информация позволяет реализовать управление эксплуатационными характеристиками сети из центра управления сетью, получить важную информацию о работоспособности различных частей сотовой сети, что в конечном счете определяет возможные альтернативные решения для оператора сети.

Оптимизация сети предполагает анализ данных верификации (проверки соответствия результатов планирования параметрам существующей сети) и мониторинга, анализ проблем, выявленных при эксплуатации сети (жалоб клиентов, данных об отказах и ремонтах сети), выбор параметров и критериев оптимизации, изменение (регулирование) параметров, анализ полученных результатов на основе повторного мониторинга. Оптимизация отличается от планирования тем, что она:

1) выполняется при разработанном частотно-территориальном покрытии;

2) основывается на результатах проведенных тест-драйвов и технического аудита параметров сети в проблемных зонах обслуживания.

Целями оптимизации сотовой сети мобильной связи являются:

– повышение эффективности использования сетевых и радиоресурсов;

– обеспечения равномерного распределения нагрузки в сети;

– улучшение параметров качества услуг связи.

Этапы процесса оптимизации сотовой сети мобильной связи [143] представлены на рис. 4.5.



Рис. 4.5. Этапы оптимизации ССМС

Верификация предусматривает контроль следующих основных данных:

- координат размещения базовых станций;
- зоны обслуживания базовых станций;
- зоны хэндоверов;
- списков частот для сот;
- типов и параметров приемопередатчиков базовых станций (мощность излучения, чувствительность);
- типов и параметров антенн (коэффициента усиления, диаграмма направленности);
- числа приемопередатчиков на антенну;
- координат размещения антенн;
- параметров размещения антенн (углов наклона, азимутов, высоты установки, характеристик антенно-фидерного устройства).

Мониторинг сети выполняется с помощью специального измерительного аппаратно-программного комплекса и позволяет оценить радиопокрытие и параметры качества функционирования сети для проверки их соответствия результатам детального планирования и выявления проблемных участков («узких мест»).

Оптимизация предполагает различные виды перепланирования сети на основе данных, полученных в результате верификации и мониторинга [100, 128]. При этом параметры сети изменяются (оптимизируются) в соответствии с выбранными задачами и критериями. Например, задачами оптимизации могут быть:

- перераспределение трафика сети;
- повышение эффективности использования радиочастотного спектра за счет частотно-территориального перепланирования;
- минимизация потерь покрытия в зонах обслуживания из-за влияния интерференционных помех;
- увеличение зоны обслуживания;
- улучшение параметров хэндоверов;
- повышение качества отдельных или совокупности услуг;
- использование совмещенных стандартов в сети и т.д.

Следует отметить, что необходимость перепланирования сети зависит от качества проектных решений, которые были получены на этапах номинального и детального планирования ССМС.

4.1.3. Анализ методов планирования ССМС

В процессе частотно-территориального планирования ССМС определяют места установки базовых станций и распределение вы-

деленных частотных каналов между сотами в соответствии с принципом повторного использования частот. Результатом планирования является территориально-частотный план, обеспечивающий наиболее полный охват зоны, в которой планируется работа рассматриваемой ССМС. От эффективности процесса частотно-территориального планирования существенно зависит качество обслуживания абонентов, надежность системы, стоимость её инфраструктуры и т. п.

Анализ существующих методов территориально-частотного планирования сетей подвижной связи позволяет ввести следующую их классификацию:

- метод, базирующийся на теории однородных сетей передатчиков (ТОСП) [39, 112];
- метод, базирующийся на теории графов [112];
- метод, описанный М. А. Быховским [55, 58, 112, 129, 170];
- компьютерные методы планирования [64, 71, 112].

В результате планирования методом однородных сетей получается сеть BTS, в которой ближайшие передатчики, работающие в совмещенном канале, являются узловыми точками геометрически правильной сетки на поверхности Земли. Реальные сети передатчиков не имеют правильной геометрической формы, а технические характеристики передатчиков не соответствуют характеристикам, определенным в теоретической сети. Отклонения от геометрически правильной структуры, теоретических значений мощностей и высот антенн снижают эффективность планирования методом однородных сетей. Практическая цель ТОСП, разработанной в Институте радиовещательной техники (Гамбург, Германия), состояла в обеспечении эффективного использования радиочастотного спектра при присвоении частот (частотных каналов) передатчикам систем радиовещания и телевидения [87].

При частотно-территориальном планировании сетей радиосвязи часто используется **метод, базирующийся на теории графов**. В этом случае сеть радиовещания моделируется в виде графа, множество вершин которого однозначно соответствует множеству передающих станций. Ребрами соединяются те вершины, соответствующие станции которых могут создавать в зонах обслуживания друг друга недопустимые помехи. Множество выделенных для назначения частотных каналов представляется в виде совокупности цветов. В этом методе, задача территориально-частотного планирования сети радиосвязи сведена к эквивалентной обобщенной задаче раскраски графа, ограниченной некоторым узким подклассом класса

всех графов — реберно-ограниченных графов, называемых дисковыми. Результаты, полученные относительно вычислительной сложности задачи раскраски графов, показывают, что некоторые их подзадачи имеют решения с полиномиальным временем [87]. Однако известные решения подзадач территориально-частотного планирования систем подвижной связи методами теории графов ограничиваются лишь частными вариантами, которые могут иметь место на практике.

Методы частотно-территориального планирования, о которых шла речь выше, разрабатывались в первую очередь для применений в радиосетях телевизионного и звукового вещания. В отличие от них третий метод, описанный М. А. Быховским, разработан исключительно в целях планирования ССМС [55, 112]. Метод дает возможность определить параметры, необходимые для составления предварительного частотно-территориального плана, который не может быть применен для местности, где территория или распределение абонентов являются неоднородными. Параметры, которые определяются в процессе планирования [55], соответствуют заданному качеству передачи, выраженному процентом времени, в течение которого допускается, чтобы отношение сигнал/помеха (ОСП) на входе приемников мобильных или базовых станций было меньше допустимого значения. Метод учитывает, что помехи на входе приемника MS (BTS) создают BTS (MS), работающие в совмещенном частотном канале. При этом вводятся упрощающие предположения относительно вероятностных законов распределения этих помех. В методе Быховского учитываются медленные замирания сигналов и помех, но, к сожалению, не учитывается, что помехи по совмещенному каналу испытывают флуктуации из-за многолучевого распространения, отчего их огибающие, подобно сигналу, подчиняются четырех параметрическому распределению [87].

Реальное планирование ССМС невозможно без использования компьютерной техники и специальных программных продуктов [64, 112, 128]. Целесообразность использования компьютера обусловлена необходимостью представления и обработки больших объемов пространственно-координированной информации в процессе планирования. Появление в начале 90-х годов геоинформационных систем (ГИС), обеспечивающих сбор, хранение, обработку, доступ и отображение пространственных данных [128], стимулировало развитие компьютерных методов планирования. Современные компонентные технологии программных средств позволяют организовать компьютерную систему планирования на основе отдель-

ных программных компонентов, организованных вокруг ядра-ГИС и взаимодействующих через стандартизованный абстрактный интерфейс. В настоящее время программные методы планирования представляют особую важность, поэтому применяемые программные продукты будут подробно рассмотрены в следующем подразделе.

Кроме рассмотренных выше методов частотно-территориального планирования, существуют методы планирования покрытия зон обслуживания. Обслуживаемую территорию можно разделить на зоны двумя способами [116, 129, 170]:

- статистический метод, основанный на использовании статистических параметров распространения сигналов в системах связи;
- детерминированный метод, основанный на непосредственном измерении или расчете параметров распределения сигналов для конкретного района.

При **статистическом методе** всю обслуживаемую территорию разделяют на одинаковые по форме зоны и с помощью статистических законов распространения радиоволн определяют допустимые размеры этих зон, а также расстояния между зонами, в пределах которых выполняются условия допустимого взаимного влияния.

Детерминированный метод разделения рабочей области на зоны является оптимальным, т.к. он предполагает тщательное измерение или расчет параметров системы для определения минимального числа базовых станций, обеспечивающих удовлетворительное обслуживание абонентов на всей территории. При этом способе учитываются рельеф местности для оптимального выбора места расположения BTS, возможность использования направленных антенн, пассивных ретрансляторов, а также смежных BTS в моменты пиковой нагрузки и т. д. Однако этот способ является достаточно сложным и требует применения сложного моделирования и использования специальных программных продуктов [129, 170].

4.1.4. Обзор программных комплексов планирования сетей радиосвязи

Основные этапы построения и совершенствования современной ССМС в настоящее время невозможны без использования специальных программных комплексов. Программные комплексы используются на этапе детального планирования ССМС.

С целью обеспечить качественные услуги сотовой связи, ведущие операторы применяют методы математического и компьютерного

моделирования. При этом основным препятствием является трудность формализации исходных данных для формирования универсальной пространственно-временной модели условий функционирования сети [128].

Наиболее эффективным инструментом автоматизации процесса планирования ССМС являются геоинформационные технологии (ГИС-технологии), прошедшие в своем развитии путь от узкоспециализированных способов и методов обработки цифровой картографической информации до высокоразвитых программных средств, называемых геоинформационными системами. ГИС-технологии представляют собой совокупность средств и методов обработки данных, имеющих пространственный аспект и обеспечивающих получение информации в требуемом виде.

Специальные ГИС состоят из программного и информационного компонентов. Программный компонент содержит сервисные и расчетные программы для ввода пространственных и описательных данных, их обработки и вывода результатов; информационный компонент — электронную (цифровую) карту местности и объектно-ориентированную базу данных, содержащую сведения по всем существенным аспектам проектируемой сети сотовой связи.

ГИС-технологии позволяют формировать модели с учетом реальных пространственно-распределенных параметров среды функционирования, внешних и внутренних воздействий. Данные модели являются адекватными окружающей обстановке и обеспечивают получение более достоверной оценки, чем усредненно-статистические.

Примером реализации ГИС-технологий для решения прикладных задач в области телекоммуникаций являются программные комплексы (ПК) планирования ССМС.

Они используют цифровую карту местности как основу для проведения необходимых расчетов, содержат пополняемую базу данных с характеристиками антенн, передатчиков и приемников, отображают на экране схему размещения радиосети с возможностью редактирования ее элементов, позволяют проводить необходимые расчеты (уровень принимаемого сигнала, профиль радиотрассы и т.д.) с возможностью сохранения и печати результатов.

Наиболее известны программные комплексы [87], которые представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Программные продукты планирования ССМС

| Страна | Город | Фирма | Программный продукт | Основные возможности |
|----------------|--------------------------|------------|----------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Швеция | Стокгольм | Ericsson | TEMS CellPlanner Universal | Радиочастотное планирование |
| | | | TEMS Link-Planner | Планирование радиорелейных интервалов |
| | | | Planet EV | Планирование и оптимизация радиорелейных сетей |
| Франция | Париж | Alcatel | Alcatel 955 | Планирование радиосетей |
| | Бланьяк, Верхняя Гаронна | Forsk | Atoll Core | ПК радиочастотного планирования и расчета радиорелейных интервалов |
| Великобритания | | AIRCOM Int | ASSET Enterprise | Включает следующие модули: |
| | | | ASSET3G | Радиопланирования |
| | | | ILSA | Автоматизированного распределения частот |
| | | | CONNECT | Планирование радиорелейных интервалов |
| | | | DIRECT | Планирования транспортной сети |
| | | | ADVANTEG | Автоматизированного планирования сот |
| Финляндия | Эспоо | Nokia | Nokia NetAct Planner | Радиочастотное планирование, расчет покрытия и интервалов радиорелейной связи |

Продолжение табл. 4.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|-------------------------|----------------------|---|--|
| США | Санта-Клара, Калифорния | Agilent Technologies | WIZARD | Радиопланирование |
| | | | CellOpt AFP | Радиочастотное планирование |
| | | | CellOpt ACP | Планирование сот |
| | | | OPAS32 | Сетевой анализатор |
| | Сан-Диего, Калифорния | Qualcomm | QEDesign | Многофункциональный ПК радиочастотного планирования |
| | LCC International | CellCAD II | Расчет радиопокрытия, оценка ЭМС BTS, планирование емкости и частотное планирование | |
| Норвегия | | LCC Europe AS | CellAD System 7 | Система измерения и анализа характеристик радиосети GSM |
| Россия | Санкт-Петербург | ЛОНИИР | Балтика | Радиочастотное планирование ССМС |
| | | ИнфоТел | ONEPLAN RPLS | Планирование сотовых сетей мобильной связи |
| | Зеленоград | Силикон Телеком Софт | RPS-2 | Расчет покрытия сети сотовой связи и радиорелейных интервалов. |

Операторы связи используют ПК как импортного, так и отечественного производства.

Исходными данными для проектирования сети сотовой связи, являются общие данные: стандарт; число и частоты разрешенных радиоканалов; требуемая емкость; план сети с указанием возможных пунктов размещения BTS. Используются также географическая карта в цифровом виде, карта типов местности и застройки,

карта рек и водоемов, карта автомагистралей, карта рельефа местности и др.

Эти программные комплексы позволяют:

- размещать базовые станции в заданном месте рассматриваемой территории;
- редактировать карту путем добавления пользователем отдельных препятствий из имеющегося списка;
- анализировать системы, работающие в любом из известных стандартов, выбирая из предлагаемого списка;
- определять для радиостанций состав оборудования из базы данных, которая может пополняться и редактироваться пользователем;
- задавать и редактировать распределение плотности трафика в рассматриваемом регионе (для систем радиодоступа, сотовых и транкинговых систем), что позволяет анализировать характеристики системы в условиях различной ее загрузки;
- рассчитывать, отображать на экране и выдавать на печать основные характеристики анализируемой сети;
- оптимизировать параметры планируемой сети путем изменения местоположения радиостанций, а также варьируя состав и технические характеристики размещаемого на них оборудования;
- анализировать показатели электромагнитной совместимости планируемой сети; для решения этой задачи программа рассчитывает помехи от всех расположенных в рассматриваемом регионе передатчиков, а в случае, если несколько передатчиков находится в одном месте, выдает предупреждение о возможных интермодуляционных помехах третьего или пятого порядка;
- отображать результаты измерений уровня принимаемого сигнала и сравнивать их с результатами расчета,
- готовить итоговую документацию о проекте в текстовой и графической формах.

Разрабатываемый при этом проект радиосети может быть как совершенно новым, так и являться развитием уже действующей в данном регионе сети радиосвязи.

Сравнительный анализ программных комплексов, приводит к выводу о примерно одинаковых возможностях этих программ по функциональным возможностям и достигаемой точности вычислений.

Следует отметить, что указанные процедуры планирования выполняются, как правило, для уже заданного предварительно проекта сети радиосвязи, который получается на этапе номинального планирования.

Необходимо отметить, что описание всех компьютерных средств планирования ССМС, имеющееся на Интернет-сайтах разработчиков, ограничивается перечислением их возможностей. Методика планирования, положенная в основу этих средств, как правило, не излагается. Отсутствует, также, анализ модулей, участвующих в расчете частотно-территориального планирования, сравнительная характеристика средств, не исследованы вопросы эффективности планирования.

Анализ возможностей современных компьютерных средств планирования показывает, что их работа сосредотачивается в основном на определении характеристик подсистемы BTS: географических координат BTS; типа, ориентации и высоты подвеса антенны BTS; мощности передатчика BTS. При этом можно выделить следующие фазы планирования:

- определения «размеров» системы [64, 77], включающего в себя выбор ССМС и расчеты бюджета радиолинии, радиуса зоны BTS, канальной емкости, стоимости создания ССМС. Данная фаза планирования реализуется обычно без учета географической информации. Главными параметрами в расчетах бюджета радиолинии являются мощность передатчика и интервал повторного использования частот. Эти параметры определяются для заданного качества передачи, выраженного: отношением сигнал/помеха; процентом времени, в течение которого допускается, чтобы ОСП на входе приемника станции сотовой подвижной связи было меньше защитного отношения; вероятностью ошибки на бит в цифровых ССМС;

- размещения оборудования BTS с использованием электронной карты города и расчета радиопокрытия для отдельных BTS, их групп и системы в целом. Здесь, как правило, существует возможность изменения конфигурации и параметров BTS (типа, ориентации секторов и высот подвеса антенн, мощности передатчиков) и выбора одной из нескольких моделей распространения радиоволн, обеспечивающей необходимую точность расчетов в конкретной ситуации. Решение об удовлетворительности (или неудовлетворительности) карты радиопокрытия принимается группой экспертов. В случае недостаточности радиопокрытия фаза повторяется для нового расположения BTS;

- частотного присвоения отдельных номиналов и групп частот конкретным BTS. Назначение частот выполняется, как правило, в ручном режиме с привлечением критерия минимума внутриканальных наложений сигналов. Количество частот, выделенных одной BTS, определяется с учетом допустимой вероятности блоки-

рования вызовов и демографических данных о распределении абонентов на территории. Все компьютерные средства планирования используют для расчета допустимой вероятности блокирования вызовов формулу Эрланга [128];

– анализа результатов планирования. В некоторых компьютерных средствах в этой фазе рассчитываются параметры качества обслуживания мобильных абонентов. Согласно определению МСЭ (международного союза электросвязи), под качеством обслуживания понимают «совокупный эффект от предоставления услуг, который определяет степень удовлетворения ими абонента». Кроме технических аспектов качества работы ССМС в это определение включены и аспекты, связанные с предоставлением дополнительных услуг (например, таких, как передача коротких сообщений), со стоимостью обслуживания, ценой и качеством работы MS и т.д.

При оценке результатов территориально-частотного планирования ССМС для анализа технических аспектов качества ее работы МСЭ рекомендует использовать следующие основные параметры: вероятность блокирования вызова из-за недостатка ресурсов системы; вероятность разрыва соединения из-за неуспешной попытки межсотового переключения связи; интервал времени между передачей запроса на установление соединения вызывающей MS и окончанием процедуры установления соединения; интервал времени между передачей MS запроса на разъединение соединения и получением ею подтверждения о разъединении. Эти параметры непосредственно влияют на степень удовлетворения абонента работой ССМС.

Однако в указанных компьютерных средствах планирования рассчитывается ограниченное количество параметров качества обслуживания. В основном — это вероятность блокирования вызова из-за недостатка ресурсов ССМС и вероятность разрыва соединения из-за неуспешной попытки межсотового переключения [64, 77].

В случае, когда оценки качества обслуживания мобильных абонентов представляются экспертам неудовлетворительными, планирование может быть возвращено на любую из вышеуказанных фаз планирования.

Реализация всех четырех фаз планирования ССМС требует большого времени и задействует значительные ресурсы вычислительной техники, поскольку оптимизация ССМС выполняется в каждой фазе процесса планирования путем возврата к прошедшим фазам и полного пересчета новой конфигурации ССМС. Отсутствие общей за-

дачи оптимизации ССМС, решение частных задач оптимизации путем возврата к предыдущим фазам проектирования является недостатком рассмотренного подхода к проектированию ССМС.

4.1.5. Актуальность задач многокритериального выбора проектных решений при планировании ССМС

Как показал анализ литературы в области применения методов оптимизации при планировании ССМС, эти вопросы детально рассмотрены в основном в зарубежной литературе [79, 85, 100, 101, 120, 121, 123, 141, 144, 147]. Ряд вопросов по оптимизации при планировании ССМС изложен также в русскоязычных и украиноязычных изданиях [75, 87, 134, 163, 170], однако, в основном, с использованием переводных материалов зарубежных изданий. Методы оптимизации широко применяются при построении и эксплуатации систем связи [85, 100, 101, 120, 121, 123, 141, 144]. В области телекоммуникаций известны случаи применения методов многокритериальной оптимизации [3, 33, 35, 76, 98, 107, 145, 151–153, 157, 177, 185], в частности, для стратегического управления телекоммуникационными сетями [76, 107, 151], при передаче данных [978], при построении мультисервисных сетей связи [145, 152, 157]. Однако отсутствуют сведения по применению методов многокритериальной оптимизации при планировании сотовых сетей мобильной связи.

Результаты номинального планирования ССМС существенно влияют на результаты последующего этапа детального планирования, проектные решения которого в конечном итоге реализуются в виде действующих ССМС. Следует отметить, что затем в процессе эксплуатации ССМС постоянно осуществляется их мониторинг с целью контроля соответствия качества работы сети совокупности установленных технико-экономических требований к ССМС. В случае несоответствия выполняется перепланирование сети, которое называется послепусковой оптимизацией. При этом количество таких перепланирований существенно зависит от качества проектных решений, которые получены в результате номинального и детального планирования ССМС.

При этом следует отметить, что задачи как номинального, так и детального планирования ССМС не решались как оптимизационные задачи, к тому же с учетом совокупности показателей качества. Тем самым не гарантировалось достижение потенциальных наилучших характеристик получаемых проектных решений. Послему-

сковая оптимизация ССМС и их перепланирование также не ставилась как оптимизационная задача с учетом на формализованном уровне совокупности показателей качества, определяющих противоречивые технико-экономические требования к ССМС.

Таким образом, анализ состояния в области планирования и оптимизации сетей мобильной связи показывает, что процесс оптимизации ССМС производится, как правило, после этапа планирования, а именно, на послепусковом этапе — в процессе эксплуатации сети. Кроме того, при планировании ССМС строго не учитывается совокупность противоречивых показателей качества. Поэтому возникает необходимость решения актуальной научно-прикладной задачи — многокритериальной оптимизации проектных решений при планировании ССМС с учетом совокупности показателей качества. Это дает возможность строго учесть на формализованном уровне противоречивые технико-экономические требования при выборе оптимальных проектных вариантов на этапе планирования ССМС, а также исключить безусловно худшие варианты построения сетей и уменьшить число перепланировок в процессе эксплуатации ССМС. Кроме того появляется возможность оценить многомерные потенциальные характеристики ССМС и многомерные диаграммы обмена противоречивых показателей качества.

Отсюда вытекает актуальность задачи планирования и оптимизации ССМС с учетом совокупности показателей качества. Строгий учет на формализованном уровне совокупности противоречивых показателей качества при выборе оптимальных проектных решений на этапе планирования ССМС может обеспечить применение основных положений теории многокритериальной оптимизации.

Это определяет актуальность исследований направленных на решение актуальной научно-прикладной задачи — планирования и оптимизации сотовых сетей мобильной связи с учетом совокупности показателей качества, в частности, на этапах номинального планирования и планирования транспортных сетей мобильной связи. При этом необходимо использовать методы многокритериальной оптимизации, позволяющих решить эту задачу с учетом противоречивых показателей качества. Это даст возможность строго учесть на формализованном уровне совокупность противоречивых технико-экономических требований к ССМС, а также исключить безусловно худшие варианты построения сотовой сети мобильной связи и уменьшить число перепланировок в процессе эксплуатации ССМС. Кроме того, появляется возможность оценить много-

мерные потенциальные характеристики (МПХ) сетей и многомерные диаграммы обмена (МДО) показателей качества.

При решении указанной задачи в данной работе рассмотрены следующие вопросы:

- обоснование методов многокритериальной оптимизации для многокритериального выбора оптимальных проектных решения при планировании ССМС;

- рассмотрение теоретических и практических особенностей решения задач планирования радиосети и транспортной сети мобильной связи с использованием методов многокритериальной оптимизации;

- создание программного комплекса выбора оптимальных проектных вариантов ССМС с учетом совокупности показателей качества;

- выработка рекомендаций по практической реализации методов и программного комплекса при планировании ССМС.

4.2. Особенности номинального планирования ССМС

4.2.1. Анализ особенностей этапа номинального планирования ССМС второго и третьего поколения

Номинальный этап планирования охватывает не всю сотовую сеть мобильной связи, а только область радиосети, представленную на рис. 4.1 (1) и 4.2 (1).

Номинальное планирование — определение требуемых базовых параметров сети по радиопокрытию и емкости. В результате этого этапа планирования должен быть представлен первоначальный развернутый план реализации сети. Для сетей второго поколения на этом этапе реализуются приближенные оценки радиопокрытия зоны обслуживания, частотного распределения (по кластерам и сотам), трафика и числа возможных абонентов в сотовой сети мобильной связи.

Целью данного этапа планирования является определение числа станций (сот), их приблизительного расположения на местности и радиотехнических параметров для обеспечения радиопокрытия заданной территории с учетом технико-экономических требований.

Планировать емкость ССМС на этом этапе сложнее всего, когда еще не накоплены сведения о работе сети за достаточно продолжительный промежуток времени, что необходимо для более точного

прогнозирования объема трафика с учетом его территориального распределения.

Фундаментальный принцип построения ССМС второго поколения — это многократное использование одного и того же частотного канала в разных сотах, что позволяет экономно использовать частотный спектр и строить сети с очень большой емкостью, в которых плотность обслуживаемого трафика достигает 100 Эрл/км² и более. Тем не менее, в ряде стран мира из-за очень высокой плотности трафика в действующих сетях GSM обеспечение высокого качества их работы является сложной задачей. Для ее решения существуют специальные технологии, которые значительно повышают эффективность использования частотного спектра.

Частотное планирование решает задачи определения номеров частотных каналов для каждого приемопередатчика в сети (частотный план) и максимизации емкости сети при ограниченном частотном ресурсе, допустимом уровне внутрисетевых помех (сосканальных, по соседнему каналу и др.) и требуемом качестве работы сети BTS.

Необходимо подчеркнуть важность номинального планирования, поскольку полученный на этом этапе первоначальный план существенно влияет на результаты планирования сети в целом и число перепланирований уже действующей ССМС может быть уменьшено за счет многокритериальной оптимизации этапа номинального планирования.

При этом количество таких перепланирований существенно зависит от качества проектных решений, которые получены в результате номинального и детального планирования ССМС.

Особенности планирования ССМС третьего поколения в основном рассмотрены в работах зарубежных авторов [79, 100, 101, 120, 121, 123, 141, 144, 147]. Номинальное планирование ССМС третьего поколения также связано с выбором стратегии — заданием ключевых параметров сети, таких как покрытие (Coverage), емкость (Capacity) и др. Кроме этого, на этапе номинального планирования оценивают: компоновку сети и предполагаемое размещение элементов сети радиодоступа; количество базовых станций, необходимое для выбранного покрытия. Как правило, на этапе номинального планирования используют гипотетические данные о параметрах и инфраструктуре сети, которые уточняются на следующем этапе — этапе детального планирования.

На этапе номинального планирования определяется размах сети: оцениваются приблизительное число зон (сайтов) размещения ба-

зовых станций, возможности базовых станций и их конфигурация и другие элементы сети с учетом требований оператора и распространения радиоволн в этой зоне. При определении размаха сети следует выполнять требования оператора к зоне обслуживания, емкости и качеству обслуживания. Емкость и качество обслуживания тесно связаны в сетях WCDMA, и поэтому оба параметра должны учитываться одновременно при выборе размеров таких сетей.

Определение размаха радиосети WCDMA — это процесс, с помощью которого производится оценка возможных конфигураций и количества сетевого оборудования на основании требований оператора, связанных со следующими параметрами:

- территория (зоны обслуживания, информация о типах зон, условия распространения);
- емкость (располагаемый спектр частот, прогнозирование роста числа абонентов, информация об интенсивности трафика);
- качество обслуживания (вероятностное расположение зон (вероятная зона обслуживания), вероятность блокировки, прямое соединение конечного пользователя).

В оценку размаха входят анализ ресурса радиолинии и зоны обслуживания, оценка емкости и, в конечном итоге, оценка количества сайтов и аппаратных средств базовых станций, контроллеров радиосети (RNC), оборудования для различных интерфейсов и элементов базовой сети (т.е. базовых элементов сети с коммутацией каналов и элементов сети с коммутацией пакетов).

Эффективная зона обслуживания WCDMA определяется по средней площади (участка) сайта на узел в $\text{км}^2/\text{сайт}$ для заранее определенных стандартной среды распространения и поддерживаемой плотности трафика.

Как видно, этапы номинального планирования ССМС второго и третьего поколений практически идентичны. Отличия появляются в процессе детального планирования, поскольку для сетей третьего поколения особую важность имеет оценка помех. В WCDMA все пользователи совместно используют одни и те же ресурсы помех в воздушном интерфейсе и не могут анализироваться независимо. Каждый пользователь влияет на других и заставляет их мощности передачи изменяться. Кроме того, используемые скорости передвижения, профили многолучевых каналов, битовые скорости и виды обслуживания играют более важную роль, чем в системах 2-го поколения с TDMA/FDMA. К тому же, в WCDMA включаются быстрое управление мощностью в обоих – в восходящем и нисходящем – каналах, мягкий/полумягкий хэндовер и ортогональные

нисходящие каналы, которые также влияют на работу сети. Главное различие в прогнозировании зоны обслуживания между WCDMA и TDMA/FDMA заключается в том, что оценка помех является решающим фактором на этапе прогнозирования зоны обслуживания в WCDMA. В текущих используемых в настоящее время процессах планирования GSM чувствительность BS считается, как правило, постоянной, и порог зоны обслуживания один и тот же для каждой BS. В случае WCDMA чувствительность BS зависит от числа пользователей и используемых битовых скоростей во всех ячейках, т. е. это специфика ячейки и обслуживания. Кроме того, что в сетях 3-го поколения нисходящий канал можно нагружать больше, чем восходящий, либо наоборот.

В системах 2-го поколения детальное планирование касается, в основном, планирования зоны обслуживания. В системах же 3-го поколения необходимо иметь более детализированное полное планирование помех и анализ пропускной способности, чем это достигается простой оптимизацией зоны обслуживания.

4.2.2. Расчет основных параметров ССМС

При проектировании ССМС для разработки номинального плана сети часть параметров сети (исходные данные) задаются заказчиками, а остальные рассчитываются в соответствии с используемой методикой расчета.

На этапе номинального планирования необходимо использовать следующие исходные данные (задающиеся параметры):

- S_0 — площадь обслуживаемой территории, км²;
- β — активность одного абонента в час наибольшей нагрузки, Эрл;

- N_a — число обслуживаемых абонентов;
- ΔF_C — полоса частот базовых станций на передачу, МГц;
- P_i — допустимая вероятность блокирования вызова;
- p_i — процент времени, в течение которого допускается, чтобы отношение сигнал/помеха на входе приемника MS было меньше защитного отношения;

- h_{BTS} — высота подвеса антенны базовой станции, м;
- G_{BTS} — коэффициент усиления антенны базовой станции, дБ;
- P_{BTS} — мощность передатчика базовой станции, Вт;
- k — параметр затухания радиоволн.

К рассчитываемым параметрам относятся следующие:

- C — размерность кластера (для сетей второго поколения);

- N_k — общее количество частотных каналов в сети;
- n_s — количество каналов в одном секторе соты;
- A — допустимая телефонная нагрузка;
- N_{aBTS} — число абонентов, обслуживаемых одной BTS;
- N_{BTS} — необходимое количество базовых станций;
- R — радиус соты;
- $P_{\text{ом}}$ — вероятность ошибки;
- γ — эффективность использования радиочастотного спектра.

При расчете основных технических параметров и показателей качества ССМС рационально использовать метод М. А. Быховского [55, 170], согласно которому используются соотношения (4.1) — (4.23).

1. Величина допустимой телефонной нагрузки в одном секторе одной соты или в соте (для базовых станций, имеющих антенны с круговой диаграммой направленности) определяется одним из следующих соотношений [5, 170]

$$A = n_0 \left[1 - \sqrt{1 - \left(p_{\text{бл}} \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}} \right)^{\frac{1}{n_0}}} \right] \quad \text{для } p_{\text{бл}} \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}} \quad (4.1)$$

и

$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln \left(p_{\text{бл}} \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}} \right)} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad \text{для } p_{\text{бл}} > \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}. \quad (4.2)$$

В выражениях (4.1) и (4.2) n_0 — допустимое число абонентов, которые могут одновременно работать в одном секторе каждой соты, при заданном качестве приема сигналов любой MS (определяемом ρ_0) и заданной надежности приема (определяемом p_i).

Для сетей второго и третьего поколения параметр n_0 рассчитывается по-разному [5, 170], поскольку сети второго поколения используют технологию FDMA/TDMA, а сети третьего поколения — CDMA.

Таким образом, для расчета параметра n_0 ССМС второго поколения необходимо использовать выражения (4.3)–(4.11).

$$n_0 = n_s \cdot n_a, \quad (4.3)$$

где n_a — число абонентов, которые одновременно могут использовать один частотный канал (величина n_a определяется стандартом);
 n_s — число радиочастот.

Число радиочастот, необходимое для обслуживания абонентов в одном секторе каждой соты, определяется выражением

$$n_s = \text{int}(N_k / C \cdot M), \quad (4.4)$$

где N_k — число частотных каналов, C — размерность кластера, M — количество секторов в соте.

Общее число частотных каналов, выделяемых для развертывания ССМС на определенной территории, определяется формулой

$$N_k = \text{int}(\Delta F / F_k), \quad (4.5)$$

где $\text{int}(x)$ — целая часть числа x ;

F_k — полоса частот, занимаемая одним частотным каналом системы сотовой связи (частотный разнос между каналами). Величина F_k определяется стандартом.

Для определения необходимой размерности кластера C при заданных значениях ρ_0 и p_t используется соотношение

$$p(C) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{\infty} \exp(-x^2 / 2) dx \right] \cdot 100, \quad (4.6)$$

где $p(C)$ — процент времени, в течение которого отношение сигнал/помеха на входе приемника MS будет находиться ниже защитного отношения ρ_0 .

Интеграл (4.6) представляет собой табулированную Q-функцию, значения которой приведены в [129, 170].

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{\infty} \exp(-x^2 / 2) dx, \quad (4.7)$$

Нижний предел этого интеграла имеет следующий вид

$$x_1 = \frac{10 \lg(1 / \beta_e) - \rho_0}{\alpha_p}, \quad (4.8)$$

где

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^l \beta_i \right) \exp \left[\frac{\gamma^2 (\sigma^2 - \alpha_e^2)}{2} \right], \quad (4.9)$$

$$\alpha_p^2 = \sigma^2 + \alpha_e^2, \quad (4.10)$$

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left\{ 1 + \left[\exp(\gamma^2 \sigma^2) - 1 \right] \frac{\sum_{i=1}^l \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^l \beta_i \right)^2} \right\}, \quad (4.11)$$

σ — параметр, определяющий диапазон случайных флуктуаций уровня сигнала приема; коэффициент $\gamma = 0,1 \ln 10 = 0,23$.

Коэффициенты β_i в (4.11) представляют собой медианное значение затухания радиоволн на i -м направлении распространения помехи. Эти коэффициенты обратно пропорциональны четвертой степени расстояния до источника помехи. Величина l означает число «мешающих» базовых станций, расположенных в соседних кластерах.

Значения l и β_i в (4.11) зависят от того, какого типа антенны используются на BTS — ненаправленные или секторные. Возможны три случая:

а) если $\phi = 360^\circ$ и $M = 1$, $l = 6$ и $\beta_1 = \beta_2 = (q-1)^{-4}$, $\beta_3 = \beta_4 = q^{-4}$, $\beta_5 = \beta_6 = (q+1)^{-4}$;

б) если $\phi = 120^\circ$ и $M = 3$, $l = 2$ и $\beta_1 = (q+0.7)^{-4}$, $\beta_2 = q^{-4}$;

в) если $\phi = 60^\circ$ и $M = 6$, $l = 1$ и $\beta_1 = (q+1)^{-4}$.

Здесь M — число секторов, а значение $q = D/R = \sqrt{3 \cdot C}$.

При заданных значениях ρ_0 , σ и M для нескольких значений C проводят расчеты процента времени срыва связи $p(C)$. После нахождения величины x_1 по таблицам [129, 170] определяют процент времени $p(C)$. Если выполняется условие $p(C) \leq p_t$, то выбранное значение размерности кластера C соответствует заданным условиям проектирования, а если $p(C) > p_t$, то необходимо выполнить расчеты при больших значениях C .

Для расчета параметра n_0 ССМС третьего поколения необходимо использовать выражения (4.12)–(4.17).

Обычно в системах с CDMA приемлемым считается качество приема информации, при котором вероятность ошибочного приема одного информационного знака составляет 10^{-3} , причем $\rho_0 = 5$ (7 дБ) [58, 62, 170].

При этом, величина n_0 определяется выражением

$$n_0 = \left(\frac{1-\lambda}{\alpha \rho_0} \right) \frac{(B_r/B_{\text{inf}})}{2 + \exp[m_0 + K_T \sigma_0]}, \quad (4.12)$$

где $\lambda = 0,2$ — часть мощности передатчика BTS, расходуемая на передачу пилот-сигнала [123];

$\alpha = 3/8$ — доля времени от общей длительности разговора, приходящаяся на паузы [58];

B_{inf} — скорость передачи информации (бит/с);

B_r — полоса частотного сигнала (Гц);

m_0 — параметр;

σ_0 — параметр, характеризующий уровень флуктуаций принимаемого сигнала;

ρ_0 — необходимое защитное отношение для приемника MS;
 K_T — коэффициент, связанный с допустимым процентом времени уменьшения отношения сигнал/помеха относительно ρ_0 .

Коэффициент K_T связан с параметром p_T соотношением [55, 58]

$$p_T \% = 100 \int_{K_T}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \frac{dt}{\sqrt{2\pi}}. \quad (4.13)$$

Согласно [37] значению $p_T = 10\%$ соответствует величина $K_T = 1,29$.

Величина параметра m_0 определяется соотношением

$$m_0 = \ln \left[\frac{\xi_1 \exp\left(\frac{\gamma^2 \sigma^2}{2}\right)}{\sqrt{(1-\xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma^2 \sigma^2)}} \right] - \frac{3\gamma}{2\sqrt{\pi}} \cdot \sigma, \quad (4.14)$$

где σ — дисперсия флуктуации сигнала в точке приема (для сотовых систем $\sigma = 4 \dots 10$ дБ) [55, 170], $\gamma = 0,1 \ln(10) = 0,23$,

$$\xi_1 = 3(M+1) \cdot 2^{-(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k/2}, \quad (4.15)$$

$$\xi_2 = \left[3(M+1)^2 \cdot 2^{-2(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k} \right] \cdot \left[3(M+1) \cdot 2^{-(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k/2} \right], \quad (4.16)$$

$k = 3 \dots 4$ — параметр затухания радиоволн.

Параметр σ_0 , определяющий дисперсию гауссовой случайной величины z_0 , среднее значение которой равно нулю, определяется для сетей третьего поколения соотношением

$$\sigma_0 = \sqrt{\ln \left[(1-\xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma^2 \sigma^2) \right]} + 0,03 \cdot \sigma^2. \quad (4.17)$$

2. Количество абонентов, обслуживаемых базовой станцией, зависит от числа секторов, допустимой телефонной нагрузки и активности абонентов и определяется соотношением

$$N_{aBTS} = M \operatorname{int}(A/\beta). \quad (4.18)$$

3. Число базовых станций, необходимое для обслуживания заданного количества абонентов, равно

$$N_{BTS} = \operatorname{int}\left(N_a/N_{aBTS}\right), \quad (4.19)$$

где N_a — заданное число абонентов, которое должна обслуживать сотовая сеть мобильной связи.

4. При расчете радиуса соты полагаем, что нагрузка распределена по всей зоне равномерно. Тогда радиус определяется по формуле [129, 170]

$$R = \sqrt{\frac{1,21 \cdot S_0}{\pi N_{BTS}}} . \quad (4.20)$$

5. Одним из важнейших параметров эффективности сотовой сети связи [37, 51, 170] является вероятность ошибки в процессе сеанса связи. Расчет вероятности ошибки ведется, как правило, для наихудшего случая, когда MS находится на границе зоны обслуживания. Согласно [37, 170] вероятность ошибки для сетей второго поколения при $C \geq 3$ можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{ош}} \approx \frac{1}{(\sqrt{3}C - 1)^{2k}} . \quad (4.21)$$

6. Эффективность использования радиоспектра γ для сетей второго поколения [60] определяется числом активных абонентов, приходящихся на единицу полосы частот на передачу (или прием)

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k C} , \quad (4.22)$$

а для сетей третьего поколения [60]:

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k} . \quad (4.23)$$

После того как все основные параметры рассчитаны, проводится разработка номинального (предварительного) плана сети.

4.3. Многокритериальный выбор проектных решений на номинальном этапе планирования ССМС второго поколения

Для решения оптимизационной задачи на номинальном этапе планирования сотовых сетей мобильной связи [186, 187, 192, 214] были использованы методы выбора оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества.

Была поставлена и решена следующая задача номинального планирования [220]:

– для планируемой ССМС второго поколения стандарта GSM задать множество допустимых вариантов сети,

- выделить подмножество Парето-оптимальных вариантов со-
товой сети мобильной связи,
- из множества Парето-оптимальных вариантов с учетом сово-
купности выбранных показателей качества выбрать единственный
вариант ССМС для последующего детального планирования сети.

4.3.1. Формирование множества допустимых вариантов сети и выбор показателей качества ССМС

Было сформировано множество из 100 различных вариантов построения ССМС стандарта GSM, которые определялись различными исходными данными.

В качестве исходных данных использовались:

- планируемое количество абонентов в сети,
- размеры обслуживаемой территории (площадь),
- предполагаемая активность абонентов,
- выделенная для организации сети ширина полосы частот,
- допустимая вероятность блокировки вызова,
- процент времени ухудшения качества связи.

Используя методику представленную в п. 4.2.2, были рассчита-
ны все необходимые параметры сети для каждого из 100 вариантов
ССМС.

Определены параметры, которые характеризуют качество сети
и могут служить показателями качества, вычислены их значения,
затем нормированы и приведены к сопоставимому виду согласно
выражениям (4.24) и (4.25) соответственно:

$$k_{i=} = \frac{k_i}{k_{\max}}, \quad (4.24)$$

где k_i — показатели качества,

$k_{i\max}$ — максимальное значение показателей качества;

$$k_{iA} = 1 - k_i. \quad (4.25)$$

В рассмотренной задаче были выбраны 6 показателей качества,
которые характеризуют вероятность ошибки, емкость сети, коли-
чество абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией, эффек-
тивность использования радиочастотного спектра, вероятность
блокировки и площадь покрытия.

4.3.2. Выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов ССМС

Нахождение Парето-оптимальных вариантов сетей выполнено в критериальном пространстве векторных оценок введенных показателей качества. Для этого был использован безусловный критерий предпочтения — критерий Парето. В критериальном пространстве выделено подмножество Парето-оптимальных оценок показателей качества, которым соответствуют недоминируемые варианты построения сети.

Выбор подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов выполнялся согласно следующему правилу. Вариант сети φ° включается в множество Парето, если на множестве допустимых вариантов Φ_4 отсутствуют другие варианты сети φ , которые бы доминировали их по отношению нестрогого предпочтения. В критериальном пространстве это означает включению в множество Парето соответствующих оценок показателей качества $\vec{v} = \vec{k}(\varphi^\circ) \in P(V) = opt_{\geq} V$, если отсутствуют варианты сети φ , для которых выполнялось бы векторное неравенство

$$\vec{k}(\varphi) \geq \vec{k}(\varphi^\circ). \quad (4.26)$$

Отношение нестрогого предпочтения (4.26) означает, что выполняются неравенства $k_j(\varphi) \geq k_j(\varphi^\circ)$ для всех $j = \overline{1, m}$ и хотя бы для одного из показателей качества выполняется строгое неравенство.

Последовательно выполняя перебор и сравнение всех вариантов сетей на множестве допустимых вариантов построения сети Φ_4 по критерию Парето, было выделено подмножество Парето-оптимальных вариантов, которое включает 71 вариант построения ССМС. Остальные 29 вариантов сети являются безусловно худшими и были исключены из дальнейшего рассмотрения.

4.3.3. Анализ многомерных потенциальных характеристик и многомерных диаграмм обмена показателей качества ССМС

В результате Парето-оптимизации были получены многомерные диаграммы обмена показателей качества, имеющих антагонистический характер. Для иллюстрации некоторые МДО представлены на рис. 4.6.

МДО получены аналитическим путем согласно выражению (4.18). Каждая точка МДО определяет потенциально наилучшие значения каждого из показателей, которые могут быть достигнуты

при фиксированных, но произвольных значениях других показателей качества.

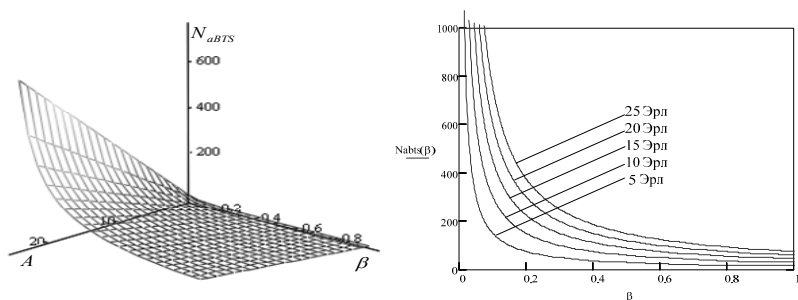


Рис. 4.6. МДО показателей качества $k(N_{aBTS})$, $k(\)$ и $k(\beta)$

На рис. 4.7 и 4.8 приведены варианты ССМС, представленные в двумерном критериальном пространстве некоторых показателей качества. Белыми точками выделены варианты, включенные в подмножество Парето-оптимальных вариантов. Им соответствуют потенциально наилучшие значения одного из показателей качества при фиксированных значениях других показателей качества. Фактически переход от одной Парето-оптимальной точки к другой представляет собой двумерную МДО. Парето-оптимальным вариантам соответствует левая нижняя граница исходного множества оценок показателей качества ССМС.

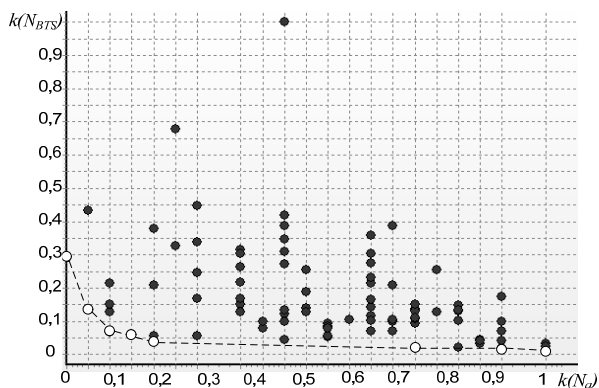


Рис. 4.7. Варианты ССМС в критериальном пространстве показателей качества $k(N_{BTS})$ и $k(N_a)$

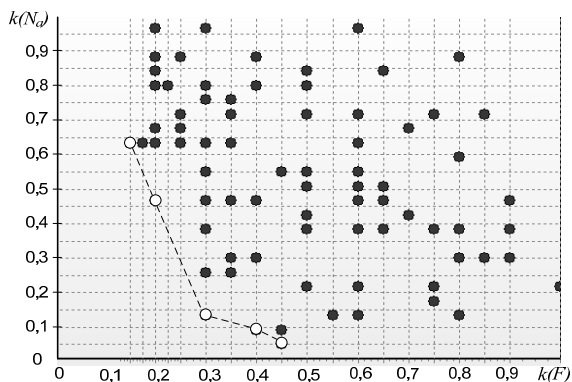


Рис. 4.8. Варианты ССМС в критериальном пространстве показателей качества $k(N_a)$ и $k(F)$

4.3.4. Выбор единственного проектного варианта ССМС

Для выбора единственного проектного решения из подмножества Парето был использован условный критерий предпочтения, основанный на минимизации скалярной целевой функции полезности в виде [178]

$$F(k_1, k_2, \dots, k_m) = \sum_{j=1}^m c_j k_j, \quad (4.27)$$

где c_j — шкалирующие коэффициенты, выбираемые из условия относительной важности показателей качества.

Для оценивания на практике значений коэффициентов c_j существуют специальные методики опроса экспертов. В рассматриваемой задаче значения этих коэффициентов были выбраны одинаковыми

$$c_i = \frac{1}{6} = 0,1667, \quad i = \overline{1,6}.$$

С введением результирующего показателя качества в виде (4.27) был выбран единственный вариант ССМС из подмножества Парето, исходя из условия экстремума скалярной целевой функции при равных коэффициентах.

Таким вариантом оказался вариант построения ССМС, который характеризуется следующими параметрами:

- площадь обслуживаемой территории — 150 кв.км;
- допустимая вероятность блокировки вызова — 0,02;
- плотность обслуживания — 466 акт. абон./кв. км;
- количество обслуживаемых одной БС абонентов — 41;

- эффективность использования радиочастотного спектра — $1,22 \cdot 10^{-3}$ акт. абон./Гц;
- вероятность ошибки — $5,277 \cdot 10^{-7}$.

4.3.5. Программный комплекс оптимизации проектных вариантов ССМС с учетом совокупности показателей качества

Для выбора оптимальных проектных решений на основе теории многокритериальной оптимизации был разработан программный комплекс [186]. Программный комплекс состоит из двух частей.

1. Первая часть программного комплекса реализована в среде MathCad. Она решает следующие задачи:

- задание исходных данных для всех допустимых вариантов сетей,
- расчет основных параметров ССМС,
- нормирование и приведение данных к стандартному виду,
- составление таблицы оценок совокупности показателей качества для допустимого множества вариантов ССМС.

Результаты всех расчетов эта программа транспортирует в текстовый файл «mL.txt», который используется второй частью программного комплекса.

2. Вторая часть программного комплекса реализована в среде Delphi. Она производит выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов ССМС в критериальном пространстве и сужение множества Парето до единственного варианта построения сети.

На рис. 4.9 для иллюстрации представлена часть интерфейса программы выбора оптимальных проектных вариантов сотовых сетей мобильной связи с учетом совокупности показателей качества.

С помощью этой программы можно решить следующие задачи:

- открыть текстовый файл mL.txt для получения таблицы рассчитанных значений показателей качества, приведенных к стандартному виду,
- выбрать необходимые для оптимизации показатели качества,
- выполнить выбор Парето-оптимальных вариантов ССМС,
- задать весовые коэффициенты относительной важности показателей качества,
- выполнить выбор единственного варианта ССМС,
- построить диаграммы обмена для выбранных показателей качества.

На рис. 4.9 показана часть таблицы со значениями 14-ти показателей для 19 вариантов ССМС. «Галочкой» задается выбор конкретных показателей качества, которые будут учитываться при многокритериальной оптимизации сетей. Рядом в окошках задаются значения весовых коэффициентов относительной важности выбранных показателей качества.

Интерфейс также содержит ряд пиктограмм.

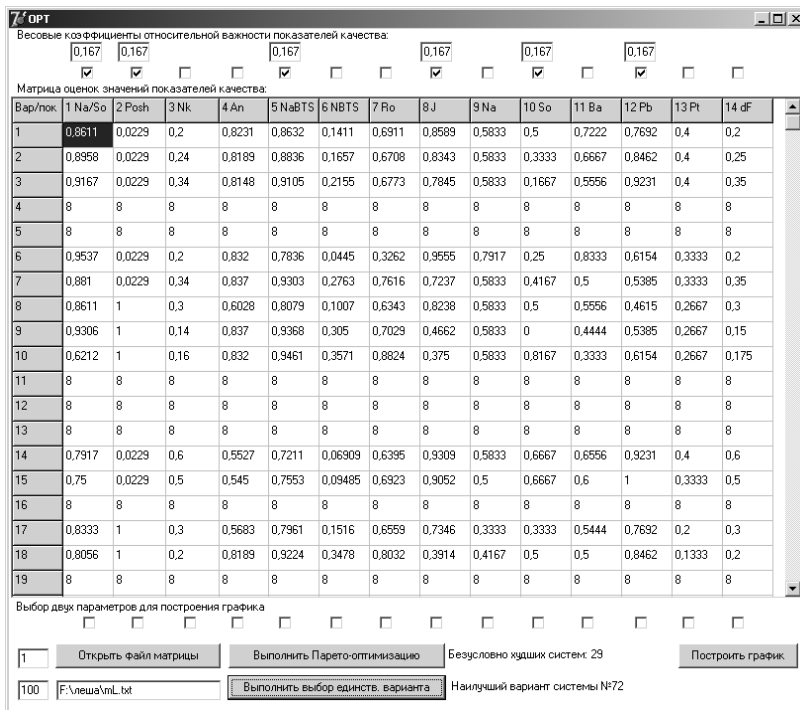


Рис. 4.9. Интерфейс программы выбора оптимальных проектных вариантов сотовых сетей мобильной связи с учетом совокупности показателей качества

1. «Открыть файл матрицы» (в таблицу загружаются данные с выбранного текстового файла для рассчитанных в первой части программного комплекса значений показателей качества выбранных вариантов сетей).

2. «Выполнить Парето-оптимизацию» (выбираются Парето-оптимальные варианты сети и исключаются из дальнейшего рассмо-

тения безусловно худшие варианты, представленные в таблице в виде символов «8»). Выводится количество безусловно худших вариантов сетей.

3. «Выполнить выбор единственного варианта» (находится единственный вариант сети из подмножества Парето с использованием условного критерия предпочтения). Выводится номер единственного варианта сети.

4. «Построить график» (строится изображение двумерного критериального пространства значений двух показателей качества для всех допустимых и Парето-оптимальных вариантов сети).

Созданный программный комплекс выбора оптимальных проектных вариантов сотовых сетей мобильной связи с учетом совокупности показателей качества использован для решения указанной выше задачи оптимизации ССМС по совокупности показателей качества. В первой части программы было сформировано множество из 100 допустимых вариантов ССМС, которое было представлено в критериальном пространстве оценок введенных показателей качества. Для каждого варианта ССМС были найдены оценки значений показателей качества, выполнено их нормирование и приведение к сопоставимому виду.

С помощью второй части программы по критерию Парето было выделено подмножество, включающее 71 вариант сети, то есть исключено из рассмотрения 29 безусловно худших вариантов. Из условия минимума условного критерия предпочтения из подмножества Парето выбран единственный вариант [220].

Кроме того, с помощью разработанного программного комплекса были проведены дополнительные исследования для рассматриваемых 100 систем стандарта GSM. По каждому из возможных показателей качества была проведена скалярная (однокритериальная) оптимизация (результаты представлены в табл. 4.4).

Таблица 4.4

Результаты скалярной оптимизации

| Показатель качества | Наилучший вариант (№) |
|---|-----------------------|
| N_a / S_0 — плотность обслуживаемых абонентов | 82 |
| N_k — общее количество частотных каналов в сети | 9 |
| A — допустимая телефонная нагрузка | 36 |

| Показатель качества | Наилучший вариант (№) |
|--|-----------------------|
| N_{aBTS} — число абонентов, обслуживаемых одной BTS | 63, 86 |
| N_{BTS} — необходимое количество базовых станций | 19 |
| R — радиус соты | 19 |
| γ — эффективность использования радиочастотного спектра | 72 |
| N_a — число обслуживаемых абонентов | 69, 92 |
| S_0 — площадь обслуживаемой территории | 9, 59 |
| β — активность одного абонента в час наибольшей нагрузки | 49, 72 |
| $P_{\text{бл}}$ — допустимая вероятность блокирования вызова | 69, 92 |
| ΔF_C — полоса частот базовых станций на передачу | 9 |

Проведен многокритериальный выбор оптимальных проектных вариантов ССМС для разных наборов совокупности показателей качества (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Некоторые результаты многокритериального выбора оптимальных ССМС при равных весовых коэффициентах относительной важности показателей качества

| Совокупность показателей качества | Количество безусловно худших сетей | Множество Парето (номера вариантов сетей) | Номер наилучшего варианта |
|---|------------------------------------|---|---------------------------|
| $N_a / S_0, P_{\text{бл}}, N_{aBTS}, \gamma, P_{\text{бл}}$ | 52 | 9, 10, 14, 18, 20, 24, 25, 31, 33, 37, 41, 43 и др. | 82 |

| Совокупность показателей качества | Количество безусловно худших сетей | Множество Парето (номера вариантов сетей) | Номер наилучшего варианта |
|-----------------------------------|------------------------------------|--|---------------------------|
| $A, N_{BTS}, R, N_a, \Delta F_C$ | 64 | 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 16, 17, 18, 19, 20 и др | 20 |
| N_{aBTS}, A, β | 84 | 31, 36, 49, 54, 61, 62, 63, 64, 66, 72, 77, 84, 85, 86, 87, 89 | 36 |
| $N_{BTS}, N_a, P_{\text{бл}}$ | 86 | 19, 21, 24, 28, 30, 36, 43, 44, 63, 65, 69, 86, 88, 92 | 65 |
| $S_0, A, \Delta F_C$ | 87 | 2, 3, 6, 9, 10, 17, 20, 22, 23, 36, 59, 64, 87 | 9 |
| A, γ | 90 | 36, 45, 60, 62, 69, 72, 87, 89, 92 | 72 |
| $P_{\text{ош}}, P_{\text{бл}}$ | 96 | 51, 69, 74, 92 | 51 |
| $N_a / S_0, \gamma$ | 96 | 69, 72, 82, 92 | 72 |
| A, N_{aBTS} | 97 | 36, 63, 86 | 63 |

Также была проведена многокритериальная оптимизация с учетом одной и той же совокупности показателей качества, но с различными значениями весовых коэффициентов относительной важности показателей качества (табл. 4.6).

Таблица 4.6

**Некоторые результаты многокритериальной оптимизации
при разных весовых коэффициентах относительной
важности показателей качества**

| № опти- миза- ции | Показатели качества | | | | | | Номер наилуч- шего ва- рианта |
|----------------------------|---|----------|------------|----------|-------|----------|--|
| | N_a / S_0 | $P_{ои}$ | N_{aBTS} | γ | S_0 | $P_{бл}$ | |
| | Весовые коэффициенты относительной важности | | | | | | |
| 1 | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 72 |
| 2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 82 |
| 3 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 72 |
| 4 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,1 | 59 |
| 5 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 63 |
| 6 | 0,2 | 0,3 | 0,05 | 0,05 | 0,2 | 0,2 | 82 |
| 7 | 0,1 | 0,25 | 0,25 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 47 |

По результатам исследований сделаны следующие выводы.

1. Чем меньше число показателей качества, с учетом которой проводится оптимизация сетей, тем больше число безусловно-худших вариантов и, соответственно, меньшим является количество Парето-оптимальных вариантов ССМС (табл. 4.5).

2. Большое влияние на результат оптимизации оказывает выбор весовых коэффициентов относительной важности показателей качества. При одной и той же совокупности показателей качества, но различных весовых коэффициентах, выбирается разный единственный вариант ССМС (табл. 4.6).

3. Чем больше число независимых между собой показателей качества, тем больше количество безусловно худших сетей и меньше Парето-оптимальных вариантов.

4.4. Многокритериальный выбор вариантов ССМС третьего поколения

Для решения оптимизационной задачи на этапе номинального планирования ССМС третьего поколения, так же, как и для сети второго поколения, были использованы методы многокритериального выбора оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества.

Была поставлена и решена следующая задача номинального планирования [180, 186, 187, 192, 208, 209, 211]. Для планируемой ССМС третьего поколения стандарта UMTS задается множество возможных вариантов построения сети. Необходимо найти подмножество Парето-оптимальных проектных решений с учетом совокупности выбранных показателей качества, а затем выполнить сужение подмножества Парето и выбрать единственный проектный вариант ССМС.

4.4.1. Формирование исходного допустимого множества вариантов ССМС

Для решения поставленной задачи было сформировано множество из 10 вариантов построения ССМС стандарта UMTS, которые определялись различными исходными данными, в качестве которых использовались:

- планируемое количество абонентов в сети,
- размеры обслуживаемой территории (площадь),
- предполагаемая активность абонентов,
- допустимая вероятность блокировки вызова.

Используя методику расчета представленную в п. 4.2.2, были рассчитаны необходимые параметры сети для каждого из 10 вариантов ССМС. Множество исходных и рассчитанных параметров сетей представлено в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Множество исходных и рассчитанных параметров сетей

| № ССМС | Исходные параметры | | | | Рассчитанные параметры | | | | | |
|--------|--------------------|-------|-----------------|---------|------------------------|------|-------------------|------------------|-----|---------------------|
| | N_a | S_0 | $P_{\text{бл}}$ | β | N_a / S_0 | A | N_{aBTS} | N_{BTS} | R | Γ |
| 1 | 50000 | 300 | 0,1 | 0,03 | 166 | 49,7 | 4971 | 11 | 3,2 | $2,2 \cdot 10^{-6}$ |
| 2 | 40000 | 300 | 0,05 | 0,05 | 133 | 45,6 | 2736 | 15 | 2,8 | $3 \cdot 10^{-6}$ |
| 3 | 45000 | 280 | 0,05 | 0,07 | 160 | 45,6 | 1956 | 24 | 2,1 | $4,8 \cdot 10^{-6}$ |
| 4 | 50000 | 290 | 0,09 | 0,05 | 172 | 48,7 | 2925 | 18 | 2,5 | $3,6 \cdot 10^{-6}$ |
| 5 | 48000 | 250 | 0,07 | 0,06 | 192 | 47,1 | 2358 | 21 | 2,1 | $4,2 \cdot 10^{-6}$ |
| 6 | 42000 | 290 | 0,03 | 0,06 | 144 | 43,8 | 2193 | 20 | 2,4 | $4 \cdot 10^{-6}$ |

| № ССМС | Исходные параметры | | | | Рассчитанные параметры | | | | | |
|-----------|--------------------|-------|-----------------|---------|------------------------|------|------------|-----------|-----|---------------------|
| | N_a | S_0 | $P_{\text{бл}}$ | β | N_a / S_0 | A | N_{aBTS} | N_{BTS} | R | Γ |
| 7 | 42000 | 300 | 0,04 | 0,06 | 140 | 44,8 | 2241 | 19 | 2,5 | $3,8 \cdot 10^{-6}$ |
| 8 | 40000 | 280 | 0,04 | 0,05 | 142 | 44,8 | 2688 | 15 | 2,7 | $3 \cdot 10^{-6}$ |
| 9 | 55000 | 300 | 0,02 | 0,04 | 183 | 42,6 | 3201 | 18 | 2,5 | $3,6 \cdot 10^{-6}$ |
| 10 | 55000 | 290 | 0,02 | 0,05 | 189 | 42,6 | 2559 | 22 | 2,5 | $4,4 \cdot 10^{-6}$ |

4.4.2. Выбор показателей качества ССМС

При проведении оптимизации ССМС с учетом совокупности показателей качества на этапе номинального планирования, выбраны параметры сети, представленные в табл. 4.7. В данном случае все эти параметры в той или иной мере могут характеризовать качество сети, поэтому их все можно использовать как показатели качества. При этом необходимо эти параметры привести к стандартному виду показателей качества — параметры необходимо нормировать к максимальному значению и привести к сопоставимому виду. Полученные значения выбранных показателей качества сети представлены в табл. 4.8.

При решении оптимизационной задачи среди всех показателей качества были выбраны 3 показателя качества — k_3 , k_5 и k_8 , которые характеризуют вероятность блокировки (P_i), плотность обслуживаемых абонентов (N_a / S_0) и необходимое количество базовых станций в сети (N_{BTS}) соответственно.

Таблица 4.8

Совокупность стандартных показателей качества

| № ССМС | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 | k_5 | k_6 | k_7 | k_8 | k_9 | k_{10} |
|-----------|-------|-------|-----------------|---------|-------------|-------|------------|-----------|-------|----------|
| | N_a | S_0 | $P_{\text{бл}}$ | β | N_a / S_0 | A | N_{aBTS} | N_{BTS} | R | Γ |
| 1 | 0,091 | 0 | 1 | 0,571 | 0,135 | 0 | 0 | 0,458 | 0 | 0,542 |
| 2 | 0,273 | 0 | 0,5 | 0,286 | 0,307 | 0,082 | 0,45 | 0,625 | 0,125 | 0,375 |
| 3 | 0,182 | 0,066 | 0,5 | 0 | 0,166 | 0,082 | 0,606 | 1 | 0,344 | 0 |
| 4 | 0,091 | 0,033 | 0,9 | 0,286 | 0,104 | 0,02 | 0,412 | 0,75 | 0,219 | 0,25 |

| № ССМС | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 | k_5 | k_6 | k_7 | k_8 | k_9 | k_{10} |
|-----------|-------|-------|-----------------|---------|-------------|-------|------------|-----------|-------|----------|
| | N_a | S_0 | $P_{\text{бл}}$ | β | N_a / S_0 | A | N_{aBTS} | N_{BTS} | R | Γ |
| 5 | 0,873 | 0,166 | 0,7 | 0,143 | 0 | 0,052 | 0,526 | 0,875 | 0,344 | 0,125 |
| 6 | 0,236 | 0,033 | 0,3 | 0,143 | 0,25 | 0,118 | 0,559 | 0,833 | 0,25 | 0,166 |
| 7 | 0,236 | 0 | 0,4 | 0,143 | 0,271 | 0,098 | 0,549 | 0,791 | 0,219 | 0,208 |
| 8 | 0,273 | 0,066 | 0,4 | 0,286 | 0,26 | 0,098 | 0,459 | 0,625 | 0,156 | 0,375 |
| 9 | 0 | 0 | 0,2 | 0,429 | 0,047 | 0,143 | 0,356 | 0,75 | 0,219 | 0,25 |
| 10 | 0 | 0,033 | 0,2 | 0,286 | 0,015 | 0,143 | 0,485 | 0,916 | 0,219 | 0,083 |

4.4.3. Нахождение подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов ССМС

Выбор подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов и исключение безусловно худших вариантов сетей были выполнены согласно тем же правилам, что и при решении оптимизационной задачи для ССМС второго поколения. А именно вариант сети включался в множество Парето, если на множестве допустимых вариантов отсутствовали другие варианты системы, которые бы доминировали по отношению нестрогого предпочтения (4.25). Результаты выбора вариантов сети, оптимальных по критерию Парето, представлены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Результаты выбора Парето-оптимальных вариантов ССМС третьего поколения на этапе номинального планирования

| № ССМС | k_3 | k_5 | k_8 | Результаты Парето-оптимизации |
|-----------|-----------------|-------------|-----------|----------------------------------|
| | $P_{\text{бл}}$ | N_a / S_0 | N_{BTS} | |
| 1 | 1 | 0,135 | 0,458 | Парето-оптимальный вариант |
| 2 | 0,5 | 0,307 | 0,625 | безусловно худший вариант |
| 3 | 0,5 | 0,166 | 1 | безусловно худший вариант |

| № ССМС | k_3 | k_5 | k_8 | Результаты Парето-оптимизации |
|-----------|-----------------|-------------|------------------|----------------------------------|
| | $P_{\text{об}}$ | N_a / S_0 | N_{BTS} | |
| 4 | 0,9 | 0,104 | 0,75 | безусловно худший вариант |
| 5 | 0,7 | 0 | 0,875 | Парето-оптимальный вариант |
| 6 | 0,3 | 0,25 | 0,833 | безусловно худший вариант |
| 7 | 0,4 | 0,271 | 0,791 | безусловно худший вариант |
| 8 | 0,4 | 0,26 | 0,625 | Парето-оптимальный вариант |
| 9 | 0,2 | 0,047 | 0,75 | Парето-оптимальный вариант |
| 10 | 0,2 | 0,015 | 0,916 | Парето-оптимальный вариант |

Как видно из табл. 4.9, подмножество Парето-оптимальных вариантов сети включает 5 вариантов построения ССМС № 1, № 5, № 8, № 9 и № 10. Остальные 5 вариантов сети являлись безусловно худшими и были исключены из дальнейшего рассмотрения.

4.4.4. Анализ полученных Парето-оптимальных вариантов ССМС и многомерных диаграмм обмена показателей качества

Нахождение Парето-оптимальных вариантов сетей выполнено в критериальном пространстве векторных оценок введенных показателей качества (k_3, k_5, k_8) по критерию Парето. Для иллюстрации на рис. 4.10–4.12 приведены проектные варианты ССМС, представленные в критериальном пространстве двух разных показателей качества.

На рис. 4.10–4.12 жирными точками выделены Парето-оптимальные варианты ССМС.

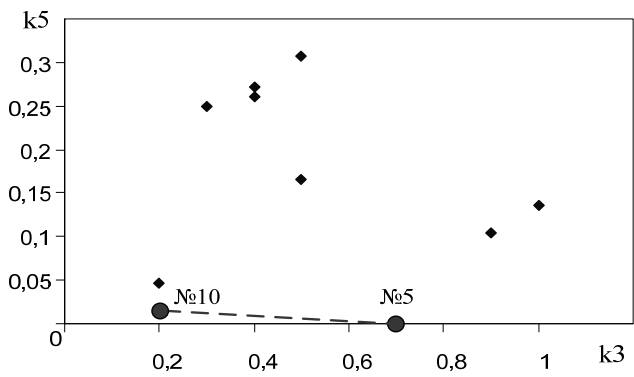


Рис. 4.10. Варианты ССМС в критериальном пространстве (k_3, k_5)

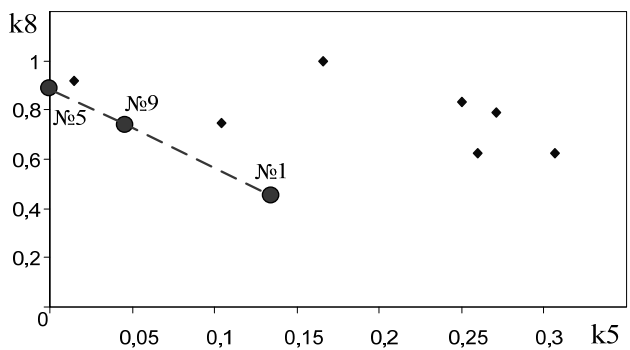


Рис. 4.11. Варианты ССМС в критериальном пространстве (k_5, k_8)

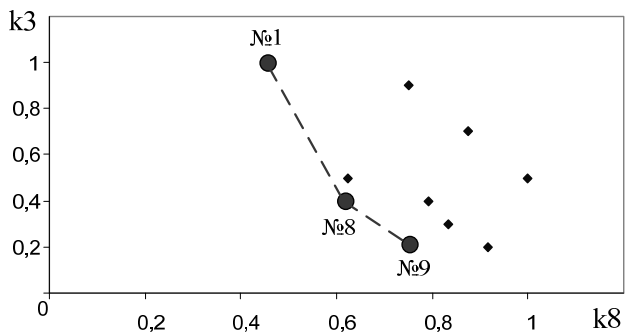


Рис. 4.12. Варианты ССМС в критериальном пространстве (k_8, k_3)

Фактически переход от одной Парето-оптимальной точки к другой представляет собой диаграмму обмена показателей качества (в данном случае двумерную диаграмму обмена). Каждая точка такой диаграммы обмена определяет потенциально наилучшие значения одного из показателей, которые могут быть достигнуты при фиксированных значениях других показателей качества.

4.4.5. Выбор единственного предпочтительного проектного варианта ССМС

Для выбора единственного предпочтительного проектного варианта из подмножества Парето-оптимальных был использован метод, основанный на лексикографическом подходе. Сначала весь набор показателей качества был упорядочен в порядке важности, а именно показатель k_3 более важен чем показатели k_5 и k_8 , а показатель k_8 более важен чем показатель k_5 .

При сравнении вариантов ССМС было использовано лексикографическое отношение. При этом единственным предпочтительным вариантом является вариант ССМС № 9. Как видно из табл. 4.7, этот вариант ССМС характеризуется минимальной допустимой вероятностью блокировки ($P_{от} = 0,02$), довольно высокой плотностью обслуживаемых абонентов ($N_a/S_0 = 183$ аб./км²) и относительно небольшим количеством базовых станций ($N_{БТС} = 18$).

4.4.6. Программная реализация многокритериального выбора проектных вариантов ССМС

Для выбора оптимальных проектных решений на основе теории многокритериальной оптимизации был разработана программа МСО (Multi Criterial Optimization). Данная программная реализация в отличие от программного комплекса, описанного в п. 4.3.5, не выполняет расчетов параметров сетей мобильной связи, а производит непосредственно выбор оптимальных проектных вариантов с учетом совокупности показателей качества на основе описанной в разделе 2 методологии многокритериальной оптимизации.

Программа МСО реализована на языке Java.

Этапы и методы многокритериальной оптимизации, которые реализованы в программе МСО, приведены на рис. 4.13.

Программа решает следующие задачи:

– выбор и задание значений показателей качества для допустимых проектных вариантов,

- нормирование и приведение показателей качества к сопоставимому виду,
- выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов с использованием метода дискретного выбора по безусловному критерию предпочтения Парето,
- сужение множества Парето до единственного проектного варианта построения сети с использованием метода на основе функций ценности или метода на основе лексикографических отношений.



Рис. 4.13. Этапы выбора оптимальных проектных вариантов с учетом совокупности показателей качества в программе МСО

Для начала работы необходимо создать множество допустимых вариантов, то есть сформировать таблицу, где строки соответствуют номерам вариантов системы, а столбцы $K_1 \dots K_{10}$ являются параметрами системы или показателями качества в числовом виде.

Для формирования таблицы необходимо выбрать количество допустимых вариантов от 1 до 100 с помощью градуированной шка-

лы (или указав число в ячейке справа от шкалы). Кнопка **Create table** фиксирует указанное значение и создает табличную сетку. Таким образом создается начальный шаблон для ввода значений показателей качества для допустимых вариантов сетей.

Проиллюстрируем работу программы МСО на примере решения задачи выбора оптимальных проектных вариантов сетей мобильной связи 3 поколения с учетом совокупности показателей качества, рассмотренной в п. 4.4.1–4.4.5. В этой задаче множество допустимых вариантов состоит из 10 вариантов .

После создания шаблона множества допустимых вариантов заполняются данные таблицы (рис. 4.14), указываются показатели качества проектных вариантов. Для каждого параметра **Kn**, который будет принимать участие в дальнейших вычислениях, проставляются отметки **Enabled**. После проставления отметок необходимо выбрать минимизацию или максимизацию для каждого выбранного показателя качества, для чего служат отметки **min** и **max**. После проверки правильности введенных данных и выбранных параметров необходимо нажать кнопку **Load**, при этом данные фиксируются.

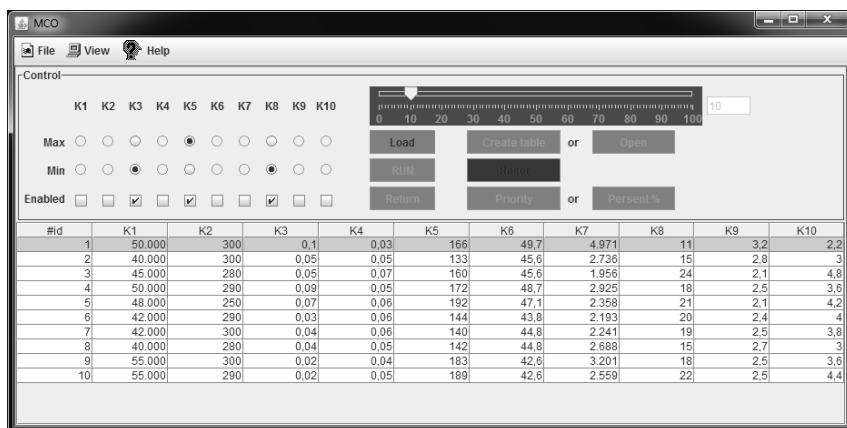


Рис. 4.14. Интерфейс программы

Для выполнения Парето-оптимизации необходимо нажать кнопку **Run**, при этом значения оценок показателей качества нормируются и с помощью метода дискретного выбора по безусловному критерию предпочтения Парето находится множество Парето-оптимальных вариантов.

Сужение подмножества Парето до единственного варианта в программе МСО может быть выполнено разными методами.

1. Метод, основанный на лексикографическом подходе. Для выбора единственного варианта из подмножества Парето с помощью этого метода необходимо нажать кнопку **Priority** и задать приоритеты для каждого показателя (от 1 до n , где n — количество показателей). Далее необходимо зафиксировать введенные данные кнопкой **Load** (на панели справа) и выполнить выбор нажав кнопку **Run**. Полученный единственный (оптимальный) вариант подсвечивается зеленым цветом.

2. Метод, основанный на теории полезности с использованием функций ценности. Для выбора единственного варианта из подмножества Парето с помощью этого метода необходимо нажать кнопку **Persent** и задать коэффициенты важности для каждого показателя (от 1 до 100 %). Далее необходимо зафиксировать введенные данные кнопкой **Load** (на панели справа) и выполнить выбор нажав кнопку **Run**. Полученный единственный (оптимальный) вариант подсвечивается зеленым цветом.

Программа МСО также позволяет сохранить набранные данные в файл с расширением `.mtm` (mathTable Model) и открыть при необходимости ранее сохраненные данные, чтобы продолжить работу с ними.

РАЗДЕЛ 5

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ТОПОЛОГИИ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ С УЧЕТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Важным этапом планирования ССМС является планирование транспортной сети (СТНР — Cellular Transmission Network Planning).

В данном разделе рассмотрены процесс планирования транспортной сети ССМС и практические особенности оптимизации транспортной сети. Приведены результаты решения задачи выбора оптимальной топологии транспортной сети с учетом совокупности показателей качества на основе методов многокритериальной оптимизации [187–189, 191, 198].

Кроме того, исследованы практические особенности краткосрочного и долгосрочного прогнозирования трафика с использованием реальных данных.

5.1. Процесс планирования транспортной сети мобильной связи

Область транспортной сети в структуре сотовой сети мобильной связи представлена на рис. 4.1. (для ССМС второго поколения) и на рис. 4.2. (для ССМС третьего поколения). В мобильной связи транспортная сеть — это сеть между опорной сетью оператора и базовыми станциями.

При планировании транспортной сети главной задачей является разработка структуры (топологии) сети, обеспечивающей взаимодействие между всеми узлами сети (базовыми станциями, базовыми контроллерами, центром коммутации). В результате планирования транспортной сети необходимо получить:

- топологию сети (схематическое изображение);
- полный список узлов, линий, цифровых кросс-коннекторов;
- суммарный запланированный коэффициент загрузки собственных и арендованных линий.

К структуре транспортных сетей предъявляются противоречивые технико-экономические требования, что определяет необходимость применения при их планировании методов многокритериальной оптимизации. Анализ литературы, посвященной планированию транспортных сетей [66, 82, 89, 94, 100, 103, 131, 154, 167, 172], показал, что вопросам оптимизации транспортных сетей уделено недостаточное внимание. Кроме того, в процессе планирования транспортных сетей не выполнялась их многокритериальная оптимизация с учетом совокупности показателей качества.

В общем случае в транспортной сети мобильной связи можно выделить два основных сегмента: магистральная транспортная сеть и сеть радиодоступа (RAN). Принципы построения магистральной сети мобильной связи имеют свои особенности, но в целом совпадают с принципами построения других магистральных сетей передачи. Поэтому особое внимание уделяется участкам сети, которые соединяют базовые станции с базовыми контроллерами (для сетей второго поколения) или контроллерами управления радиосетью (для сетей третьего поколения) [100].

Перед началом планирования транспортной сети мобильной связи следует собрать всю необходимую информацию и получить результаты предыдущих этапов планирования всей сети. Такими исходными данными для планирования транспортной сети являются:

- географические карты и базы данных,
- географическое расположение базовых станций,
- наличие прямой видимости между элементами планируемой транспортной сети,
- наличие существующих линий передачи, транспортных сетей и их топологии,
- требования к производительности и доступности,
- требования к сигнализации и синхронизации,
- прогнозы трафика и перспектив развития сети,
- возможности и стоимость оборудования,
- материальные возможности оператора,
- принципы корпоративной стратегии и руководящие принципы и т.д.

Цель планирования транспортной сети — соединить базовые станции (BTS) с контроллерами радиосети (BSS) и базовой сетью. Линии передачи при этом могут быть медными, коаксиальными, радиорелейными или волоконно-оптическими. Радиорелейные соединения гибкие, а именно оборудование легко размещается на

базовых станциях. Проводные линии нуждаются в большем объеме инженерных работ во время прокладки и реконфигурации сети. Волоконно-оптические линии разворачиваются в том случае, когда необходимо соединение с большой пропускной способностью. Главное отличие между планированием радиосети и транспортной сети заключается в том, что планируемая транспортная сеть должна полностью удовлетворять создаваемую нагрузку по обслуживанию мобильных пользователей в радиосети на протяжении всего ее существования [100].

В процессе планирования транспортной сети разрабатывается схема, которая должна обеспечить высокое качество и достаточную резервную емкость при минимальных затратах. Практически, проектировщик должен сбалансировать три коэффициента: стоимость, качество и емкость.

Процесс планирования транспортной сети включает пять этапов, которые представлены на рис. 5.1. На практике процесс планирования достаточно сложный, так как на каждом этапе выполняется много итераций, прежде чем конечная структура транспортной сети будет готова.

Планирование начинается со сбора данных, которые включают требования к емкости и качеству. Обработывается основная информация о доступном оборудовании, инструментальных средствах для планирования и вычисление бюджета подключений; определяется топология, которая может использоваться, и так далее.

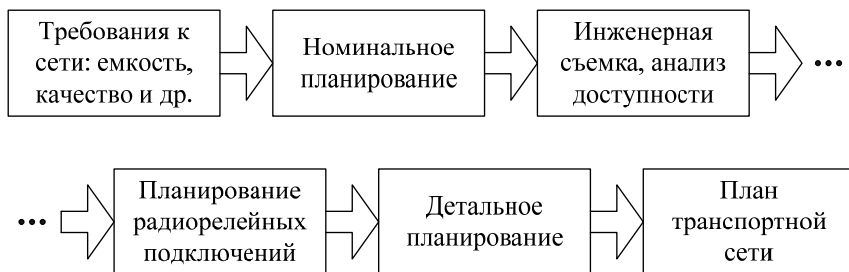


Рис. 5.1. Этапы планирования транспортной сети

Этап номинального планирования сосредотачивается на аспектах определения размеров и топологии транспортной сети связи. Он начинается после обработки полученной информации о результатах планирования радиосети.

Когда известно число базовых станций и нагрузка на сеть, анализируются качественные параметры их размещения, линии прямой видимости сайтов и возможность подключения. Соответственно возможным вариантам формируют мысленную топологию сети, или требования к ней.

Этап детального планирования состоит из распределения частот (частотное планирование), определения маршрутизации сигналов, принципов синхронизации, и планирования управления сетью связи. Каждый этап планирования может вносить изменения в предыдущий, поскольку в процессе планирования стараются достичь компромисса между пропускной способностью сети, качеством и стоимостью [100]. На данном этапе уточняется бюджет, используются специальные программные пакеты, например Nokia NetAct Link Planner.

В процессе планирования топологии транспортной сети, прежде всего, определяют следующие параметры и свойства сети: период, производительность, гибкость, нормы, возможность оптимизации, осуществление управления [66].

Период — время, на которое осуществляется прогноз пропускной способности. Если трафик прогнозируется на трехлетний период, то и проект сети составляется на это время.

К производительности относят критерии надежности, пропускную способность, схему защиты сети, наличие резервных каналов.

Гибкость — свойство, которое зависит от достоверности прогнозирования удельной нагрузки на сеть. Чем более достоверны прогнозы — тем более гибкой считается сеть.

Нормы (рекомендации) — общие указания и правила построения сети. Они направлены на сохранение архитектуры и топологии.

Возможность оптимизации зависит от достоверности прогнозируемой нагрузки. Если прогнозы достаточно надежные, то сеть может быть оптимизирована.

Осуществление управления — определение и стандартизация процессов управления, обеспечение простоты, эффективности, надежности.

В процессе планирования определяется количество и расположения соединительных узлов, линий и цифровых кросс-коннекторов. В случае арендованной сети, создаются короткие требования относительно пропускных способностей арендованных линий.

В процессе планирования определяются полные требования пропускной способности для каждого узла в основной сети. Данные получают из матрицы телефонной нагрузки, которая создается при расчете коммутационной сети.

Далее создается матрица всех узлов нагрузки, которая идентифицирует требования к пропускной способности (типичное число необходимых трактов E1) между узлами. В случае сети доступа, матрица отображает нагрузку от каждой базовой станции к контроллеру базовых станций, к которому она относится.

Используя топологию и транспортную матрицу, создают матрицу соединений. Это матрица всех точек разветвлений передачи, которые определяет требования к пропускной способности между точками разветвления. Она отображает выбранную топологию, т.е. идентифицирует фактические звенья передачи.

Затем определяют сеть передачи, которая удовлетворяет транспортную матрицу, требования к гибкости и топологию. По сути, выбирается сеть, которая согласована с установленными правилами архитектуры. При использовании каналов, которые арендуются, для выбора лучшей сети руководствуются тарифом и расстоянием к пункту подключения.

В конце, используя матрицу соединений, определяют тип и количество необходимого оборудования. По этим данным подсчитывается приблизительная стоимость сети.

Отдельно, стоит отметить, что эффективность планирования транспортной сети мобильной связи во многом зависит от высокого качества прогнозирования трафика. Развитие ССМС происходит очень быстро, поэтому построить сеть с возможностью адаптации к изменяющимся условиям может помочь только надежное прогнозирование. Точный прогноз изменения числа абонентов и возможного трафика позволит сделать сеть более гибкой и при этом сэкономить значительные материальные средства.

Для реализации намеченных планов, прогнозирование позволит обеспечить непрерывное развитие сети на основе анализа трафика действующих сетей и анализа будущих потребностей в услугах связи, предоставляемых сетью. Фактически прогнозирование оптимизирует сам процесс планирования сети.

5.2. Особенности применения методов многокритериальной оптимизации при планировании транспортной сети мобильной связи

При планировании транспортной сети главной задачей является создание проекта оптимальной топологии сети и выбор типа

линий связи, используемых в сети. При этом возможна либо установка собственных радиорелейных линий связи, либо прокладка волоконно-оптических линий связи, либо аренда уже существующих радиорелейных линий связи, вписывающихся по местоположению и условиям устойчивой радиосвязи в разрабатываемую сеть.

Каждая базовая станция должна быть соединена с базовым контроллером. Это соединение может быть организовано как напрямую, так и через другие базовые станции, поскольку оборудование BTS имеет гибкие возможности построения сети передачи различной конфигурации. Возможно создание сетей с топологическими структурами «звезда», «цепь», и «дерево» [206]. Кроме того, может быть использована смешанная топология, включающая в себя элементы всех выше перечисленных топологий. Возможные варианты топологий сети представлены на рис. 5.2.

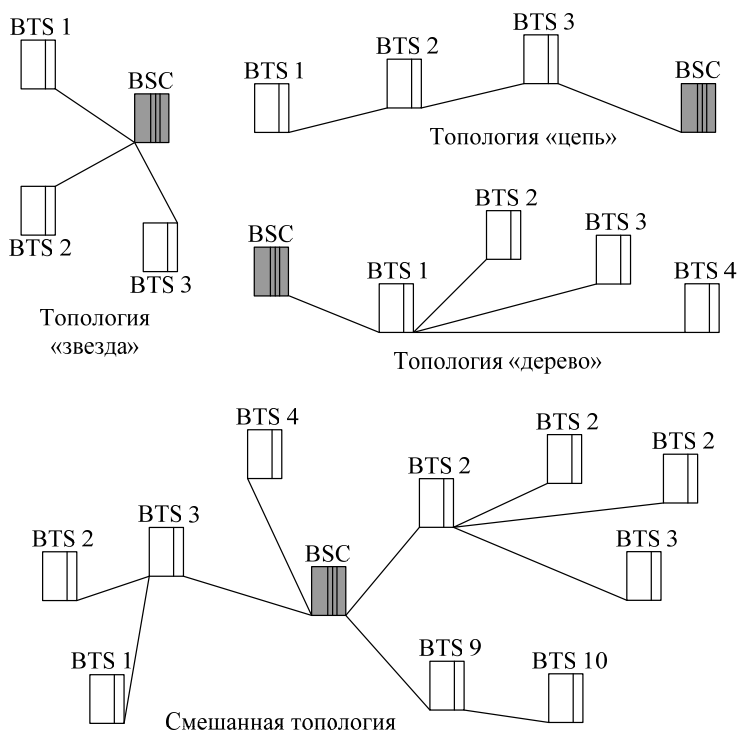


Рис. 5.2. Возможные варианты топологических структур сети

При выполнении данного этапа планирования сети необходимо учесть проблему соединения и координации больших потоков различной информации, а также выбрать высоконадежные широкополосные каналы, позволяющие обеспечить надежную связь между BTS и BSC.

В известных подходах к планированию транспортной сети при оптимизации топологии сети передачи по одному какому-либо показателю (например, по длине или стоимости) используют алгоритмы поиска кратчайшего дерева или определения максимального потока [42, 206], такие как алгоритмы Прима, Краскала, Исау-Вильямса, Фогеля и др. При учете двух или более показателей качества появляются определенные трудности, так как многие показатели зависят не только друг от друга, но и от полученной в итоге топологии сети, в частности, пропускная способность зависит от того, как BTS соединена с BSC (напрямую или через другие базовые станции).

Поэтому важной задачей этого этапа планирования является проведение многокритериальной оптимизации топологической структуры сети по совокупности показателей качества [187, 188]. Чтобы решить на практике эту задачу планирования, необходимы детальная информация о структуре радиосети, полученной на предыдущих этапах планирования, формулировка задач сети и требований к ее качеству обслуживания.

Для оптимизации топологической структуры сети передачи в данном разделе предлагается использовать показатели качества, учитывающие:

- длину радиорелейного пролета;
- общую длину цепи (сети);
- количество звеньев в цепи;
- стоимостные характеристики (стоимость строительных работ, стоимость аренды существующих линий, стоимость оборудования);
- используемую и резервную пропускную способность;
- показатели качества связи (скорость передачи, коэффициент ошибок по битам BER, секунды, сильно пораженные ошибками SES).

Поскольку все эти показатели качества тесно взаимосвязаны и противоречивы, то существует необходимость применения методов многокритериальной оптимизации в процессе решения сложных взаимосвязанных задач. К ним относятся: оптимизация пропускной способности каналов связи; выбор маршрутов; оптимизация топологической структуры; выбор методов управления потоками и определение параметров управления; анализ объемов буферной памяти узлов коммутации и маршрутизации и т.д.

В общем виде такая задача оптимизации топологии сети сводится к нахождению минимума функционала приведенной стоимости [90]

$$C(U, \Omega, Y) \rightarrow \min \quad (5.1)$$

при наличии ограничений на вероятностно-временные и структурные характеристики сети

$$V_i(U, \Omega, Y) \leq V_{i0} \quad (5.2)$$

и требований принадлежности множества вариантов архитектуры сети, $Q(U, \Omega, Y)$, удовлетворяющих ограничениям (5.2), к области технически реализуемых решений

$$Q(U, \Omega, Y) \in Q_0. \quad (5.3)$$

Здесь U – векторная величина, отражающая параметры качества и эффективности сети; Ω – векторная величина, представляющая собой совокупность параметров технических средств, включая производительность узлов и аппаратуры, надежность технических средств, достоверность передачи информации и т. д.; Y – векторная величина, отражающая параметры логической структуры сети.

Обычно в качестве основного показателя качества при проектировании транспортной сети часто выбирают обобщенный экономический критерий — приведенные затраты, включающие стоимость аренды линий связи и приведенную стоимость узлов сети. Другие показатели качества (среднее время задержки, надежность и т. д.) используются как ограничения при решении задачи проектирования.

В данном разделе предлагается решать задачу оптимизации топологии транспортной сети в три этапа:

1) задание исходного допустимого множества вариантов структуры сети;

2) выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов структуры транспортной сети;

3) выбор единственного варианта топологии сети.

Исходными данными для решения указанной оптимизационной задачи являются следующие:

– план расположения базовых станций, базовых контроллеров и центра коммутации;

– совокупность показателей качества, согласно которым следует оценивать допустимые варианты топологий транспортной сети;

– длины возможных пролетов (расстояния между узлами сети — BTS и BSC), их стоимостные характеристики, необходимые пропускные способности и др.

При определении ограничений отбрасываются пролеты между узлами сети, где нет радиовидимости или существуют какие-либо причины, препятствующие возможности построения линии связи на этих участках.

5.2.1. Выбор показателей качества и формирование множества допустимых вариантов транспортных сетей

При оптимизации транспортных сетей мобильной связи можно использовать показатели качества, учитывающие: длину радиорелейного пролета; общую длину сети; количество звеньев в цепи; стоимостные характеристики: стоимость строительных работ, стоимость аренды существующих линий, стоимость оборудования и др.; используемую и резервную пропускную способность; надежность пролета; скорость передачи; полосу частот; вероятность ошибочного приема бита (BER) и др.

При этом необходимо отметить, что с учетом двух или более показателей качества появляются определенные трудности, так как многие показатели зависят не только друг от друга, но и от полученной в итоге конкретной топологии сети.

Множество допустимых вариантов сетей Φ_4 — это все возможные варианты с учетом ограничений на пролеты, где нет радиовидимости или существуют какие-либо причины, препятствующие возможности построения линии связи на этом участке.

Полагается, что каждый пролет и транспортная сеть в целом характеризуется некоторой совокупностью показателей качества

$$\vec{k}(\varphi) = (k_1(\varphi), k_2(\varphi), \dots, k_B(\varphi)). \quad (5.4)$$

При формировании исходного допустимого множества вариантов структуры сети вначале может быть использована сокращенная совокупность показателей качества

$$\vec{k}(\varphi) = (k_1(\varphi), k_2(\varphi), \dots, k_n(\varphi)) \quad (n \leq m). \quad (5.5)$$

В частности, при этом могут быть выбраны такие показатели качества каждого пролета, как длина и стоимость пролета $\vec{k} = (k_1(l), k_2(s))$.

Предлагается ввести обобщенный показатель качества каждого пролета в виде взвешенной суммы выбранных показателей качества согласно

$$k_{\text{обобщ}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot k_i, \quad (5.6)$$

где c_i — некоторые весовые коэффициенты, характеризующие важность каждого показателя; n — количество показателей качества.

Далее, в предположении, что каждый пролет характеризуется теперь скалярным показателем качества (5.6), с помощью одного из известных алгоритмов (Прима, Краскала) находится кратчайшее дерево для транспортной сети. Выбирая различные допустимые комбинации весовых коэффициентов, можно найти некоторое множество других допустимых вариантов деревьев сети Φ_j , которые определяют различные топологии транспортной сети.

5.2.2. Нахождение подмножества Парето-оптимальных вариантов и выбор предпочтительного проектного варианта топологии транспортной сети

Для каждого допустимого варианта топологии (структуры) транспортной сети в целом оцениваются значения полной совокупности показателей качества транспортной сети (4.4). Каждый вариант структуры транспортной сети представляется в критериальном пространстве оценок показателей качества. Здесь с использованием одного из описанных во втором разделе методов выделяется подмножество Парето-оптимальных вариантов построения транспортной сети. Оптимумом по безусловному критерию предпочтения (критерию Парето) является множество Парето-оптимальных оценок, которые соответствуют недоминируемым вариантам транспортной сети.

Следует отметить, что при нахождении подмножества Парето-оптимальных вариантов топологии транспортной сети в целом могут учитываться показатели качества сети, которые зависят от конкретной топологии сети. Могут быть выбраны такие показатели качества, как скорость передачи, вероятность ошибки, пропускная способность, в частности, введена совокупность показателей качества в виде $\vec{k} = (k_1(P_{\text{ош}}), k_2(C), k_3(R_{\text{неп}}))$. Показатели качества транспортной сети для конкретной топологии в целом определяются через показатели качества каждого пролета сети [167].

Для выбора единственного варианта из подмножества Парето-оптимальных можно применить один из методов сужения подмножества Парето, описанных во втором разделе.

5.3. Выбор оптимальных вариантов топологии транспортной сети по совокупности показателей неготовности и стоимости

5.3.1. Оценивание показателей качества транспортной сети

Топология транспортной сети, которая проектируется в рамках установленных правил и рекомендаций, влияет на готовность (доступность) каждого узла. Рекомендации ITU-T G.821 [91] и ITU-T G.826 [86] описывают параметры готовности.

Неготовность аппаратуры — это такое состояние участка сети, при котором в течение десяти секундных интервалов, следующих подряд, имеет место пропадание сигнала (потеря синхронизации) или коэффициент ошибок превышает норму [167]. Причинами, приводящими к неготовности аппаратуры, могут быть следующие:

- ненадежность аппаратуры;
- ошибки обслуживающего персонала;
- экранирующее влияние препятствия при субрефракции;
- влияние гидрометеоров;
- влияние промышленных атмосферных факторов.

Для транспортных соединений BTS с BSC используют 2-й и 3-й класс качества гипотетической модели тракта короткого участка [91]. Для 2-го и 3-го класса качества коэффициент неготовности согласно рекомендации ITU-T G.821 не должен превышать 0,05% в год [91]. Этот показатель имеет отношение ко всей цепи, т. е., если существует цепь из 10 базовых станций сети, подключенных к контроллеру, то для каждого звена (пролета) значение коэффициента неготовности будет равно 0,005%. В реальной сети может быть меньше 10 звеньев, соединяющих BTS с BSC, однако операторы сетей для резерва производительности предпочитают применять значение коэффициента неготовности равное 0,005% для каждого звена. Для примера будем использовать однотипные соединения. Готовность BTS зависит от количества участков и типа конфигурации. Если тракт состоит из последовательно соединенных участков, то неготовность BTS для BSC равна

$$N = \sum N_i, \quad (5.10)$$

а для параллельно соединенных участков:

$$N = \prod N_i, \quad (5.11)$$

где i — количество участков. Готовность в любом случае равна $D = 1 - N$, так как общее время работы оборудования составляется из периодов готовности и неготовности.

На рис. 5.3 приведены простые примеры соединений BTS, а также неготовность каждой BTS и суммарный процент в тракте в зависимости от соединений.

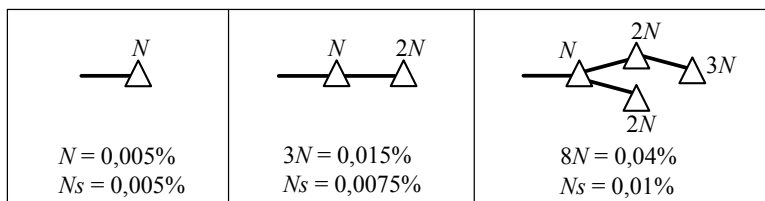


Рис. 5.3. Неготовность каждой BTS и суммарный процент в тракте в зависимости от соединений

Основным методом защиты от увеличения коэффициента неготовности является построение кольцевой топологии [66]. На рис. 5.4 показано уменьшение коэффициента неготовности BTS при использовании кольцевых топологий сети.

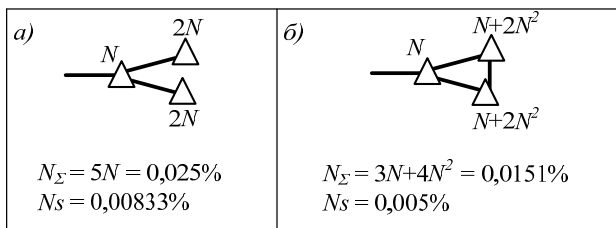


Рис. 5.4. Уменьшение коэффициента неготовности BTS за счет использования конфигурации кольцом

Видно, что использование кольцевой топологии (б) уменьшает коэффициент неготовности по сравнению с (а) почти в два раза. Но следует отметить, что кольцевая топология требует дополнительного оборудования и соединительных линий, что приводит к значительному увеличению стоимости сети. Поэтому целесообразно выполнять оптимизацию с учетом двух параметров: коэффициента неготовности (готовности) и стоимости.

5.3.2. Формирование множества вариантов топологий транспортной сети

Рассмотрим случай, когда в результате планирования радиосети был получен план точного расположения 26 базовых станций

и контроллера сети (рис. 5.5). Также имеются данные по возможности организации связи между всеми BTS. Необходимо найти наилучший вариант топологии сети с учетом двух показателей качества: коэффициента неготовности и относительной стоимости.

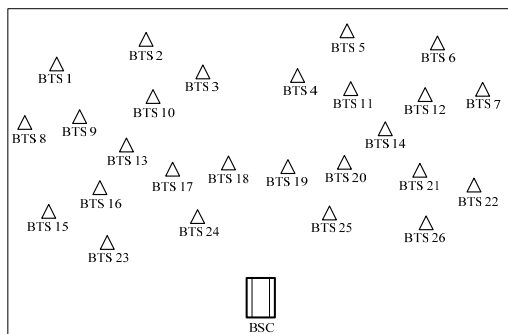


Рис. 5.5. План расположения элементов сети

Для рассматриваемой сети было сформировано некоторое множество вариантов топологий. На рис. 5.6–5.11 представлены различные варианты топологии транспортной сети.

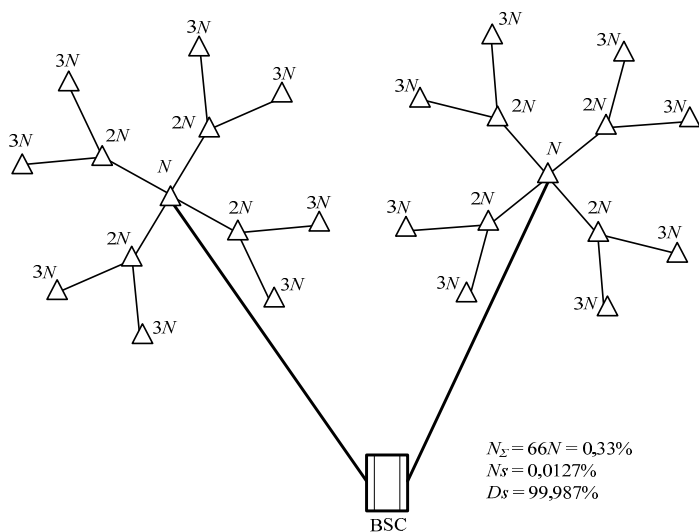


Рис. 5.6. Вариант 1 транспортной сети

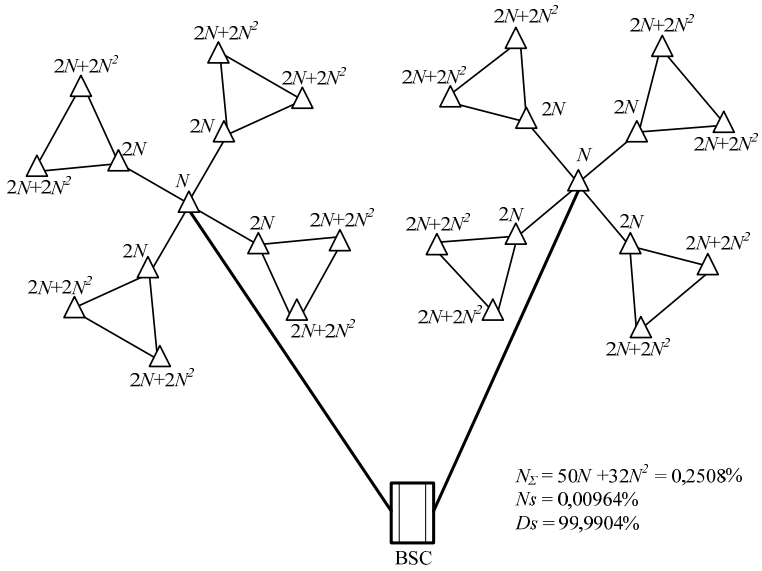


Рис. 5.7. Вариант 2 транспортной сети

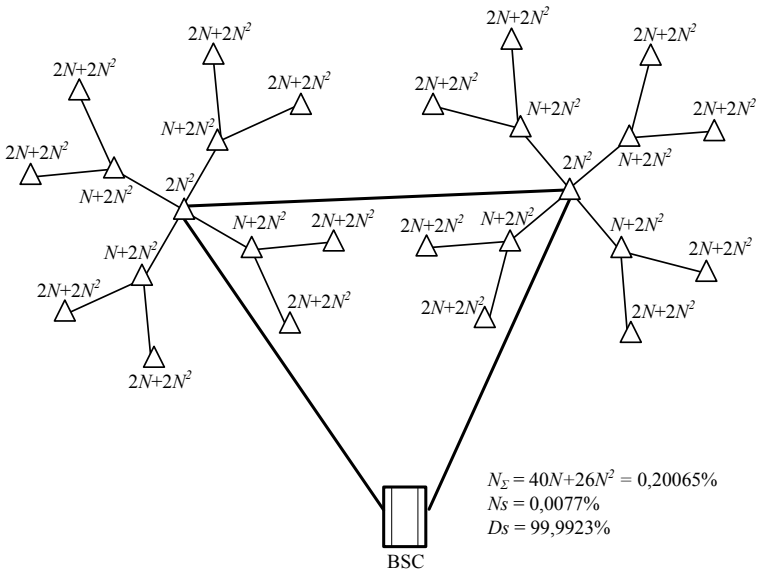


Рис. 5.8. Вариант 3 транспортной сети

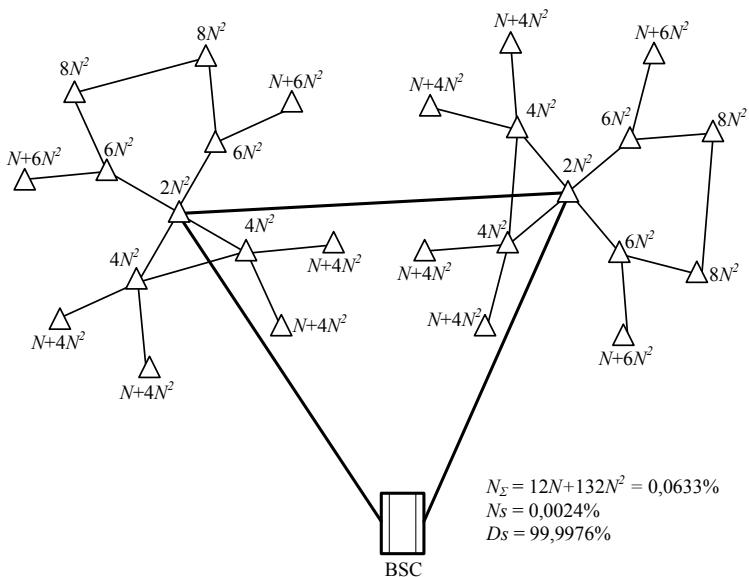


Рис. 5.9. Вариант 4 транспортной сети

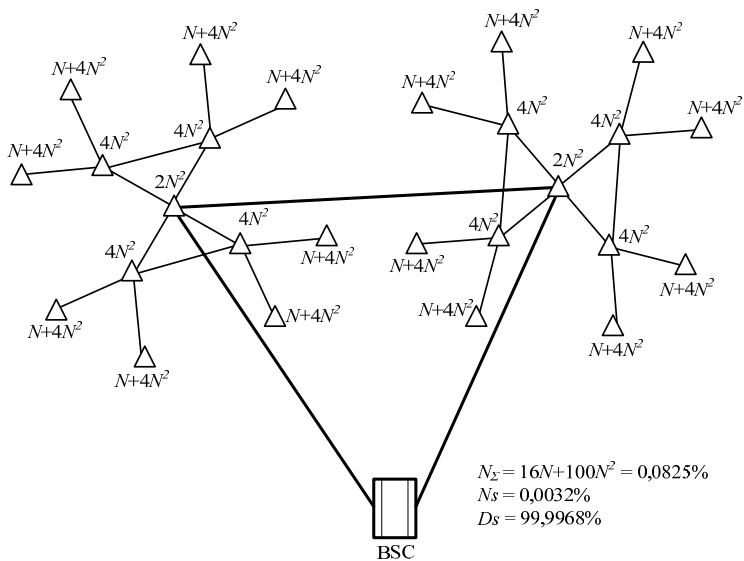


Рис. 5.10. Вариант 5 транспортной сети

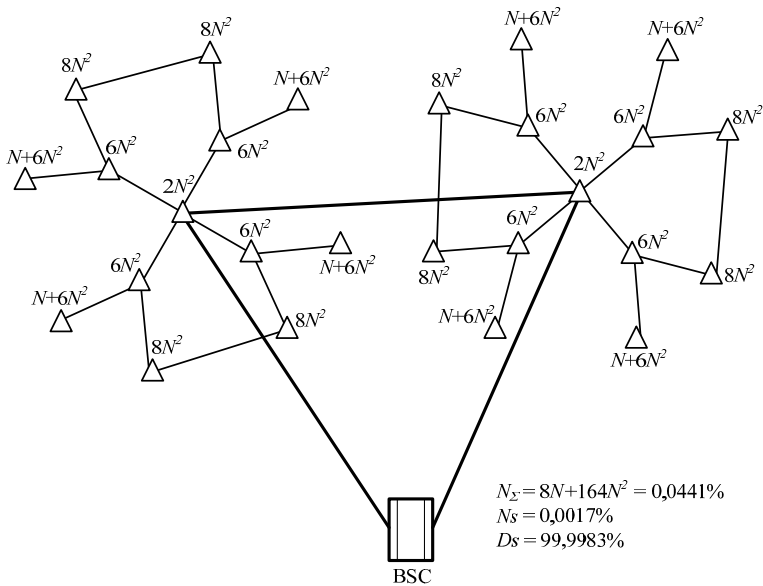


Рис. 5.11. Вариант 6 транспортной сети

5.3.3. Результаты многокритериального выбора топологии транспортной сети

Был выполнен сравнительный анализ вариантов топологий транспортных сетей. На рис. 5.6 представлена транспортная сеть, которая имеет «древовидную» топологию. Это самый дешевый вариант построения сети, но в данном случае происходит накопление вероятности ошибок и общего процента неготовности сети. Кроме этого узким местом топологии является соединение с контроллером радиосети BSC. Здесь сосредоточивается трафик от всех предыдущих BTS, что требует широкого канала связи. Выход из строя оборудования на данном участке делает сразу недоступной большую часть сети, что приводит к большим, в том числе экономическим, потерям для оператора. Для приведенной структуры используется 66 соединений для подключения 26 базовых станций. При этом процент неготовности BTS составляет 0,0127%.

Оптимизировать такую сеть можно применив кольцевые соединения. На рис. 5.7–5.11 представлены различные варианты топологии с использованием кольцевых соединений. Для каждого из них рассчитаны показатели неготовности (N) и готовности (D).

На рис. 5.7 рассматривается усовершенствованная структура исследуемой сети. Для повышения процента готовности на концах сети используют соединения кольцом трех BTS. При такой конфигурации суммарный коэффициент неготовности BTS равен 0,00964%. Но естественно стоимость такой конфигурации сети значительно выше.

На рис. 5.8 представлен третий вариант конфигурации сети, кольцом соединены основания деревьев и BSC. При такой конфигурации суммарный коэффициент неготовности BTS равен 0,0077%, который меньше на 0,00194% по сравнению с предыдущей структурой, что составляет 20%. Таким образом, соединение большого количества BTS кольцом более эффективное чем объединение небольших участков.

На рис. 5.9–5.11 представлены варианты комбинированной конфигурации сети. При комбинированной структуре достигается максимальное снижение коэффициента неготовности каждой BTS. Однако у сетей с такой топологией самая высокая стоимость среди предложенных. В то же время, вариант 6 дает самый низкий показатель неготовности, несмотря на практически одинаковую стоимость вариантов 4, 5 и 6.

Как видим, топология с самым низким коэффициентом неготовности имеет самую высокую стоимость, а топология, имеющая самую низкую стоимость, характеризуется очень высоким коэффициентом неготовности. Таким образом, указанные показатели качества связаны между собой и являются противоречивыми. Описанный выше подход оптимизации топологии основывается на сравнении относительной неготовности BTS в сети. Фактически, конфигурация зависит от желаемой средней неготовности для каждой BTS и сбалансированной стоимости для достижения высокой готовности.

В результате проведенного анализа указанных вариантов транспортной сети можно сделать следующие выводы:

- использование кольцевых соединений (варианты 2–6) значительно уменьшает коэффициент неготовности по сравнению с использованием древовидной топологии (вариант 1);
- намного эффективнее соединять в кольцо наиболее нагруженные звенья (вариант 3), чем небольшое количество базовых станций на концах сети (вариант 2);
- конфигурации 4–6 дают наибольшие показатели готовности, но при этом имеют наиболее высокую стоимость. При этом при от-

носительно равной стоимости вариант 6 имеет самый низкий показатель неготовности.

Поэтому необходимо рассмотреть все варианты топологий с точки зрения многокритериальной оптимизации. Необходимо исключить безусловно худшие варианты топологий по безусловному критерию предпочтения.

Рассмотренные варианты построения транспортной сети представлены в пространстве показателей: стоимость и коэффициента неготовности (рис. 5.12). Стоимость сети рассчитывалась согласно необходимому количеству соединений и наличию кросс-коннекторов.

На рис. 5.12 представлены варианты сети в критериальном пространстве показателей нормированной стоимости и неготовности. Видно, что варианты 2, 4 и 5 являются безусловно худшими, а остальные — нехудшие варианты включены в подмножество Парето. Применяв один из методов сужения множества Парето до единственного варианта можно найти оптимальный вариант топологии транспортной сети.

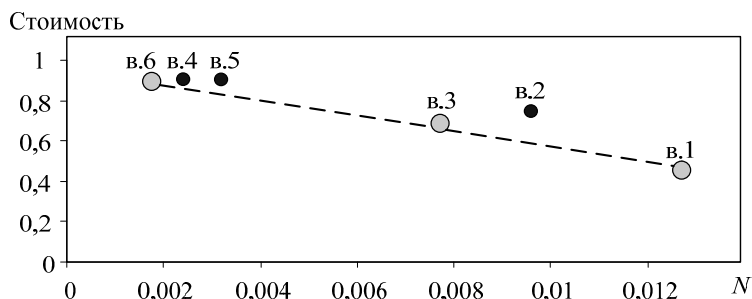


Рис. 5.12. Варианты топологии сети в критериальном пространстве показателей качества

5.4. Практические рекомендации по многокритериальному выбору транспортных сетей второго и третьего поколения мобильной связи

Сети третьего поколения, в отличие от ССМС второго поколения, для обеспечения современных услуг связи (например, таких как передача мультимедийных данных) требуют гораздо более высокой

пропускной способности транспортной сети. Для ССМС третьего поколения характерным является тот факт, что среда передачи и топология сети существенно изменяются в зависимости от требуемой пропускной способности, существующих технических средств, зоны радиопокрытия и т.д. В сети доступа может быть использована любая топология (дерево, звезда, цепь, кольцо или комбинированная из них), которая может работать по схеме логической звезды, хотя на верхнем уровне, ближе к базовой сети, часто используется топология типа кольцо с логическим узлом.

В сетях UMTS абонентский трафик обрабатывается на различных иерархических уровнях от узла В до базовой сети. Независимо от особенностей существующей иерархической структуры для магистральной сети это означает, что чем выше иерархический уровень, тем больший объем трафика в нем накапливается. Поэтому пропускная способность системы передачи (транспортной сети) должна соответствовать потребностям иерархии сети. На верхних уровнях требуются средства передачи с высокой пропускной способностью, например оптоволоконные системы передачи, а на границах сети — более гибкие и экономически эффективные средства повышения пропускной способности, предоставляющие собой радиорелейные системы передачи.

При разработке радиоинтерфейса широкополосного многостанционного доступа с кодовым разделением каналов предполагается, что большинство услуг будет пакетным при одновременной передаче речи традиционными методами. Это предоставляет сети UMTS гибкую структуру радиодоступа и позволяет использовать структурные преимущества системы, но требует от транспортной сети более гибких транспортных средств, чем поток Е1. Поэтому для сетей третьего поколения используют технологии АТМ (Asynchronous Transfer Mode — асинхронный способ передачи данных) и IP-протокол.

Как уже было отмечено, в транспортных сетях мобильной связи выделяют два сегмента: магистральная транспортная сеть и сеть радиодоступа (RAN). При этом развитие транспортных сетей RAN имеет ряд проблем из-за различий технологий мобильной связи второго и третьего поколений.

В сетях второго поколения для подключения базовых станций и контроллеров операторы используют мобильные низкоскоростные TDM-каналы. Изначально они арендовали большинство каналов у операторов фиксированной и дальней связи, но сейчас многие со-

товые компании имеют собственную оптическую инфраструктуру SDH/PDH, радиорелейное оборудование и сокращают количество арендуемых каналов, тем самым уменьшая операционные расходы на содержание сети.

При этом одним из вариантов решения проблемы, связанной с расширением транспортной сети RAN, является использование технологий IP, поскольку построение IP-RAN позволяет решить многие задачи модернизации уровня доступа [148]. Новые услуги требуют расширения полосы пропускания. Для ССМС второго поколения для передачи трафика от базовой станции к контроллеру достаточно емкости выделенного канала 2 Мбит/с (E1), но для третьего поколения необходимо использовать минимум четыре канала E1. При подключении одной базовой станции для поддержки высокой полосы пропускания потребуется много каналов E1, что неудобно и имеет ряд ограничений. Использование IP в качестве транспортной среды позволяет без труда получить полосу пропускания 100 или 1 тыс. Мбит/с, что многократно превышает емкость каналов E1.

Затраты на построение транспортной сети мобильной связи являются одной из основных составляющих высокой стоимости построения и эксплуатации сотовых сетей. Учитывая большое влияние стоимости подключения базовых станций как на величину первоначальных инвестиций, так и на эксплуатационные расходы, сотовым операторам стоит внимательно проанализировать свою стратегию в этом вопросе, прежде чем вкладывать средства в создание или расширение сети.

Задача осложняется ещё и необходимостью одновременно удовлетворять противоречивым требованиям существующих сетей 2G/2.5G и создаваемых сетей 3G. Переход от сетей 2G, основанных на коммутации каналов (TDM), к сетям 3G, использующим технологии коммутации пакетов (ATM, Gigabit Ethernet, IP и MPLS) создает новые проблемы. В частности, сотовый оператор должен заново оценить стоимость, функциональность и доступность платформы доступа, выбранной для обслуживания ожидаемого роста трафика, и быть готовым столкнуться со сложностями построения конвергированной сети для передачи голоса и данных.

На сегодняшний день не существует единого общепринятого шаблона или готового решения для построения межстанционных соединений в сотовых сетях. Продуманная, ориентированная в будущее стратегия должна, с одной стороны, учитывать нынешние

требования передачи голоса и ограниченного трафика данных, минимизируя при этом затраты на построение и эксплуатацию сети. С другой стороны, инфраструктура доступа должна быть готова принять на себя нагрузку новейших широкополосных приложений и услуг, в число которых входят передача мультимедийных данных. Несмотря на эти противоречивые требования, у сотового оператора всегда имеется достаточно богатый выбор вариантов:

- аренда или построение собственной транспортной сети;
- максимальное использование существующей инфраструктуры 2G;
- построение сети доступа «с нуля»;
- одновременная поддержка трафика 2G и 3G.

При этом ключевым фактором является выбор таких решений и оборудования, которые будут обладать достаточной гибкостью и оптимальным соотношением цена/качество, которое позволит сотовому оператору выбрать те варианты, которые в наибольшей степени соответствуют техническим и экономическим требованиям.

Процесс планирования транспортной сети мобильной связи третьего поколения по сути не отличается от планирования транспортной сети для второго поколения, за исключением одного — появления технологии ATM. Процесс планирования также состоит из двух основных этапов: номинальное планирование и детальное планирование. По сравнению с сетями 2G, для сетей 3G на этапе детального планирования необходимо рассчитать параметры ATM. Все остальные области планирования вполне аналогичны описанным для планирования транспортных сетей второго поколения.

Номинальное планирование принципиально такое же, как для 2G: определение размеров, расчет бюджета звеньев, проектирование топологии, оценка и выбор оборудования и т.д. Основное отличие заключается в определении параметров объема передаваемых данных транспортной сети, поскольку кроме голоса в таких сетях передаются большие объемы трафика данных.

Планирование радиорелейных линий также одинаково для сетей второго и третьего поколений, за исключением более жестких требований к качеству передачи — в 3G сетях.

Также стоит отметить, что более предпочтительной топологией для сетей 3G, является топология типа «звезда». Это обусловлено тем, что большие объемы трафика могут быть причиной задержек при использовании «петель» или больших «цепей» [100].

Несмотря на то, что процесс планирования транспортной сети для ССМС 3G более сложный чем для 2G, из-за использования технологии ATM, все же основные аспекты планирования одинаковы. И, соответственно, процесс применения описанной выше методологии оптимизации с учетом совокупности показателей качества аналогичен.

В п. 7.4 рассмотрены теоретические и практические особенности применения метода анализа иерархий для выбора предпочтительного проектного варианта для разных типов средств телекоммуникаций.

РАЗДЕЛ 6

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ РЕЧЕВЫХ КОДЕКОВ С УЧЕТОМ ИНФОРМАЦИИ ОТ ЭКСПЕРТОВ

В данном разделе исследованы практические аспекты применения разных методов выбора единственного предпочтительного проектного варианта из заданного множества вариантов средств телекоммуникаций. Проведены сравнительные исследования эффективности разных методов выбора предпочтительного проектного варианта. Исследования проведены на примере одного из средств телекоммуникаций — речевых кодеков. Использовались данные некоторого множества типовых речевых кодеков для IP-телефонии, которые характеризуются совокупностью антагонистических (конфликтующих) между собой показателей качества. Рассмотрены особенности формирования условных критериев предпочтения для выбора единственного предпочтительного варианта с привлечением дополнительной информации от экспертов и ее обработки на основе теории полезности, размытых множеств, экспертного оценивания, а также лексографических отношений и анализа иерархий.

6.1. Сравнительный анализ эффективности методов выбора предпочтительного проектного варианта

Были проведены сравнительные исследования эффективности методов выбора единственного предпочтительного проектного варианта системы с использованием методов на основе теории полезности (ТП), теории размытых множеств (ТРМ), а также метода анализа иерархий (МАИ). Суть исследований заключалась в моделировании некоторого множества истинных и ошибочных заключений группы экспертов относительно представляемой ими субъективной информации, которая характерна для каждого метода выбора предпочтительного варианта системы. Для сравнительного

анализа эффективности указанных методов выбора предпочтительного варианта введен критерий эффективности, вычисляемый по результатам множества экспериментов — процедур выбора с использованием разных методов выбора. Исследования эффективности методов выбора проведены для разного разброса заключений экспертов относительно правильных значений, зависящего от опыта экспертов, а также для разного числа экспертов [247].

В частности, для метода выбора, основанного на ТП, смоделирована матрица значений весов (относительной ценности) m показателей качества для заданного множества экспериментов. Истинные значения значений весов показателей качества получены как m случайных чисел в диапазоне от 0 до 1. Считалось, что каждый эксперт оценивает значения весов показателей качества с погрешностью, которая определяется нормальным законом распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . В результате получались искаженные матрицы значений весов для множества экспериментов по выбору единственного предпочтительного варианта из множества k допустимых проектных вариантов с использованием метода выбора, основанного на ТЦ. При этом предпочтительный проектный вариант выбирался из условия максимума взвешенной суммы показателей качества, в которой значения весовых коэффициентов оценивались экспертами.

Чтобы оценить эффективность метода выбора для заданного числа показателей качества, количества проектных вариантов и количества экспертов определялся номер истинного предпочтительного проектного варианта $\eta(R^{opt})$ и номер предпочтительного проектного варианта $\eta(R^{exp})$ для случаев, когда эксперты принимают решение с погрешностью. Если $\eta(R^{opt}) = \eta(R^{exp})$, это означает, что в обоих случаях предпочтительным проектным вариантом оказался один и тот же вариант и исследуемый метод оказался устойчивым к погрешности принятия решения экспертами. Если же это условие не выполняется, то вводится критерий эффективности, позволяющий оценить степень отличия таких решений. Для того, чтобы получить достоверные оценки значений этого критерия, набиралась статистика на большом числе экспериментов f .

При оценивании эффективности выбора на основе МАИ эксперты должны оценивать значений парных сравнений (взаимную важность значений характеристик проектных вариантов). В результате формируется матрица парных сравнений. Так как в прак-

тических ситуациях взаимная важность значений характеристик проектных вариантов достаточно редко прямо пропорциональна значениям этих характеристик, то задавались значения парных сравнений характеристик случайными числами в диапазоне от 0,1 до 9. Считалось, что эксперты оценивают результаты парных сравнений характеристик вариантов с погрешностью, соответствующей нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . При этом получались истинная и искаженные матрицы парных сравнений. В результате применения МАИ для каждого эксперимента находилась вектор глобальных приоритетов и по максимальному значению его компоненты определялся предпочтительный проектный вариант.

Для оценивания эффективности метода выбора предпочтительного проектного варианта по результатам множества f экспериментов, в которых эксперты выдавали информацию с погрешностью, использовался критерий в виде средней вероятности ошибочного принятия проектных решений

$$P_{\text{ош}} = 100\% \frac{1}{f} \sum_{i=1}^f \delta(i), \quad \delta(i) = \begin{cases} 1, & \eta(R_i^{\text{opt}}) \neq \eta(R_i^{\text{exp}}) \\ 0, & \eta(R_i^{\text{opt}}) = \eta(R_i^{\text{exp}}) \end{cases}. \quad (6.1)$$

Чем меньше значение $P_{\text{ош}}$, тем эффективнее исследуемый метод выбора предпочтительного варианта.

Приведем результаты исследований эффективности методов выбора предпочтительного варианта для числа показателей качества $n=5$, количества допустимых проектных вариантов $k=20$, количества экспериментов $f=1000$.

Для трех сравниваемых методов выбора предпочтительного проектного варианта (на основе ТП, ТРМ, МАИ) получены зависимости $P_{\text{ош}}$ от значения σ для фиксированного количества экспертов, равного 10 (рис. 6.1).

Из рис. 6.1 видно, что при небольших σ МАИ обеспечивает $P_{\text{ош}}$ существенно меньше, чем для методов на основе ТП и ТРМ. При значениях σ больших, чем 0,2, практически все равно, каким методом принимать решение. Для всех методов ошибка принятия решения $P_{\text{ош}}$ является большой и лежит в диапазоне 0,35–0,4.

Получены также зависимости $P_{\text{ош}}$ от количества используемых экспертов для разных методов выбора и фиксированного значения $\sigma = 0,1$ (рис. 6.2).

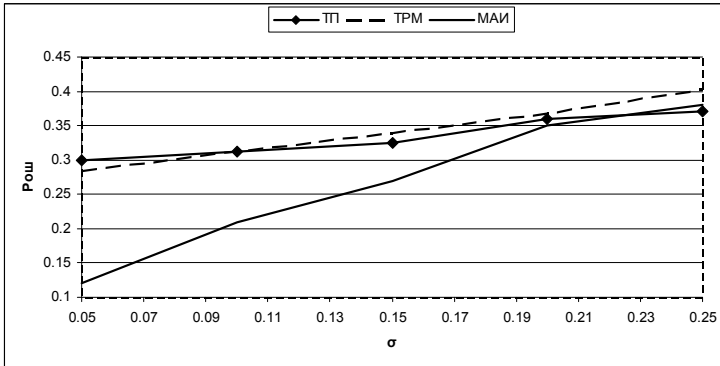


Рис. 6.1. Зависимости $P_{ош}$ от σ для различных методов выбора

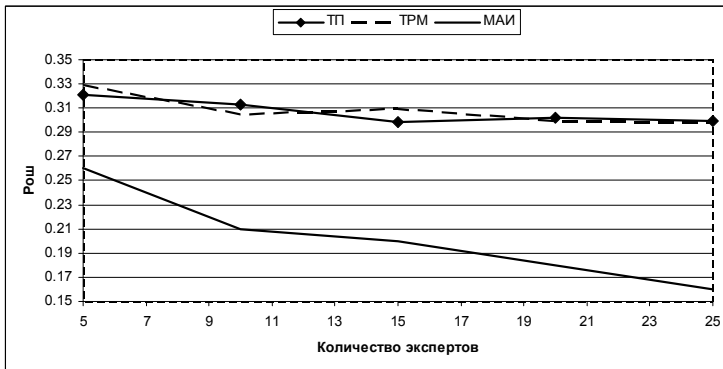


Рис. 6.2. Зависимость $P_{ош}$ от количества экспертов для разных методов выбора

Из графиков следует, что МАИ имеет преимущество по сравнению с методами на основе ТП и ТРМ во всем рассматриваемом диапазоне количества экспертов. Также хорошо видно, что для МАИ за счет увеличения количества экспертов в 5 раз удается снизить $P_{ош}$ примерно в 1,5 раза.

Еще к одному выводу приводит сравнение графиков на рис. 6.1 и 6.2. Так для МАИ при десяти экспертах и $\sigma = 0,05$ ошибка $P_{ош} = 0,12$, а для двадцати пяти экспертов и $\sigma = 0,1$ средняя вероятность

ошибки $P_{\text{ош}} = 0,16$. Таким образом, десять более квалифицированных экспертов обеспечивают меньшее значение $P_{\text{ош}}$, чем двадцать пять менее квалифицированных экспертов. По этим данным можно сделать вывод, что для принятия решения с помощью МАИ более важным является квалификация экспертов, чем их количество. Чтобы убедиться в этом, проверим предположение, что увеличение σ можно компенсировать прямо пропорциональным увеличением количества экспертов. В табл. 6.1 приведен ряд значений $P_{\text{ош}}$ для разных значений σ и числа экспертов.

Таблица 6.1

Значения $P_{\text{ош}}$ для МАИ для некоторых значений σ и количества экспертов

| σ | число экспертов | $P_{\text{ош}}$ |
|----------|-----------------|-----------------|
| 0,05 | 5 | 0,13 |
| 0,1 | 20 | 0,17 |
| 0,2 | 80 | 0,22 |

Как видно из табл. 6.1, значение σ увеличивается в 2 раза (а σ^2 увеличивается в 4 раза) и одновременно в 4 раза увеличивается число экспертов. В данном случае увеличение σ^2 в 16 раз не смогло компенсироваться пропорциональным увеличением в 16 раз количества экспертов. Вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ при этом возросла почти в 2 раза.

6.2. Исследование метода анализа иерархий для выбора предпочтительного варианта речевого кодека

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий для выбора единственного предпочтительного варианта речевого кодека с учетом совокупности показателей качества [203, 213, 214, 224, 225, 231]. Используются данные некоторого множества типовых речевых кодеков, используемых при проектировании сетей IP-телефонии. В качестве показателей качества выбраны основные технические характеристики речевых кодеков, характеризующие их потребительские свойства, в частности, скорость кодирования,

оценка качества речи, сложность реализации, размер кадра, суммарная задержка. В табл. 6.2 приведены исходные значения показателей качества для некоторого множества из 23 различных типов речевых кодеков. Из табл. 6.2 видно, что эти показатели качества связаны между собой и носят конкурирующий характер — они конфликтуют между собой. При переходе от одного речевого кодека к другому улучшение одного показателя качества соответствует ухудшению другого показателя качества.

Таблица 6.2

Значения показателей качества типовых речевых кодеков

| Тип кодека | скорость кодирования, кбит/с | оценка качества, MOS (1-5) | сложность реализации, MIPS | размер кадра, мс | суммарная задержка, мс |
|------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|------------------------|
| G 711 | 64 | 3,83 | 11,95 | 0,125 | 60 |
| G 721 | 32 | 4,1 | 7,2 | 0,125 | 30 |
| G 722 | 48 | 3,83 | 11,95 | 0,125 | 31,5 |
| G 722(a) | 56 | 4,5 | 11,95 | 0,125 | 31,5 |
| G 722(b) | 64 | 4,13 | 11,95 | 0,125 | 31,5 |
| G 723.1(a) | 5,3 | 3,6 | 16,5 | 30 | 37,5 |
| G 723.1 | 6,4 | 3,9 | 16,9 | 30 | 37,5 |
| G 726 | 24 | 3,7 | 9,6 | 0,125 | 30 |
| G 726(a) | 32 | 4,05 | 9,6 | 0,125 | 30 |
| G 726(b) | 40 | 3,9 | 9,6 | 0,125 | 30 |
| G 727 | 24 | 3,7 | 9,9 | 0,125 | 30 |
| G 727(a) | 32 | 4,05 | 9,9 | 0,125 | 30 |
| G 727(b) | 40 | 3,9 | 9,9 | 0,125 | 30 |
| G 728 | 16 | 4 | 25,5 | 0,625 | 30 |
| G 729 | 8 | 4,05 | 22,5 | 10 | 35 |
| G 729a | 8 | 3,95 | 10,7 | 10 | 35 |

| Тип кодека | скорость кодирования, кбит/с | оценка качества, MOS (1-5) | сложность реализации, MIPS | размер кадра, мс | суммарная задержка, мс |
|------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|------------------------|
| G 729b | 8 | 4,05 | 23,2 | 10 | 35 |
| G 729ab | 8 | 3,95 | 11,5 | 10 | 35 |
| G 729e | 8 | 4,1 | 30 | 10 | 35 |
| G 729e(a) | 11,8 | 4,12 | 30 | 10 | 35 |
| G 727(c) | 16 | 4 | 9,9 | 0,125 | 30 |
| G 728(a) | 12,8 | 4,1 | 16 | 0,625 | 30 |
| G 729d | 6,4 | 4 | 20 | 10 | 35 |

Видно, что временная задержка увеличивается с увеличением размера кадра, а также с увеличением сложности алгоритма кодирования. При передаче речи допустимая задержка в одном направлении не может быть больше 250 мс.

Размер кадра влияет на качество воспроизводимой речи: чем длиннее кадр, тем более эффективно кодируется речь. С другой стороны, с увеличением длины кадра увеличивается влияние задержки на обработку передаваемой информации. Размер кадра речевого кодека определяется компромиссами между этими требованиями.

Сложность алгоритма кодирования связана с необходимыми вычислениями в реальном времени. Сложность алгоритма определяет скорость обработки, измеряемую в миллионах инструкций в секунду (Millions of Instructions per second — MIPS). Сложность обработки влияет на физические размеры кодирующего, декодирующего или комбинированного устройства, а также на его стоимость и потребляемую мощность.

Оценка качества кодирования речи с использованием различных речевых кодеков, которая производится с помощью характеристики MOS (Mean Opinion Score), это усредненное совокупное мнение экспертов по 5-бальной шкале.

Для удобства работы было проведено преобразование исходных значений показателей качества, приведенных в табл. 6.2. В част-

ности, выполнены операции нормирования показателей к максимальным значениям

$$K_{ин} = \frac{K_i}{K_{imax}}. \quad (6.2)$$

Затем показатели были преобразованы в сопоставимый вид, чтобы все показатели носили однотипный характер в зависимости от технических характеристик кодеков. В частности, для показателей $K_{3н}$ и $K_{5н}$ выполнены преобразования

$$K'_i = \frac{1}{K_i}. \quad (6.3)$$

Преобразованные значения показателей качества речевых кодеков приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Преобразованные значения показателей качества речевых кодеков

| № | Тип кодека | $K_{1н}$ | $K_{2н}$ | $K'_{3н}$ | $K_{4н}$ | $K'_{5н}$ |
|----|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1 | G 711 | 1 | 0,851 | 0,604 | 0,004 | 0,515 |
| 2 | G 721 | 0,5 | 0,911 | 1 | 0,004 | 1 |
| 3 | G 722 | 0,75 | 0,851 | 0,604 | 0,004 | 0,969 |
| 4 | G 722(a) | 0,875 | 1 | 0,604 | 0,004 | 0,969 |
| 5 | G 722(b) | 1 | 0,918 | 0,604 | 0,004 | 0,969 |
| 6 | G 723.1(a) | 0,083 | 0,8 | 0,439 | 1 | 0,818 |
| 7 | G 723.1 | 0,1 | 0,867 | 0,424 | 1 | 0,818 |
| 8 | G 726 | 0,375 | 0,822 | 0,748 | 0,004 | 1 |
| 9 | G 726(a) | 0,5 | 0,9 | 0,748 | 0,004 | 1 |
| 10 | G 726(b) | 0,625 | 0,866 | 0,748 | 0,004 | 1 |
| 11 | G 727 | 0,375 | 0,822 | 0,727 | 0,004 | 1 |
| 12 | G 727(a) | 0,5 | 0,9 | 0,727 | 0,004 | 1 |
| 13 | G 727(b) | 0,625 | 0,866 | 0,727 | 0,004 | 1 |
| 14 | G 728 | 0,25 | 0,889 | 0,281 | 0,021 | 1 |

| № | Тип кодека | $K_{1н}$ | $K_{2н}$ | $K'_{3н}$ | $K_{4н}$ | $K'_{5н}$ |
|----|------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 15 | G 729 | 0,125 | 0,9 | 0,317 | 0,333 | 0,879 |
| 16 | G 729a | 0,125 | 0,878 | 0,669 | 0,333 | 0,879 |
| 17 | G 729b | 0,125 | 0,9 | 0,309 | 0,333 | 0,879 |
| 18 | G 729ab | 0,125 | 0,878 | 0,626 | 0,333 | 0,879 |
| 19 | G 729e | 0,125 | 0,911 | 0,237 | 0,333 | 0,879 |
| 20 | G 729e(a) | 0,184 | 0,915 | 0,237 | 0,333 | 0,879 |
| 21 | G 727(c) | 0,25 | 0,889 | 0,727 | 0,004 | 1 |
| 22 | G 728(a) | 0,2 | 0,911 | 0,453 | 0,021 | 1 |
| 23 | G 729d | 0,1 | 0,889 | 0,359 | 0,333 | 0,879 |

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий для выбора единственного предпочтительного варианта речевого кодека. На рис. 6.3 показано иерархическое представление задачи выбора предпочтительного речевого кодека. На первом уровне представлена цель выбора, на втором уровне — показатели качества, на третьем — альтернативные варианты речевого кодека.

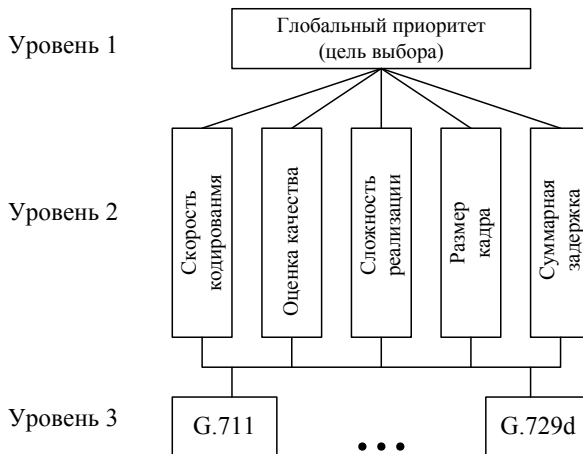


Рис. 6.3. Декомпозиция задачи выбора в иерархию сравнения речевых кодеков

Вначале согласно метода анализа иерархий, рассмотренного в п. 2.4.3, построена матрица парных сравнений для совокупности показателей качества, т.е. на втором уровне иерархии. Для заполнения этой таблицы с помощью эксперта выполнены парные сравнения важности показателей качества речевых кодеков. Диагональ этой матрицы заполнена значениями «1», а элементы матрицы, лежащие ниже диагонали, заполнены обратными значениями. В табл. 6.4 приведены матрица парных сравнений и вычисленные согласно (2.18) оценки компонент собственного вектора. По значениям компонент собственного вектора получены согласно (2.19) оценки компонент вектора приоритетов, которые также приведены в этой таблице.

Далее выполнены парные сравнения на 3 уровне иерархии. В частности, получены результаты парных сравнений речевых кодеков в отдельности по отношению к выбранным показателям качества: скорости кодирования, к качеству кодирования речи, к сложности реализации, к размеру кадра, к суммарной задержке. В результате обработки полученных матриц парных сравнений вычислены согласно (2.19) и (2.20) соответствующие собственные векторы и векторы приоритетов.

Таблица 6.4

Матрица парных сравнений показателей качества речевых кодеков и вычисленные оценки компонент собственных векторов и вектора приоритетов

| | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 | V_n | P_n |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K_1 | 1 | 4 | 3 | 5 | 7 | 3,35 | 0,47 |
| K_2 | 1/4 | 1 | 3 | 5 | 7 | 1,92 | 0,27 |
| K_3 | 1/3 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 1,11 | 0,15 |
| K_4 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 0,53 | 0,07 |
| K_5 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 0,27 | 0,04 |

Для примера в табл. 6.5 приведена матрица парных сравнений речевых кодеков по отношению к сложности реализации, а также вычисленные собственный вектор и вектор приоритетов.

Полученные также оценки векторов приоритетов речевых кодеков P_j , $j = 1,5$ по отношению к скорости кодирования, к задерж-

ке при кодировании, к размеру кадра, к сложности реализации, к качеству кодирования речи, которые в качестве столбцов приведены в табл. 6.6. В этой таблице приведены полученные ранее компоненты вектора приоритетов показателей качества P . С использованием этих векторов приоритетов вычислены значения компонент глобального вектора приоритетов C согласно (2.23), которые приведены в последнем столбце табл. 6.6.

Таблица 6.5

**Матрица парных сравнений речевых кодеков
по отношению к сложности реализации
и вычисленные оценки вектора приоритетов**

| | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 | K9 | K10 | K11 | K12 | K13 | K14 | K15 | K16 | K17 | K18 | K19 | K20 | K21 | K22 | K23 | собственный вектор | вектор приоритетов |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|--------------------|
| K1 | 1 | 1/5 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 5 | 7 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 9 | 9 | 1/5 | 7 | 1/5 | 9 | 9 | 1/5 | 7 | 9 | 1,011345204 | 0,026214373 |
| K2 | 5 | 1 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 3 | 3 | 3 | 7 | 7 | 7 | 7 | 9 | # | 7 | 5 | 9 | 9 | 7 | 5 | 7 | 5,371803842 | 0,138748929 |
| K3 | 2 | 1/5 | 1 | 1/4 | 1/4 | 5 | 5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 9 | 7 | 1/5 | 9 | 1/5 | 9 | 9 | 1/5 | 5 | 5 | 0,957400895 | 0,024910786 |
| K4 | 2 | 1/5 | 4 | 1 | 1/4 | 5 | 7 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 9 | 7 | 1/5 | 5 | 1/5 | 9 | 9 | 1/5 | 5 | 7 | 1,084063824 | 0,028206451 |
| K5 | 2 | 1/5 | 4 | 4 | 1 | 5 | 5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 7 | 7 | 1/5 | 7 | 1/5 | 9 | 9 | 1/5 | 5 | 7 | 1,209457666 | 0,0314743 |
| K6 | 1/5 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1 | 3 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 7 | 5 | 1/7 | 7 | 1/7 | 7 | 7 | 1/7 | 3 | 5 | 0,575749229 | 0,014981043 |
| K7 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 7 | 5 | 1/7 | 7 | 1/7 | 5 | 5 | 1/7 | 3 | 7 | 0,500840533 | 0,01303146 |
| K8 | 5 | 1/3 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 9 | 9 | # | 7 | 5 | 9 | 9 | 3 | 7 | 7 | 4,081091236 | 0,106186646 |
| K9 | 5 | 1/3 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1/2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 9 | 9 | # | 7 | 5 | 9 | 9 | 3 | 7 | 7 | 3,84237531 | 0,099975453 |
| K10 | 5 | 1/3 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1/2 | 1/2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 9 | 9 | # | 7 | 5 | 9 | 9 | 3 | 7 | 7 | 3,617622634 | 0,094127573 |
| K11 | 5 | 1/7 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1 | 2 | 2 | 9 | 9 | # | 7 | 5 | 9 | 9 | 2 | 7 | 7 | 2,901715036 | 0,075500245 |
| K12 | 5 | 1/7 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/2 | 1 | 4 | 9 | 9 | # | 7 | 5 | 9 | 9 | 4 | 7 | 7 | 2,901715036 | 0,075500245 |
| K13 | 5 | 1/7 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/2 | 1/4 | 1 | 9 | 9 | # | 7 | 5 | 9 | 9 | 2 | 7 | 7 | 2,495821235 | 0,064939218 |
| K14 | 1/9 | 1/7 | 1/9 | 1/9 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1 | 1/7 | 1/9 | 1/5 | 1/9 | 3 | 3 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 0,182971228 | 0,004746071 |
| K15 | 1/9 | 1/9 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 7 | 1 | 1/7 | 3 | 1/7 | 5 | 5 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 0,271167855 | 0,007055545 |
| K16 | 5 | 1/5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 9 | 7 | # | 7 | 2 | 9 | 9 | 1/2 | 7 | 9 | 2,07193327 | 0,053910004 |
| K17 | 1/7 | 1/7 | 1/9 | 1/5 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 5 | 1/3 | 1/7 | 1 | 1/9 | 7 | 7 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 0,266052462 | 0,004922467 |
| K18 | 5 | 1/5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 9 | 7 | 1/3 | 9 | 1 | 9 | 9 | 1/5 | 7 | 9 | 1,629720725 | 0,042403996 |
| K19 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/3 | 1/5 | 1/9 | 1/7 | 1/9 | 1 | 1/4 | 1/9 | 1/9 | 1/7 | 0,144456418 | 0,003758637 |
| K20 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/3 | 1/5 | 1/9 | 1/7 | 1/9 | 4 | 1 | 1/9 | 1/9 | 1/7 | 0,162696328 | 0,004240172 |
| K21 | 5 | 1/7 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/2 | 1/4 | 1/2 | 9 | 9 | # | 7 | 5 | 9 | 9 | 1 | 7 | 7 | 2,308770665 | 0,060072319 |
| K22 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 7 | 7 | 1/7 | 7 | 1/7 | 9 | 9 | 1/7 | 1 | 5 | 0,493304479 | 0,012835378 |
| K23 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 5 | 5 | 1/9 | 5 | 1/9 | 7 | 7 | 1/7 | 1/5 | 1 | 0,350625144 | 0,008122979 |

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов C (табл. 6.6) выбран предпочтительный речевой кодек для сети IP-телефонии с учетом введенных показателей качества и дополнительной информации от экспертов. Таким является речевой кодек G.721, который характеризуется следующими показателями качества: скорость кодирования — 32 кбит/с, качество

кодирования речи — 4,1, сложность реализации — 7,2 MIPS, размер кадра — 0,125 мс, суммарная задержка — 30 мс.

Таблица 6.6

**Результаты вычисления значения компонент
глобального вектора приоритетов**

| № | Тип кодека | Компоненты векторов приоритетов речевых кодеков по отношению к показателям качества | | | | | |
|----|---------------|--|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | | P_{1j} | P_{2j} | P_{3j} | P_{4j} | P_{5j} | \bar{f} |
| 1 | G 711 | 0,006 | 0,008 | 0,026 | 0,005 | 0,003 | 0,0098 |
| 2 | G 721 | 0,123 | 0,087 | 0,139 | 0,014 | 0,115 | 0,1083 |
| 3 | G 722 | 0,012 | 0,009 | 0,024 | 0,006 | 0,035 | 0,0143 |
| 4 | G 722(a) | 0,007 | 0,128 | 0,028 | 0,007 | 0,0387 | 0,0443 |
| 5 | G 722(b) | 0,006 | 0,093 | 0,031 | 0,007 | 0,042 | 0,0353 |
| 6 | G 723.1(a) | 0,016 | 0,005 | 0,014 | 0,15 | 0,006 | 0,0227 |
| 7 | G 723.1 | 0,018 | 0,016 | 0,013 | 0,16 | 0,006 | 0,0271 |
| 8 | G 726 | 0,037 | 0,007 | 0,106 | 0,016 | 0,115 | 0,0411 |
| 9 | G 726(a) | 0,116 | 0,055 | 0,099 | 0,015 | 0,094 | 0,0893 |
| 10 | G 726(b) | 0,012 | 0,015 | 0,094 | 0,009 | 0,052 | 0,0271 |
| 11 | G 727 | 0,106 | 0,006 | 0,075 | 0,012 | 0,083 | 0,0672 |
| 12 | G 727(a) | 0,096 | 0,056 | 0,075 | 0,013 | 0,073 | 0,0753 |
| 13 | G 727(b) | 0,012 | 0,016 | 0,064 | 0,009 | 0,067 | 0,0236 |
| 14 | G 728 | 0,072 | 0,031 | 0,004 | 0,032 | 0,066 | 0,0481 |
| 15 | G 729 | 0,027 | 0,054 | 0,007 | 0,084 | 0,021 | 0,0358 |
| 16 | G 729a | 0,026 | 0,020 | 0,053 | 0,074 | 0,01 | 0,0318 |
| 17 | G 729b | 0,024 | 0,048 | 0,006 | 0,077 | 0,011 | 0,0318 |
| 18 | G 729ab | 0,023 | 0,022 | 0,042 | 0,066 | 0,013 | 0,0288 |
| 19 | G 729e | 0,021 | 0,073 | 0,003 | 0,060 | 0,015 | 0,0354 |
| 20 | G 729e(a) | 0,041 | 0,079 | 0,004 | 0,055 | 0,019 | 0,0354 |

| № | Тип кодека | Компоненты векторов приоритетов речевых кодеков по отношению к показателям качества | | | | | |
|----|------------|---|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | | P_{1j} | P_{2j} | P_{3j} | P_{4j} | P_{5j} | \bar{I} |
| 21 | G 727(c) | 0,072 | 0,038 | 0,060 | 0,011 | 0,042 | 0,056 |
| 22 | G 728(a) | 0,045 | 0,086 | 0,012 | 0,028 | 0,045 | 0,0503 |
| 23 | G 729d | 0,019 | 0,035 | 0,009 | 0,079 | 0,017 | 0,0264 |
| | \bar{P} | 0,466 | 0,268 | 0,154 | 0,073 | 0,037 | |

6.3. Исследование разных методов выбора предпочтительного варианта речевого кодека

Исследуем практические особенности применения других методов выбора единственного предпочтительного проектного варианта средств телекоммуникаций с учетом совокупности показателей качества, которые описаны в п. 2.4. В частности, рассмотрим методы, которые базируются на основных положениях теории полезности, теории размытых множеств и лексографических отношений. Эти методы в той или иной форме учитывают дополнительную информацию о предпочтениях сравниваемых вариантов, которая получается от экспертов [194].

Для проведения сравнительного анализа речевых кодеков и выбора единственного предпочтительного варианта разными методами использованы преобразованные данные о речевых кодеках (табл. 6.3). Рассмотрены практические особенности применения описанных в п. 2.4 методов выбора единственного предпочтительного решения с учетом совокупности показателей качества, а также дополнительной информации, получаемой от экспертов.

6.3.1. Исследование метода выбора предпочтительного варианта, основанного на теории полезности

В этом методе выбора предпочтительного варианта использовалась скалярная функции ценности, определяемая соотношением (2.10). От экспертов поступает информация о значениях весовых коэффициентов I_i , $i = 1, m$, характеризующих относительную важ-

ность показателей качества речевых кодеков. Эти коэффициенты получают в результате специальной обработки информации, получаемой от группы экспертов [195, 196, 204].

В табл. 6.7 приведены значения функции ценности (2.10) для разных случаев распределения важности показателей качества согласно мнению экспертов.

Видно, что при разных выбранных значениях $A_i, i = \overline{1, m}$ экстремальное значение функции ценности (2.10) получается для одного и того же речевого кодека, соответственно G 722(a).

Таблица 6.7

Значения функций ценности для речевых кодеков

| № варианта | Тип кодека | Значение функции ценности показателей качества при разных значениях весовых коэффициентов | |
|------------|------------|---|---|
| | | $c_1 = 0,3$ $c_2 = 0,25$ $c_3 = 0,2$ $c_4 = 0,15$ $c_5 = 0,1$ | $c_1 = 0,2$ $c_2 = 0,3$ $c_3 = 0,15$ $c_4 = 0,1$ $c_5 = 0,25$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | G 711 | 0,436 | 0,321 |
| 2 | G 721 | 0,558 | 0,638 |
| 3 | G 722 | 0,447 | 0,499 |
| 4 | G 722(a) | 0,698 | 0,778 |
| 5 | G 722(b) | 0,624 | 0,667 |
| 6 | G 723.1(a) | 0,228 | 0,255 |
| 7 | G 723.1 | 0,324 | 0,368 |
| 8 | G 726 | 0,325 | 0,411 |
| 9 | G 726(a) | 0,476 | 0,57 |
| 10 | G 726(b) | 0,47 | 0,541 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|-----------|--------|-------|
| 11 | G 727 | 0,32 | 0,407 |
| 12 | G 727(a) | 0,471 | 0,566 |
| 13 | G 727(b) | 0,465 | 0,537 |
| 14 | G 728 | 0,258 | 0,406 |
| 15 | G 729 | 0,2634 | 0,373 |
| 16 | G 729a | 0,324 | 0,40 |
| 17 | G 729b | 0,261 | 0,371 |
| 18 | G 729ab | 0,313 | 0,397 |
| 19 | G 729e | 0,257 | 0,376 |
| 20 | G 729e(a) | 0,283 | 0,396 |
| 21 | G 727(c) | 0,372 | 0,492 |
| 22 | G 728(a) | 0,317 | 0,466 |
| 23 | G 729d | 0,250 | 0,357 |

6.3.2. Исследование метода выбора предпочтительного варианта, основанного на теории размытых множеств

В этом методе единственный предпочтительный вариант выбирается из условия экстремума скалярной функции принадлежности (2.12). Здесь от экспертов поступает информация о значении коэффициента β , определяющей характер изменения этой функции.

В табл. 6.8, для примера, приведены значения скалярной функции принадлежности для двух значений коэффициента β . Видно, что при этом экстремальное значение функции в зависимости от заданного значения β (при $\beta = 2$ и $\beta = 3$) достигается для одного и того же речевого кодека. Это речевой кодек G 722(b).

Таблица 6.8

Значения функции принадлежности для речевых кодеков

| № варианта | Тип кодека | Значения для разных β | |
|------------|------------|-----------------------------|-------------|
| | | $\beta = 2$ | $\beta = 3$ |
| 1 | G 711 | 0,30686 | 0,25084 |
| 2 | G 721 | 0,35099 | 0,24688 |
| 3 | G 722 | 0,32189 | 0,25886 |
| 4 | G 722(a) | 0,35039 | 0,28188 |
| 5 | G 722(b) | 0,35476 | 0,28532 |
| 6 | G 723.1(a) | 0,31677 | 0,25791 |
| 7 | G 723.1 | 0,32314 | 0,26308 |
| 8 | G 726 | 0,30827 | 0,25309 |
| 9 | G 726(a) | 0,32369 | 0,26294 |
| 10 | G 726(b) | 0,32863 | 0,26445 |
| 11 | G 727 | 0,30625 | 0,25165 |
| 12 | G 727(a) | 0,32177 | 0,26154 |
| 13 | G 727(b) | 0,32675 | 0,26307 |
| 14 | G 728 | 0,27801 | 0,24056 |
| 15 | G 729 | 0,26904 | 0,22785 |
| 16 | G 729a | 0,29102 | 0,23837 |
| 17 | G 729b | 0,26866 | 0,22771 |
| 18 | G 729ab | 0,28717 | 0,23581 |
| 19 | G 729e | 0,26722 | 0,22832 |
| 20 | G 729e(a) | 0,26912 | 0,22898 |
| 21 | G 727(c) | 0,30863 | 0,25622 |
| 22 | G 728(a) | 0,28813 | 0,24582 |
| 23 | G 729d | 0,26927 | 0,22716 |

6.3.3. Исследование метода выбора предпочтительного варианта, основанного на лексографических отношениях

Для иллюстрации выбора единственного предпочтительного варианта с помощью метода, основанного на лексографических отношениях в табл. 6.9 приведены данные по речевым кодекам, которые соответствуют следующему упорядочению по важности показателей качества:

- 1 — оценка качества кодирования речи;
- 2 — суммарная задержка;
- 3 — скорость кодирования;
- 4 — сложность реализации;
- 5 — размер кадра.

Таблица 6.9

Выбор предпочтительного речевого кодека при строго упорядоченных по важности показателях качества

| № | Тип кодека | $K_{1=}$ | $K'_{2=}$ | $K_{3=}$ | $K'_{4=}$ | $K_{5=}$ |
|----|------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| 1 | G 711 | 0,851 | 0,515 | 1 | 0,604 | 0,004 |
| 2 | G 721 | 0,911 | 1 | 0,5 | 1 | 0,004 |
| 3 | G 722 | 0,851 | 0,969 | 0,75 | 0,604 | 0,004 |
| 4 | G 722(a) | 1 | 0,969 | 0,875 | 0,604 | 0,004 |
| 5 | G 722(b) | 0,918 | 0,969 | 1 | 0,604 | 0,004 |
| 6 | G 723.1(a) | 0,8 | 0,818 | 0,083 | 0,439 | 1 |
| 7 | G 723.1 | 0,867 | 0,818 | 0,1 | 0,424 | 1 |
| 8 | G 726 | 0,822 | 1 | 0,375 | 0,748 | 0,004 |
| 9 | G 726(a) | 0,9 | 1 | 0,5 | 0,748 | 0,004 |
| 10 | G 726(b) | 0,866 | 1 | 0,625 | 0,748 | 0,004 |
| 11 | G 727 | 0,822 | 1 | 0,375 | 0,727 | 0,004 |
| 12 | G 727(a) | 0,9 | 1 | 0,5 | 0,727 | 0,004 |
| 13 | G 727(b) | 0,866 | 1 | 0,625 | 0,727 | 0,004 |

| № | Тип кодека | $K_{1=}$ | $K'_{2=}$ | $K_{3=}$ | $K'_{4=}$ | $K_{5=}$ |
|----|------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| 14 | G 728 | 0,889 | 1 | 0,25 | 0,281 | 0,021 |
| 15 | G 729 | 0,9 | 0,879 | 0,125 | 0,317 | 0,333 |
| 16 | G 729a | 0,878 | 0,879 | 0,125 | 0,669 | 0,333 |
| 17 | G 729b | 0,9 | 0,879 | 0,125 | 0,309 | 0,333 |
| 18 | G 729ab | 0,878 | 0,879 | 0,125 | 0,626 | 0,333 |
| 19 | G 729e | 0,911 | 0,879 | 0,125 | 0,237 | 0,333 |
| 20 | G 729e(a) | 0,915 | 0,879 | 0,184 | 0,237 | 0,333 |
| 21 | G 727(c) | 0,889 | 1 | 0,25 | 0,727 | 0,004 |
| 22 | G 728(a) | 0,911 | 1 | 0,2 | 0,453 | 0,021 |
| 23 | G 729d | 0,889 | 0,879 | 0,1 | 0,359 | 0,333 |

Из табл. 6.9 видно, что согласно этому методу варианта выбран предпочтительный речевой кодек G 722(a). В случае другого упорядочивания показателей качества по важности может быть выбран другой предпочтительный вариант речевого кодека.

6.3.4. Исследование метода выбора предпочтительного варианта, основанного на методе экспертного оценивания

Проведен сравнительный анализ речевых кодеков балльным оцениванием, когда эксперт сравнивает по предпочтительности все объекты одновременно [196]. Используются данные о 23 речевых кодеках, описанные совокупностью из 5-ти технико-экономических показателей (табл. 6.3). После проведения вычислений согласно (2.11)–(2.17) в табл. 6.10 представлен выбор единственного речевого кодека с учетом мнения экспертов. Видно, что согласно методу экспертного оценивания следует выбрать речевой кодек G 722(b), который соответствует наибольшей балльной оценке.

Таблица 6.10

**Выбор предпочтительного речевого кодека,
методом экспертного оценивания**

| № | Тип кодека | Оценки разных экспертов | | | | | | | | | | Средняя оценка |
|----|------------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1 | G 711 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3,2 |
| 2 | G 721 | 9 | 10 | 9 | 10 | 9 | 10 | 9 | 8 | 10 | 9 | 9,3 |
| 3 | G 722 | 6 | 7 | 5 | 6 | 6 | 7 | 6 | 5 | 7 | 5 | 6,0 |
| 4 | G 722(a) | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8,6 |
| 5 | G 722(b) | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9,9 |
| 6 | G 723.1(a) | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 4 | 5 | 5 | 6 | 5,2 |
| 7 | G 723.1 | 7 | 8 | 7 | 7 | 7 | 9 | 8 | 5 | 6 | 6 | 7,0 |
| 8 | G 726 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 3,7 |
| 9 | G 726(a) | 6 | 5 | 7 | 6 | 7 | 7 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6,1 |
| 10 | G 726(b) | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 8 | 7 | 8 | 7,5 |
| 11 | G 727 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 | 2 | 2,6 |
| 12 | G 727(a) | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5,5 |
| 13 | G 727(b) | 7 | 8 | 7 | 8 | 6 | 6 | 6 | 7 | 8 | 7 | 7,0 |
| 14 | G 728 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1,4 |
| 15 | G 729 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1,2 |
| 16 | G 729a | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2,6 |
| 17 | G 729b | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1,2 |
| 18 | G 729ab | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1,6 |
| 19 | G 729e | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1,4 |
| 20 | G 729e(a) | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1,4 |
| 21 | G 727(c) | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3,9 |
| 22 | G 728(a) | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 2,3 |
| 23 | G 729d | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1,4 |

6.4. Исследование выбора подмножества Парето–оптимальных вариантов речевых кодеков

Как показали исследования, эффективность применения методов выбора предпочтительных варианта выше, чем меньше количество сравниваемых проектных вариантов. Поэтому рационально вначале вводить этап выделения подмножества Парето-оптимальных вариантов, в процессе которого будут отброшены безусловно худшие варианты. Поэтому рассмотрены практические особенности применения метода выделения подмножества Парето-оптимальных вариантов речевых кодеков с последующим выбором единственного предпочтительного варианта из подмножества Парето [199, 204, 223, 233].

Из исходного множества 23 вариантов речевых кодеков с учетом совокупности 5-ти показателей качества (табл. 6.3) выделено согласно (2.7) подмножество Парето, которое включает 12 вариантов речевых кодеков (отмечены в табл. 6.11 знаком +).

Единственный предпочтительный вариант речевого кодека из подмножества Парето-оптимальных вариантов выбирался из условия экстремума скалярной целевой функции принадлежности (2.12) при двух разных значениях коэффициента β , определяющей характер изменения этой функции.

Таблица 6.11

Результаты выбора подмножества Парето-оптимальных вариантов речевых кодеков

| № варианта | Тип кодека | Выбор Парето-оптимальных вариантов |
|-------------------|-------------------|---|
| 1 | G 711 | – |
| 2 | G 721 | + |
| 3 | G 722 | – |
| 4 | G 722(a) | + |
| 5 | G 722(b) | + |
| 6 | G 723.1(a) | + |

| № варіанта | Тип кодека | Выбор Парето-оптимальных вариантов |
|---------------|---------------|---------------------------------------|
| 7 | G 723.1 | + |
| 8 | G 726 | – |
| 9 | G 726(a) | – |
| 10 | G 726(b) | + |
| 11 | G 727 | – |
| 12 | G 727(a) | – |
| 13 | G 727(b) | – |
| 14 | G 728 | + |
| 15 | G 729 | + |
| 16 | G 729a | + |
| 17 | G 729b | – |
| 18 | G 729ab | – |
| 19 | G 729e | – |
| 20 | G 729e(a) | + |
| 21 | G 727(c) | – |
| 22 | G 728(a) | + |
| 23 | G 729d | + |

В табл. 6.12 приведены значения целевой функции принадлежности (2.12) для Парето-оптимальных вариантов речевых кодеков при $\beta = 2$ и $\beta = 3$. Получено, что при этом экстремальное значение функции принадлежности достигается для одного и того же речевого кодека G 722(b) при разных значениях β . Это речевой кодек, который имеет следующие значения показателей качества: скорость кодирования — 64 кбит/с, оценка качества кодирования речи — 4,13 MOS, сложность реализации — 11,95 MIPS, размер кадра — 0,125 мс, суммарная задержка — 31,5 мс.

Таблица 6.12

**Значения функции принадлежности
для Парето-оптимальных вариантов речевых кодеков**

| № варианта | Тип кодека | Значение функции (2.12) при разных β | |
|------------|------------|--|-------------|
| | | $\beta = 2$ | $\beta = 3$ |
| 2 | G 721 | 0,35099 | 0,24688 |
| 4 | G 722(a) | 0,35039 | 0,28188 |
| 5 | G 722(b) | 0,35476 | 0,28532 |
| 6 | G 723.1(a) | 0,31677 | 0,25791 |
| 7 | G 723.1 | 0,32312 | 0,26308 |
| 10 | G 726(b) | 0,32863 | 0,26445 |
| 14 | G 728 | 0,27801 | 0,24056 |
| 15 | G 729 | 0,26904 | 0,22785 |
| 16 | G 729a | 0,29103 | 0,23837 |
| 20 | G 729e(a) | 0,26912 | 0,22898 |
| 22 | G 728(a) | 0,28812 | 0,24582 |
| 23 | G 729d | 0,26927 | 0,22716 |

**6.5. Сужение подмножества Парето-
оптимальных вариантов речевых кодеков
на основе метода анализа иерархий**

Рассмотрены особенности применения метода анализа иерархий для выбора единственного предпочтительного варианта речевого кодека из подмножества Парето-оптимальных вариантов [200–204, 223, 234]. Значения показателей качества Парето-оптимальных вариантов речевых кодеков взяты из табл. 6.3 и 6.10.

Построена матрица парных сравнений для совокупности показателей качества и вычислены оценки компонент собственного вектора и компонент вектора приоритетов показателей качества. Далее выполнены парные сравнения Парето-оптимальных вариантов

речевых кодеков по отношению к выбранным показателям качества: скорости кодирования, качеству кодирования речи, сложности реализации, размеру кадра, суммарной задержке. В результате обработки полученных матриц парных сравнений вычислены соответствующие собственные векторы и векторы приоритетов.

В табл. 6.13 приведена матрица вычисления парных сравнений 12-ти Парето-оптимальных речевых кодеков по отношению к сложности реализации, а также получены компоненты собственного вектора и вектора приоритетов согласно (2.19), (2.20).

Таблица 6.13

Матрица парных сравнений речевых кодеков по отношению к сложности реализации, а также соответствующие ей собственный вектор и вектор приоритетов

| | N2 | N4 | N5 | N6 | N7 | N10 | N14 | N15 | N16 | N20 | N22 | N23 | V_3 | P_{3j} |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|----------|
| N2 | 1 | 5 | 5 | 7 | 7 | 3 | 7 | 9 | 5 | 9 | 5 | 7 | 5,17 | 0,249 |
| N4 | 1/5 | 1 | 1/4 | 5 | 7 | 1/5 | 9 | 7 | 1/5 | 9 | 5 | 7 | 1,83 | 0,088 |
| N5 | 1/5 | 4 | 1 | 5 | 5 | 1/5 | 7 | 7 | 1/5 | 9 | 5 | 7 | 2,19 | 0,106 |
| N6 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1 | 3 | 1/7 | 7 | 5 | 1/7 | 7 | 3 | 5 | 1,02 | 0,049 |
| N7 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/7 | 7 | 5 | 1/7 | 5 | 3 | 7 | 0,83 | 0,04 |
| N10 | 1/3 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1 | 9 | 9 | 3 | 9 | 7 | 7 | 4,33 | 0,209 |
| N14 | 1/7 | 1/9 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/9 | 1 | 1/7 | 1/9 | 3 | 1/7 | 1/5 | 0,21 | 0,01 |
| N15 | 1/9 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1/9 | 7 | 1 | 1/7 | 5 | 1/7 | 1/5 | 0,33 | 0,016 |
| N16 | 1/5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 1/3 | 9 | 7 | 1 | 9 | 7 | 9 | 3,46 | 0,167 |
| N20 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/9 | 1/3 | 1/5 | 1/9 | 1 | 1/9 | 1/7 | 0,17 | 0,008 |
| N22 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/7 | 7 | 7 | 1/7 | 9 | 1 | 5 | 0,76 | 0,037 |
| N23 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/7 | 1/7 | 5 | 5 | 1/9 | 7 | 1/5 | 1 | 0,44 | 0,021 |

Аналогично получены оценки векторов приоритетов $\vec{P}_j, j = \overline{1,5}$ по отношению к скорости кодирования, к задержке при кодировании, размеру кадра, сложности реализации, качеству кодирования речи. Они приведены в табл. 6.14. В этой же таблице приведены также полученные ранее компоненты вектора приоритетов пока-

зателей качества \vec{P} . С их использованием вычислены значения компонент глобального вектора приоритетов \vec{C} согласно (2.21), которые приведены в последнем столбце табл. 6.14.

Согласно метода анализа иерархий по максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов \vec{C} выбирается единственный предпочтительный речевой кодек. Таким является речевой кодек G.721, который характеризуется следующими показателями качества: скорость кодирования — 32 кбит/с, качество кодирования речи — 4,1, сложность реализации — 7,2 MIPS, размер кадра — 0,125 мс, суммарная задержка — 30 мс.

Таблица 6.14

Результаты вычисления компонент глобального вектора приоритетов

| № | Типы кодека | Компоненты векторов приоритетов речевых кодеков по отношению к показателям качества P_{ij} , $j = \overline{1,12}$ | | | | | Компоненты вектора глобальных приоритетов \vec{C} |
|---------------------------|-------------|--|----------|----------|----------|----------|---|
| | | P_{1j} | P_{2j} | P_{3j} | P_{4j} | P_{5j} | |
| 1 | G 721 | 0,26 | 0,13 | 0,25 | 0,02 | 0,21 | 0,2 |
| 2 | G 722a | 0,02 | 0,24 | 0,09 | 0,01 | 0,09 | 0,09 |
| 3 | G 722b | 0,01 | 0,15 | 0,11 | 0,01 | 0,09 | 0,07 |
| 4 | G 723.1a | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 0,23 | 0,01 | 0,04 |
| 5 | G 723.1 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,26 | 0,01 | 0,05 |
| 6 | G 726b | 0,02 | 0,02 | 0,21 | 0,02 | 0,15 | 0,06 |
| 7 | G 728 | 0,22 | 0,05 | 0,01 | 0,04 | 0,17 | 0,13 |
| 8 | G 729 | 0,06 | 0,08 | 0,02 | 0,11 | 0,05 | 0,06 |
| 9 | G 729a | 0,06 | 0,03 | 0,17 | 0,09 | 0,02 | 0,07 |
| 10 | G 729ea | 0,01 | 0,09 | 0,01 | 0,08 | 0,04 | 0,08 |
| 11 | G 728a | 0,12 | 0,11 | 0,04 | 0,03 | 0,12 | 0,1 |
| 12 | G 729d | 0,05 | 0,06 | 0,02 | 0,1 | 0,04 | 0,05 |
| $P_i, i = \overline{1,5}$ | | 0,47 | 0,27 | 0,15 | 0,07 | 0,04 | |

6.6. Программная реализация многокритериального выбора предпочтительных вариантов методом анализа иерархий

Для выбора оптимальных проектных решений методом анализа иерархий создан соответствующая программная реализация в среде Excel. Она решает следующие задачи:

- задание матриц парных сравнений;
- расчет основных параметров согласно методу анализа иерархий;
- вычисление собственных векторов и вектора глобальных приоритетов.

На рис. 6.4 для примера приведены некоторые результаты работы программы. Показана матрица парных сравнений 12 вариантов речевых кодеков. Здесь же приведены компоненты собственного вектора, вектора приоритетов и глобального вектора приоритетов, вычисленные в среде Excel по формулам (2.19), (2.20). В последнем столбце приведены компоненты вектора глобальных приоритетов, по максимальному значению которых и выбирается предпочтительный вариант.

Выбор единственного предпочтительного проектного варианта с учетом совокупности показателей качества и привлечения дополнительной информации от экспертов, основанный на методе анализа иерархий, реализован в программе, созданной в среде Excel.

| S18 | | fx =CYMM(S4:S15) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|---------|---------|--------|---|--|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | K2 | K4 | K5 | K6 | K7 | K10 | K14 | K15 | K16 | K20 | K22 | K23 | | | | | V | P | | |
| 5 | N4 | 1/4 | 1 | 2 | 1/6 | 1/6 | 1/4 | 1/6 | 1/6 | 1/6 | 1/6 | 1/4 | 1/4 | 11+08 | 2E-07 | 0,27 | 0,26113 | 0,0151 | | |
| 6 | N5 | 1/4 | 1/2 | 1 | 1/6 | 1/6 | 1/4 | 1/6 | 1/6 | 1/6 | 1/6 | 1/6 | 1/6 | 2E-08 | 0,23 | 0,01257 | 0,03449 | | | |
| 7 | K6 | 1/5 | 6 | 6 | 1 | 1/3 | 4 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 0,003 | 0,62 | 0,04485 | | | |
| 8 | K7 | 1/5 | 6 | 6 | 3 | 1 | 4 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/2 | 0,046 | 0,77 | 0,04285 | | | | |
| 9 | K10 | 1/5 | 4 | 4 | 1/5 | 1/5 | 1 | 1/4 | 1/4 | 1/4 | 1/4 | 1/4 | 1/4 | 3E-05 | 0,42 | 0,02334 | | | | |
| 10 | K14 | 1/5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 4 | 1 | 7 | 7 | 5 | 5 | 7 | 11+07 | 3,89 | 0,21560 | | | | |
| 11 | K15 | 1/7 | 6 | 6 | 3 | 3 | 4 | 1/7 | 1 | 2 | 1/3 | 1/3 | 3 | 6,348 | 1,17 | 0,06463 | | | | |
| 12 | K16 | 1/7 | 6 | 6 | 3 | 3 | 4 | 1/7 | 1/2 | 1 | 1/3 | 1/3 | 3 | 1,587 | 1,04 | 0,05758 | | | | |
| 13 | K20 | 1/7 | 6 | 6 | 3 | 3 | 4 | 1/5 | 5 | 5 | 1 | 1/2 | 3 | 1,389 | 1,83 | 0,10127 | | | | |
| 14 | K22 | 1/7 | 4 | 6 | 5 | 5 | 4 | 1/5 | 5 | 5 | 2 | 1 | 5 | 17143 | 2,25 | 0,12486 | | | | |
| 15 | K23 | 1/5 | 4 | 6 | 3 | 2 | 4 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1 | 0,122 | 0,84 | 0,0465 | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | 3,07 | 53,5 | 59 | 33,53 | 29,87 | 38,5 | 7,698 | 27,08 | 28,58 | 16,983 | 15,167 | 28,5 | | | Сумм: | 18 | 1 | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | Сумм | | | | |
| 20 | | 0,8 | 0,808 | 0,742 | 1,157 | 1,28 | 0,899 | 1,66 | 1,751 | 1,646 | 1,7198 | 1,8937 | 1,325 | 15,7 | | | | | | |

Рис. 6.5. Некоторые результаты работы программы по выбору предпочтительного варианта на основе метода анализа иерархий

Построение иерархии также было произведено в системе поддержки принятия решений (СППР) «Решение»[233]. На рис. 6.6 показана декомпозиция задачи выбора с помощью иерархии сравнения кодеков в программе СППР «Решение». В окне программы видно структурирование проблемы выбора в виде иерархии, которая включает три уровня: уровень 1 — цель выбора (проблема), уровень 2 — показатели качества (критерии), уровень 3 — 12 вариантов речевых кодеков (альтернативы).

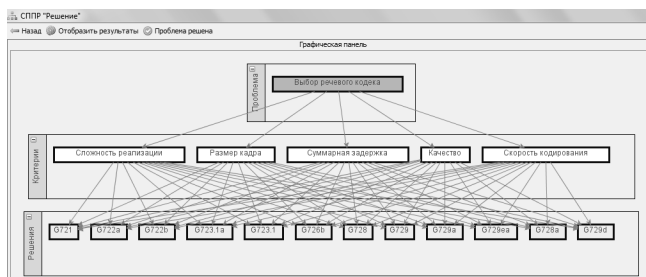


Рис. 6.6. Декомпозиция задачи выбора с помощью иерархии сравнения кодеков в СППР «Решение»

В программе СППР «Решение» построена матрица парных сравнений для совокупности показателей качества (т. е. на втором уровне иерархии). Для заполнения этой таблицы с помощью опытного эксперта выполнены парные сравнения важности показателей качества речевых кодеков. Диагональ этой матрицы заполнена значениями «1», а элементы матрицы, лежащие ниже диагонали, заполнены обратными значениями. Результаты вычисления значений компонент вектора приоритетов показателей качества приведены на рис. 6.7.

| | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | Приоритеты |
|-------------------------|-----|-----|----|-----|-----|------------|
| 1. Сложность реализации | 1 | 3 | 5 | 1/3 | 1/3 | 0,154 |
| 2. Размер кадра | 1/3 | 1 | 3 | 1/5 | 1/5 | 0,073 |
| 3. Суммарная задержка | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/7 | 1/7 | 0,037 |
| 4. Качество | 3 | 5 | 7 | 1 | 1/4 | 0,268 |
| 5. Скорость кодирования | 3 | 5 | 7 | 4 | 1 | 0,467 |

СЗ: 5,492 | ИС: 0,123 | ОС: 0,145

* Для сравнения критериев двойной клик на ячейке матрицы сравнения

Рис. 6.7. Матрица парных сравнений показателей качества и результаты вычисления компонент вектора приоритетов в СППР «Решение»

РАЗДЕЛ 7

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ ВЫБОРА ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ РАЗНЫХ ТИПОВ СРЕДСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

По результатам исследований в разделе 6 получено, что эффективным методом выбора предпочтительного проектного варианта является метод анализа иерархий. В данном разделе проведены исследования особенностей выбора единственного предпочтительного проектного варианта на основе МАИ для разных типов средств телекоммуникаций, в частности, модемов систем цифровой связи, технологий сетей мобильной связи 4-го поколения, стандартов в сетях цифрового телевидения, технологий массового обслуживания заявок, типов мобильных телефонов, протоколов маршрутизации в беспроводной сенсорно-актуаторной сети.

7.1. Выбор предпочтительного варианта модема в цифровых системах связи

Для сравнительного анализа были выбраны данные для модемов системы цифровой связи с разными видами многопозиционной модуляции, в частности, когерентная MPSK и некогерентная MFSK при различном числе позиций (кратности модуляции) M и заданной вероятности битовой ошибки. В качестве показателей качества выбраны эффективность использования полосы пропускания R/W и отношение сигнал/шум E_b/N_0 . На рис. 7.1 показана граничная зависимость этих показателей, а также приведены рабочие точки для когерентной MPSK и некогерентной MFSK при разных значениях M для вероятности битовой ошибки $P_b = 10^{-5}$ [88, 93, 224].

Предполагается, что до модуляции осуществляется фильтрация по Найквисту (идеальная прямоугольная), так что минимальная двойная полоса пропускания на промежуточной частоте (intermediate frequency — IF) $W_{IF} = 1/T$, где T — длительность битового символа. При этом эффективность использования полосы частот $R/W = \log_2 M$.

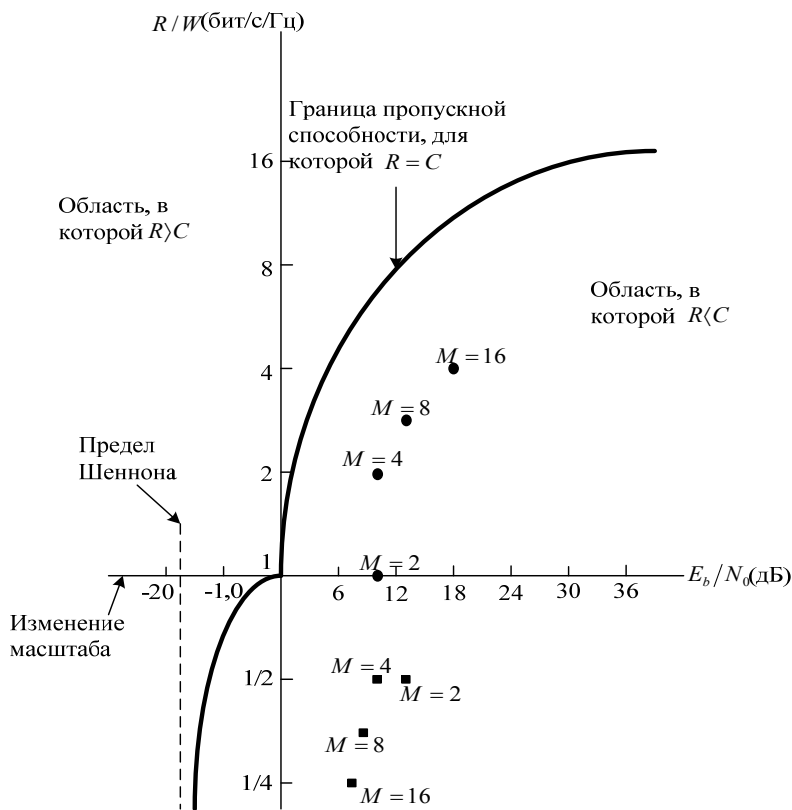


Рис. 7.1. Значения показателей качества для разных видов модуляции на плоскости «полоса–эффективность» (● — когерентная MPSK, ■ — некогерентная MFSK)

Видно, что при модуляции MPSK значение R/W растет с увеличением M . На рис. 7.1 также изображены рабочие точки для некогерентной ортогональной модуляции MFSK. Эффективность использования полосы частот равна $R/W = (\log_2 M) / M$. При модуляции MFSK R/W снижается с увеличением M . Положение рабочих точек MFSK указывает, что модуляции BFSK ($M = 2$) и квадратичная FSK ($M = 4$) имеют одинаковую эффективность использования полосы частот, хотя первая требует большего значения E_b/N_0 для той же вероятности битовой ошибки.

Таким образом, выбранные показатели качества систем носят конкурирующий характер. Поэтому для выбора предпочтительно-

го варианта вида и параметров модуляции в системах цифровой связи следует использовать методы многокритериального выбора. Будем рассматривать выбор предпочтительного варианта модема, который основан на методе анализа иерархий, описанного в п. 2.4. На рис. 7.2 показано иерархическое представление задачи выбора оптимального варианта модуляции в системе цифровой связи.

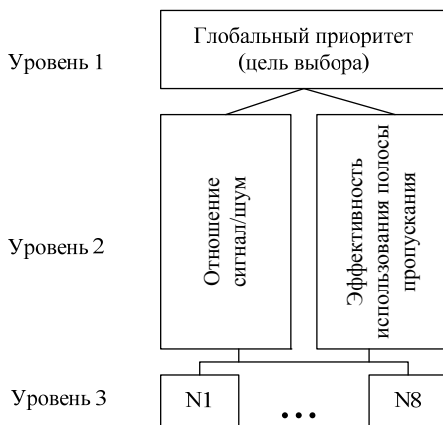


Рис. 7.2. Декомпозиция задачи выбора предпочтительного варианта модема

В табл. 7.1 представлены исходные данные для сравнения MPSK и MFSK [88, 93, 224, 247].

Таблица 7.1

Значения показателей качества вариантов систем цифровой связи с разным видом и параметрами модуляции

| Показатели качества систем | Варианты систем связи | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 |
| | MPSK | | | | MFSK | | | |
| | M = 2 | M = 4 | M = 8 | M = 16 | M = 2 | M = 4 | M = 8 | M = 16 |
| $K_1 = E_b/N_0$, бит/с/Гц | 10 | 10 | 13 | 18 | 13 | 10 | 8 | 7 |
| $K_2 = R/W$, дБ | 1 | 2 | 3 | 4 | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1/4 |

Исходные значения показателей качества K_1 и K_2 нормированы к максимальным значениям и приведены к сопоставимому виду согласно (6.4) и (6.5) (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Преобразованные значения показателей качества систем цифровой связи

| | $N1$ | $N2$ | $N3$ | $N4$ | $N5$ | $N6$ | $N7$ | $N8$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K_1 | 0,699 | 0,699 | 0,538 | 0,392 | 0,538 | 0,699 | 0,874 | 1 |
| K_2 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 0,125 | 0,125 | 0,083 | 0,063 |

Затем с учетом суждений экспертов сформированы матрицы парных сравнений указанных показателей качества, а также разных вариантов систем по отношению к каждому показателю качества. По этим матрицам вычислены компоненты главных собственных векторов и векторов приоритетов согласно (2.20) и (2.21) с использованием программного комплекса, созданного в среде EXEL. В табл. 7.3 приведены вычисленные оценки компоненты главного собственного вектора и вектора приоритетов показателей качества.

Таблица 7.3

Матрица парных сравнений показателей качества, компоненты главного собственного вектора и вектора приоритетов

| | K_1 | K_2 | V_n | P_n |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| K_1 | 1 | 1/2 | 0,707 | 0,333 |
| K_2 | 2 | 1 | 1,414 | 0,667 |

В табл. 7.4 приведена матрица парных сравнений вариантов систем связи с модуляциями MPSK и MFSK по отношению сигнал/шум E_b/N_0 , а также компоненты соответствующего ей собственного вектора и вектора приоритетов. В этой же таблице приведены также полученные компоненты вектора приоритетов показателя качества P_1 .

Таблица 7.4

**Матрица парных сравнений вариантов модуляции
по отношению к показателю качества K_1**

| | $N1$ | $N2$ | $N3$ | $N4$ | $N5$ | $N6$ | $N7$ | $N8$ | V_1 | P_1 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|-------|
| $N1$ | 1 | 2 | 3 | 5 | 3 | 2 | 1/3 | 1/5 | 1,3643 | 0,117 |
| $N2$ | 1/2 | 1 | 3 | 5 | 3 | 2 | 1/3 | 1/5 | 1,1472 | 0,098 |
| $N3$ | 1/3 | 1/3 | 1 | 3 | 2 | 1/3 | 1/5 | 1/7 | 0,5313 | 0,045 |
| $N4$ | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/7 | 1/9 | 0,2476 | 0,021 |
| $N5$ | 1/3 | 1/3 | 1/2 | 3 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/7 | 0,4468 | 0,038 |
| $N6$ | 1/2 | 1/2 | 3 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | 1/5 | 0,9647 | 0,082 |
| $N7$ | 3 | 3 | 5 | 7 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | 2,5099 | 0,214 |
| $N8$ | 5 | 5 | 7 | 9 | 7 | 5 | 3 | 1 | 4,4906 | 0,384 |

В табл. 7.5 приведена матрица парных сравнений вариантов модуляции MPSK и MFSK по отношению к эффективности использования полосы пропускания R/W , а также соответствующие ей собственный вектор и вектор приоритетов \vec{P}_2 .

Таблица 7.5

**Матрица парных сравнений вариантов модуляции
по отношению к показателю качества K_2**

| | $N1$ | $N2$ | $N3$ | $N4$ | $N5$ | $N6$ | $N7$ | $N8$ | V_2 | P_2 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| $N1$ | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/7 | 3 | 3 | 5 | 7 | 1,076 | 0,078 |
| $N2$ | 5 | 1 | 1/3 | 1/5 | 7 | 7 | 9 | 9 | 2,456 | 0,179 |
| $N3$ | 5 | 3 | 1 | 1/3 | 7 | 7 | 9 | 9 | 3,445 | 0,25 |
| $N4$ | 7 | 5 | 3 | 1 | 7 | 7 | 9 | 9 | 5,041 | 0,366 |
| $N5$ | 1/3 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1 | 2 | 5 | 5 | 0,685 | 0,05 |
| $N6$ | 1/3 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/2 | 1 | 5 | 5 | 0,576 | 0,042 |
| $N7$ | 1/5 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/5 | 1/5 | 1 | 3 | 0,275 | 0,02 |
| $N8$ | 1/7 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 0,201 | 0,015 |

Вычисленные значения компонент вектора приоритетов вариантов модуляции по отношению к показателям качества приведены в табл. 7.6 (первые два столбца). Здесь же в последней строке приведены компоненты вектора приоритетов показателей качества. Вычисленные согласно (2.21) компоненты вектора глобальных приоритетов \vec{C} приведены в последнем столбце табл. 7.6.

Таблица 7.6

Результаты вычисления компонент глобального вектора приоритетов модуляции

| Варианты | P_1 | P_2 | C |
|----------|-------|-------|---------|
| N1 | 0,117 | 0,078 | 0,09087 |
| N2 | 0,098 | 0,179 | 0,15227 |
| N3 | 0,045 | 0,25 | 0,18235 |
| N4 | 0,021 | 0,366 | 0,25215 |
| N5 | 0,038 | 0,049 | 0,04537 |
| N6 | 0,082 | 0,042 | 0,0552 |
| N7 | 0,214 | 0,02 | 0,08402 |
| N8 | 0,384 | 0,015 | 0,13677 |
| P | 0,33 | 0,67 | |

В рассмотренном множестве вариантов модуляций в системе цифровой связи по максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов предпочтительным вариантом модуляции является вариант N4. Ему соответствует система цифровой связи с когерентной MPSK при числе позиций $M = 16$, отношении сигнал/шум $E_b/N_0 = 18$ дБ и эффективности использования полосы пропускания $R/W = 4$ бит/с/Гц.

7.2. Выбор предпочтительного варианта системы телевизионного вещания стандартов

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий для выбора телевизионного вещания с разными стандартами DVB-T с многочастотной модуляцией COFDM и стандарта ATSC с 8-уровневой одночастотной амплитудной модуляцией [67, 226]. Основные показатели качества для систем с ОБП-8Т и COFDM приведены в табл. 7.7. Преимущество систем телевизионного вещания по каждому показателю качества в таблице отмечается кратным повторением значка + .

Таблица 7.7

Сравнение систем телевизионного вещания с разными стандартами

| | Характеристики систем телевизионного вещания | Стандарт ATSC | Стандарт DVB-T |
|----------|---|----------------------|-----------------------|
| K_1 | Характеристика системы в Гауссовом канале, сигнал-шум, дБ | 14,8 | 15,2 |
| K_2 | Иерархическая модуляция | нет | да |
| K_3 | Динамическая многолучевость | – | +++ |
| K_4 | Прием внутри помещения | – | +++ |
| K_5 | Прием в движении | – | +++ |
| K_6 | Эффективность использования спектра MFN SFN | + | – |
| | | – | +++ |
| K_7 | Импульсные шумы | ++ | – |
| K_8 | Гармоническая помеха | – | ++ |
| K_9 | Помехи от аналоговых ТВ систем в совпадающем канале | одинаково | одинаково |
| K_{10} | Помехи от цифрового телевидения в совпадающем канале | ++ | – |
| K_{11} | Чувствительность к фазовым шумам | ++ | – |
| K_{12} | Помехи аналоговым системам | низкие | средние |

Каждая система телевизионного вещания имеет свои преимущества и недостатки. В системе ATSC сигнал более устойчив в Гауссовом канале, менее чувствителен к импульсным шумам, имеет меньшее отношение пиковой к средней мощности в канале, более подходит для реализации многочастотных сетей вещания (MFN). Обе системы примерно равноценны по влиянию помех от аналогового телевидения и по воздействию отраженных сигналов низкого уровня. DVB-T имеет преимущества в условиях сильных отражений (до 0 дБ мощности отраженного сигнала по сравнению с основным), при значительном запаздывании и опережении отраженного сигнала, при динамической многолучевости (изменяющейся во времени), она более пригодна для одночастотных сетей (SFN) и приема в движении [67, 226].

Отношение пиковой к средней мощности сигнала. При прочих равных условиях ОБП-8Т имеет на 2,5 дБ более низкое отношение в 99,99% времени, что означает, что передатчик COFDM должен иметь больший запас по мощности.

Многолучевое распространение. ATSC имеет некоторое преимущество при приеме на направленную антенну, установленную высоко на крыше (уровень отраженной волны на 4...6 дБ ниже прямой), но совершенно теряет это преимущество при приеме на переносимые приемники и особенно в условиях динамической многолучевости.

Прием внутри помещения. Этот вопрос требует дальнейших исследований, но уже сейчас ясно, что только COFDM может обеспечить устойчивый прием на комнатную антенну.

Прием в движении. Как и для приема в помещении, только COFDM пригодна для приема на движущихся транспортных средствах.

Эффективность использования спектра. В режиме MFN некоторое преимущество имеет ATSC, так как из-за наличия защитного интервала скорость передачи в канале снижается на 24% ($D = 1/4$), 19% ($D = 1/8$), 10% ($D = 1/16$) или 7% ($D = 1/32$). Однако в режиме SFN преимущество DVB-T бесспорно.

Импульсные шумы. Теоретически COFDM должна бы иметь большую устойчивость к импульсным помехам вследствие усреднения коротких импульсов в процессоре быстрого преобразования Фурье на приеме, однако канальное кодирование и перемежение тоже играют важную роль. Благодаря более глубокому перемежению ATSC лучше справляется с импульсными шумами и вызываемыми ими пакетными ошибками.

Гармоническая помеха. Благодаря многочастотному характеру COFDM наличие гармонической или узкополосной помехи разрушит лишь небольшое число несущих, и потеря данных будет незначительна. Для одночастотной ОБП-8Т влияние может оказаться более существенным и привести к закрытию глазковой диаграммы. Преимущество COFDM достигает 10 дБ.

Помехи от аналоговых ТВ систем в совпадающем канале. Хотя COFDM и ОБП-8Т используют разные механизмы для устранения влияния помехи, в целом обе системы успешно справляются с этой задачей.

Помехи от цифрового телевидения в совпадающем канале. Сигналы систем ведут себя как Гауссов белый шум, и помеха определяется отношением C/N . Преимущество имеет ОБП-8Т.

Чувствительность к фазовым шумам. Теоретически COFDM более чувствительна к фазовым шумам гетеродинов приемника, которые вызывают дополнительное вращение фазы парциальных несущих и размывают ансамбль сигналов.

Иерархическая модуляция. Способность к иерархической модуляции, бесспорно, очень важное свойство COFDM, которым не обладает ОБП-8Т. Потоки разного приоритета могут использоваться для вещания разных программ или одной и той же программы на разные части зоны обслуживания, или для разных категорий абонентов.

На рис. 7.3 показано иерархическое представление задачи выбора систем телевизионного вещания с разными стандартами модуляции.

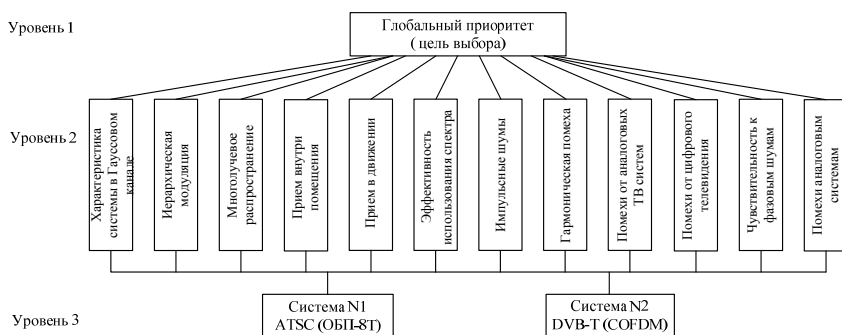


Рис. 7.3. Декомпозиция задачи выбора в иерархию сравнения систем телевизионного вещания с разными стандартами модуляции.

Таблица 7.8

Матрица парных сравнений показателей качества и вычисленные компоненты главного собственного вектора и вектора приоритетов

| Показатели качества | Показатели качества | | | | | | | | | | | | \vec{V} | \vec{P} |
|---------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 | K_6 | K_7 | K_8 | K_9 | K_{10} | K_{11} | K_{12} | | |
| K_1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 7 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 4,3679 | 0,2413 |
| K_2 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 5 | 3 | 4 | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 3,4213 | 0,1891 |
| K_3 | 1/5 | 1/3 | 1 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 7 | 7 | 2,4835 | 0,1372 |
| K_4 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1 | 4 | 6 | 5 | 3 | 3 | 5 | 3 | 5 | 1,6677 | 0,0921 |
| K_5 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1/4 | 1 | 4 | 3 | 7 | 7 | 5 | 3 | 5 | 1,4123 | 0,0781 |
| K_6 | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/6 | 1/4 | 1 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 7 | 1,1307 | 0,0624 |
| K_7 | 1/3 | 1/4 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 7 | 0,9974 | 0,0551 |
| K_8 | 1/5 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1 | 5 | 3 | 5 | 7 | 1,0087 | 0,0557 |
| K_9 | 1/5 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1/7 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 1 | 6 | 3 | 5 | 0,6381 | 0,0353 |
| K_{10} | 1/5 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 1/6 | 1 | 4 | 2 | 0,3708 | 0,0205 |
| K_{11} | 1/5 | 1/5 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1/4 | 1 | 3 | 0,3225 | 0,0178 |
| K_{12} | 1/7 | 1/5 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/2 | 1/3 | 1 | 0,2789 | 0,0154 |

В табл. 7.8 приведены матрица парных сравнений показателей качества, а также вычисленные согласно (2.20) оценки компонент собственного вектора и вектора приоритетов.

Для примера в табл. 7.9 приведена матрица парных сравнений систем телевизионного вещания $N1$ и $N2$, соответственно стандартов ОБП-8Т (АТSC) и COFDM (DVB-T и ISDB-T), а также соответствующего ей собственного вектора и вектора приоритетов по отношению к характеристике системы в Гауссовом канале. Аналогично проведены вычисления и по отношению к другим показателям качества [67, 226, 249].

Таблица 7.9

Парные сравнения систем по отношению к характеристике системы в Гауссовом канале

| Характеристика системы в Гауссовом канале | $N1$ | $N2$ | \vec{V} | \vec{P}_{ij} |
|---|------|------|-----------|----------------|
| $N1$ | 1 | 1/7 | 0,378 | 0,125 |
| $N2$ | 7 | 1 | 2,646 | 0,875 |

Полученные оценки векторов приоритетов для рассматриваемых систем \vec{P}_{ij} , $i = \overline{1,2}$, $j = \overline{1,2}$ в качестве столбцов приведены в табл. 7.10. В этой таблице приведены также полученные компоненты вектора приоритетов показателей качества \vec{P} . С их использованием вычислены согласно (2.22) значения компонент глобального вектора приоритетов \vec{C} . Результаты вычислений приведены в табл. 7.10.

Таблица 7.10

Результаты вычисления значений компонент вектора глобальных приоритетов

| Показатели качества | Компоненты вектора приоритетов показателей качества \vec{P}_n , | Компоненты вектора приоритетов для систем с разными стандартами | |
|---------------------|---|---|---------------------------------|
| | | \vec{P}_N (стандарт АТSC) | \vec{P}_N (стандарт DVB-T) |
| K_1 | 0,2413 | 0,125 | 0,875 |
| K_2 | 0,1891 | 0,099 | 0,9 |

| Показатели качества | Компоненты вектора приоритетов показателей качества \vec{P}_n , | Компоненты вектора приоритетов для систем с разными стандартами | |
|---|---|---|---------------------------------|
| | | \vec{P}_N (стандарт ATSC) | \vec{P}_N (стандарт DVB-T) |
| K_3 | 0,1372 | 0,25 | 0,75 |
| K_4 | 0,0921 | 0,099 | 0,9 |
| K_5 | 0,0781 | 0,099 | 0,9 |
| K_6 | 0,0624 | 0,167 | 0,833 |
| K_7 | 0,0551 | 0,833 | 0,167 |
| K_8 | 0,0557 | 0,125 | 0,875 |
| K_9 | 0,0353 | 0,334 | 0,666 |
| K_{10} | 0,0205 | 0,875 | 0,125 |
| K_{11} | 0,0178 | 0,833 | 0,167 |
| K_{12} | 0,0154 | 0,833 | 0,167 |
| Значение компонент вектора глобальных приоритетов \vec{C} | | 0,2211 | 0,7789 |

7.3. Выбор предпочтительного варианта построения систем массового обслуживания

При построении сетей связи часто приходится сталкиваться с системами, предназначенными для многоразового использования при решении однотипных задач. Возникающие при этом процессы получили название процессов обслуживания, а соответствующие системы — систем массового обслуживания (СМО) [113, 224, 253].

Неотъемлемой частью системы массового обслуживания является узел обслуживания, через который осуществляется взаимодействие входного и выходного потока заявок. Вид математической модели СМО зависит как от числа каналов n , так и от допустимой длины очереди m . По указанным признакам различается ряд типов СМО, которые перечисленных в табл. 7.11.

Типы систем массового обслуживания

| № п/п | Параметры СМО | | Тип СМО |
|----------|------------------|------------------|---|
| | n | m | |
| 1 | 1 | 0 | Одноканальная, без очереди |
| 2 | $n > 1$ | 0 | Многоканальная, без очереди |
| 3 | 1 | $1 < m < \infty$ | Одноканальная, с ограниченной очередью |
| 4 | $n > 1$ | $1 < m < \infty$ | Многоканальная, с ограниченной очередью |
| 5 | 1 | $m = \infty$ | Одноканальная, с неограниченной очередью |
| 6 | $n > 1$ | $m = \infty$ | Многоканальная, с неограниченной очередью |

Показатель нагрузки системы вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \bar{T}_{об}, \quad (7.1)$$

где λ – интенсивность входящего потока заявок;

μ – интенсивность потока обслуживания;

$\bar{T}_{об}$ – среднее время обслуживания заявок.

Вероятность простаивания СМО, т.е. вероятность того, что все каналы свободны

$$p_0 = 1 - \rho. \quad (7.2)$$

Интенсивность потока обслуживания

$$\mu = \frac{1}{\bar{T}_{об}}. \quad (7.3)$$

Среднее время ожидания заявки в очереди

$$\bar{T}_{ож} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}. \quad (7.4)$$

В табл. 7.13 представлены исходные и рассчитанные параметры согласно (7.1–7.4).

Таблица 7.12

Исходные данные для сравнительного анализа и выбора СМО

| Исходные параметры | Варианты СМО | | | | | | | | | | |
|------------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 | N9 | N10 | N11 |
| $\overline{T}_{об}$ | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 0,3 | 0,5 | 0,7 |
| λ | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,6 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,8 | 0,4 | 0,9 |
| Рассчитанные параметры | | | | | | | | | | | |
| ρ | 0,15 | 0,4 | 0,24 | 0,54 | 0,14 | 0,1 | 0,28 | 0,48 | 0,24 | 0,2 | 0,63 |
| p_0 | 0,85 | 0,6 | 0,76 | 0,46 | 0,86 | 0,9 | 0,72 | 0,52 | 0,76 | 0,8 | 0,37 |
| μ | 3,33 | 2 | 1,67 | 1,11 | 5 | 5 | 2,5 | 1,25 | 3,33 | 2 | 1,43 |
| $\overline{T}_{оч}$ | 0,05 | 1,11 | 0,19 | 1,06 | 0,03 | 0,02 | 0,16 | 0,74 | 0,09 | 0,13 | 1,19 |

Для нахождения предпочтительного варианта был использован метод анализа иерархий. Были выбраны следующие показатели качества:

$K_1 = \overline{T}_{об}$ — среднее время обслуживания заявок;

$K_2 = \rho$ — показатель нагрузки системы (трафик);

$K_3 = p_0$ — вероятность простаивания всей системы, т. е. вероятность того, что все каналы свободны;

$K_4 = \overline{T}_{оч}$ — среднее время ожидания заявки в очереди.

Таблица 7.13

Исходные значения показателей качества СМО

| Показатель | Варианты систем | | | | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 | N9 | N10 | N11 |
| $\overline{T}_{об}$ | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 0,3 | 0,5 | 0,7 |
| ρ | 0,15 | 0,4 | 0,24 | 0,54 | 0,14 | 0,1 | 0,28 | 0,48 | 0,24 | 0,2 | 0,63 |
| p_0 | 0,85 | 0,6 | 0,76 | 0,46 | 0,86 | 0,9 | 0,72 | 0,52 | 0,76 | 0,8 | 0,37 |
| $\overline{T}_{оч}$ | 0,05 | 1,11 | 0,19 | 1,06 | 0,03 | 0,02 | 0,16 | 0,74 | 0,09 | 0,13 | 1,19 |

Параметры СМО нормированы к максимальным значениям и приведены к сопоставимому виду согласно (6.4) и (6.5). В табл. 7.14 приведены преобразованные значения показателей качества СМО.

Таблица 7.14

Преобразованные значения показателей качества СМО

| Показатель | Варианты | | | | | | | | | | |
|------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 | N9 | N10 | N11 |
| K'_1 | 0,67 | 0,4 | 0,33 | 0,22 | 1 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,67 | 0,4 | 0,29 |
| K'_2 | 0,67 | 0,25 | 0,42 | 0,19 | 0,71 | 1 | 0,36 | 0,21 | 0,42 | 0,5 | 0,16 |
| K'_3 | 0,44 | 0,62 | 0,49 | 0,8 | 0,43 | 0,41 | 0,51 | 0,71 | 0,49 | 0,46 | 1 |
| K'_4 | 0,4 | 0,02 | 0,11 | 0,02 | 0,67 | 1 | 0,13 | 0,03 | 0,22 | 0,15 | 0,02 |

На рис. 7.4 показано иерархическое представление задачи выбора предпочтительного варианта СМО [224].

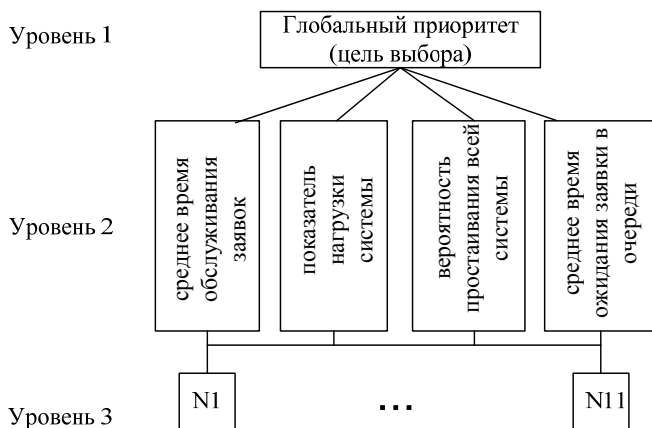


Рис. 7.4. Декомпозиция задачи выбора в иерархию сравнения СМО

В табл. 7.15 приведена матрица парных сравнений показателей качества вычисленная согласно (2.19) оценки компонент собственного вектора. По значениям компонент собственного вектора получены оценки компонент вектора приоритетов согласно (2.20).

Таблица 7.15

Матрица парных сравнений показателей качества

| | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | V_n | P_n |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K_1 | 1 | 3 | 5 | 5 | 2,94 | 0,55 |
| K_2 | 1/3 | 1 | 3 | 3 | 1,32 | 0,25 |
| K_3 | 1/5 | 1/3 | 1 | 4 | 0,72 | 0,13 |
| K_4 | 1/5 | 1/3 | 1/4 | 1 | 0,36 | 0,07 |

В табл. 7.16 приведена матрица парных сравнений СМО по отношению к среднему времени обслуживания заявок, а также компоненты соответствующего главного собственного вектора и вектора приоритетов.

В табл. 7.17 приведена матрица парных сравнений СМО по отношению к показателю нагрузки системы, а также компоненты соответствующего ей главного собственного вектора и вектора приоритетов.

В табл. 7.18 приведена матрица парных сравнений СМО по отношению к вероятности простаивания всей системы, а также компоненты соответствующего ей собственного вектора и вектора приоритетов.

Таблица 7.16

Матрица парных сравнений по отношению к среднему времени обслуживания заявок

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | N_6 | N_7 | N_8 | N_9 | N_{10} | N_{11} | V_1 | P_1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|
| N_1 | 1 | 3 | 5 | 9 | 1/3 | 1/3 | 4 | 7 | 2 | 3 | 5 | 2,36 | 0,147 |
| N_2 | 1/3 | 1 | 3 | 7 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 5 | 1/3 | 4 | 5 | 1,11 | 0,069 |
| N_3 | 1/5 | 1/3 | 1 | 5 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 5 | 1/5 | 1/3 | 3 | 0,61 | 0,038 |
| N_4 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1 | 1/9 | 1/9 | 1/7 | 1/3 | 1/9 | 1/7 | 1/3 | 0,19 | 0,012 |
| N_5 | 3 | 5 | 5 | 9 | 1 | 2 | 3 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3,88 | 0,241 |
| N_6 | 3 | 5 | 5 | 9 | 1/2 | 1 | 3 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3,42 | 0,213 |

Закінчення табл. 7.16

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | N_6 | N_7 | N_8 | N_9 | N_{10} | N_{11} | V_1 | P_1 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|
| N_7 | 1/4 | 3 | 3 | 7 | 1/3 | 1/3 | 1 | 7 | 1/4 | 3 | 5 | 1,42 | 0,088 |
| N_8 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 3 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 0,27 | 0,017 |
| N_9 | 1/2 | 3 | 5 | 9 | 1/3 | 1/3 | 4 | 7 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1,27 | 0,079 |
| N_{10} | 1/3 | 1/4 | 3 | 7 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 5 | 3 | 1 | 5 | 1,05 | 0,065 |
| N_{11} | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 3 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 3 | 5 | 1/5 | 1 | 0,5 | 0,031 |

Таблиця 7.17

**Матрица парных сравнений
по отношению к показателю нагрузки системы
и вычисленные компоненты вектора приоритетов**

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | N_6 | N_7 | N_8 | N_9 | N_{10} | N_{11} | V_2 | P_2 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|
| N_1 | 1 | 5 | 3 | 7 | 1/2 | 1/4 | 3 | 5 | 3 | 3 | 7 | 2,356 | 0,146 |
| N_2 | 1/5 | 1 | 1/5 | 3 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 6 | 1/5 | 1/3 | 5 | 0,575 | 0,036 |
| N_3 | 1/3 | 5 | 1 | 7 | 1/3 | 1/3 | 8 | 5 | 2 | 1/4 | 7 | 1,605 | 0,1 |
| N_4 | 1/7 | 1/3 | 1/7 | 1 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/4 | 1/7 | 1/5 | 3 | 0,272 | 0,017 |
| N_5 | 2 | 7 | 3 | 7 | 1 | 1/2 | 5 | 5 | 3 | 3 | 7 | 3,074 | 0,191 |
| N_6 | 4 | 5 | 3 | 7 | 2 | 1 | 3 | 5 | 3 | 3 | 9 | 3,518 | 0,218 |
| N_7 | 1/3 | 3 | 1/8 | 5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 5 | 1/8 | 1/6 | 7 | 0,728 | 0,045 |
| N_8 | 1/5 | 1/6 | 1/5 | 4 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1/3 | 3 | 0,401 | 0,025 |
| N_9 | 1/3 | 5 | 1/2 | 7 | 1/3 | 1/3 | 8 | 5 | 1 | 1/4 | 7 | 1,415 | 0,088 |
| N_{10} | 1/3 | 3 | 4 | 5 | 1/3 | 1/3 | 6 | 3 | 4 | 1 | 7 | 1,893 | 0,118 |
| N_{11} | 1/7 | 1/5 | 1/7 | 1/3 | 1/7 | 1/9 | 1/7 | 1/3 | 5 | 1/7 | 1 | 0,277 | 0,017 |

Таблица 7.18

**Матрица парных сравнений
по отношению к вероятности простаивания всей системы
и вычисленные компоненты вектора приоритетов**

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | N_6 | N_7 | N_8 | N_9 | N_{10} | N_{11} | V_3 | P_3 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|
| N_1 | 1 | 1/5 | 1/3 | 1/9 | 2 | 3 | 1/3 | 1/7 | 1/3 | 1/4 | 1/9 | 0,373 | 0,02 |
| N_2 | 5 | 1 | 3 | 1/5 | 5 | 5 | 3 | 1/3 | 3 | 5 | 1/5 | 1,636 | 0,089 |
| N_3 | 3 | 1/3 | 1 | 1/7 | 3 | 5 | 1/4 | 1/5 | 2 | 4 | 1/7 | 0,826 | 0,045 |
| N_4 | 9 | 5 | 7 | 1 | 9 | 9 | 7 | 3 | 7 | 7 | 1/3 | 4,277 | 0,232 |
| N_5 | 1/2 | 1/5 | 1/3 | 1/9 | 1 | 6 | 1/3 | 1/7 | 1/3 | 1/4 | 1/9 | 0,35 | 0,019 |
| N_6 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 1/9 | 1/6 | 1 | 1/5 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1/9 | 0,218 | 0,012 |
| N_7 | 3 | 1/3 | 4 | 1/7 | 3 | 5 | 1 | 1/5 | 4 | 6 | 1/7 | 1,175 | 0,064 |
| N_8 | 7 | 3 | 5 | 1/3 | 7 | 7 | 5 | 1 | 5 | 7 | 1/5 | 2,719 | 0,147 |
| N_9 | 3 | 1/3 | 1/2 | 1/7 | 3 | 5 | 1/4 | 1/5 | 1 | 7 | 1/7 | 0,766 | 0,042 |
| N_{10} | 4 | 1/5 | 1/4 | 1/7 | 4 | 3 | 1/6 | 5 | 1/7 | 1 | 1/7 | 0,626 | 0,034 |
| N_{11} | 9 | 5 | 7 | 3 | 9 | 9 | 7 | 5 | 7 | 7 | 1 | 5,47 | 0,297 |

В табл. 7.19 приведена матрица парных сравнений СМО по отношению к среднему времени ожидания заявки в очереди, а также компоненты соответствующего ей главного собственного вектора и вектора приоритетов.

Таблица 7.19

**Матрица парных сравнений по отношению к среднему времени
ожидания заявки в очереди и вычисленные компоненты
вектора приоритетов**

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | N_6 | N_7 | N_8 | N_9 | N_{10} | N_{11} | V_4 | P_4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|
| N_1 | 1 | 9 | 5 | 7 | 1/4 | 1/4 | 5 | 7 | 4 | 3 | 9 | 2,77 | 0,161 |
| N_2 | 1/9 | 1 | 1/7 | 1/4 | 1/9 | 1/9 | 1/5 | 1/5 | 1/7 | 1/5 | 2 | 0,23 | 0,014 |

Закінчення табл. 7.19

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | N_6 | N_7 | N_8 | N_9 | N_{10} | N_{11} | V_4 | P_4 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|
| N_3 | 1/5 | 7 | 1 | 5 | 1/5 | 1/5 | 1/2 | 3 | 1/3 | 1/6 | 7 | 0,85 | 0,049 |
| N_4 | 1/7 | 4 | 1/5 | 1 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1/7 | 1/5 | 6 | 0,38 | 0,022 |
| N_5 | 4 | 9 | 5 | 7 | 1 | 1/2 | 3 | 5 | 6 | 3 | 9 | 3,65 | 0,211 |
| N_6 | 4 | 9 | 5 | 7 | 2 | 1 | 5 | 5 | 3 | 5 | 9 | 4,27 | 0,247 |
| N_7 | 1/5 | 5 | 2 | 5 | 1/3 | 1/5 | 1 | 3 | 1/3 | 1/4 | 5 | 0,98 | 0,057 |
| N_8 | 1/7 | 5 | 1/3 | 3 | 1/5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/5 | 1/3 | 5 | 0,59 | 0,034 |
| N_9 | 1/4 | 7 | 3 | 7 | 1/6 | 1/3 | 3 | 5 | 1 | 3 | 7 | 1,8 | 0,104 |
| N_{10} | 1/3 | 5 | 6 | 5 | 1/3 | 1/5 | 4 | 5 | 1/3 | 1 | 5 | 1,53 | 0,089 |
| N_{11} | 1/9 | 1/2 | 1/7 | 1/6 | 1/9 | 1/9 | 1/5 | 1/5 | 1/7 | 1/5 | 1 | 0,2 | 0,011 |

Таблиця 7.20

**Результаты вычисления компонент
глобального вектора приоритетов в СМО**

| | P_{1j} | P_{2j} | P_{3j} | P_{4j} | C |
|-------|----------|----------|----------|----------|-------|
| N_1 | 0,147 | 0,146 | 0,02 | 0,161 | 0,131 |
| N_2 | 0,069 | 0,036 | 0,089 | 0,014 | 0,059 |
| N_3 | 0,038 | 0,01 | 0,045 | 0,049 | 0,032 |
| N_4 | 0,012 | 0,017 | 0,232 | 0,022 | 0,042 |
| N_5 | 0,241 | 0,191 | 0,019 | 0,211 | 0,197 |
| N_6 | 0,213 | 0,218 | 0,012 | 0,247 | 0,191 |
| N_7 | 0,088 | 0,045 | 0,064 | 0,057 | 0,071 |
| N_8 | 0,017 | 0,025 | 0,147 | 0,034 | 0,037 |
| N_9 | 0,079 | 0,088 | 0,042 | 0,104 | 0,078 |

| | P_{1j} | P_{2j} | P_{3j} | P_{4j} | C |
|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| N_{10} | 0,065 | 0,118 | 0,034 | 0,089 | 0,075 |
| N_{11} | 0,031 | 0,017 | 0,297 | 0,011 | 0,061 |
| P | 0,55 | 0,25 | 0,13 | 0,07 | |

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов \vec{C} (табл. 7.20) выбран предпочтительный вариант СМО с учетом совокупности показателей качества. Таким является СМО №5, который характеризуется средним временем обслуживания заявок $\overline{T_{об}} = 0,2$ ч, показателем нагрузки системы $\rho = 0,14$, вероятностью простаивания всей системы $p_0 = 0,86$, средним временем ожидания заявки в очереди $\overline{T_{оч}} = 0,03$ ч.

7.4. Выбор предпочтительного проектного варианта сети мобильной связи 3-го поколения

Для выбора единственного предпочтительного варианта из подмножества Парето-оптимальных проектных решений при планировании сетей мобильной связи 3-го поколения был использован метод анализа иерархий. При этом были использованы данные из табл. 4.9 для пяти Парето-оптимальных проектных вариантов СМС: №1, №5, №8, №9, №10. Эти параметры приведены к сопоставимому виду согласно (6.4) и (6.5). В табл. 7.21 представлены преобразованные значения показателей качества СМС.

На рис. 7.5 показано иерархическое представление задачи выбора предпочтительного проектного варианта СМС. Построена матрица парных сравнений для совокупности показателей качества СМС [113, 220, 221, 253].

Далее выполнены парные сравнения СМС на 3 уровне иерархии. В частности, выполнены парные сравнения ССМС по отношению к выбранным показателям качества. В результате обработки полученных матриц парных сравнений вычислены по описанной ранее методике главный собственный вектор и вектор приоритетов. В табл. 7.22 приведена матрица парных сравнений показателей

качества и вычисленные оценки компонент главного собственного вектора и вектора приоритетов показателей качества.

Таблица 7.21

**Преобразованные и нормированные
к максимальным значениям показатели качества**

| Варианты построения СМС | K'_1 | K'_2 | K'_3 |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| N1 (№1) | 0,2 | 0,865 | 1 |
| N2 (№5) | 0,286 | 1 | 0,522 |
| N3 (№8) | 0,5 | 0,739 | 0,74 |
| N4 (№9) | 1 | 0,953 | 0,616 |
| N5 (№10) | 1 | 0,984 | 0,5 |

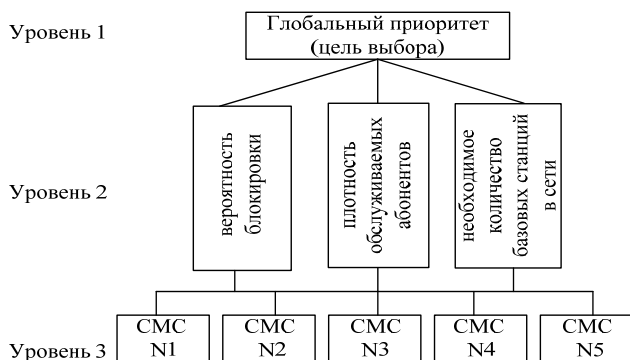


Рис. 7.5. Декомпозиция задачи выбора в иерархию сравнения СМС

Таблица 7.22

**Матрица парных сравнений показателей качества
и вычисленные компоненты вектора приоритетов**

| | K_1 | K_2 | K_3 | V_i | P_j |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| K_1 | 1 | 5 | 3 | 2,464 | 0,6173 |
| K_2 | 1/5 | 1 | 1/5 | 0,3424 | 0,0858 |
| K_3 | 1/3 | 5 | 1 | 1,1854 | 0,297 |

В табл. 7.23, 7.24, 7.25 приведены матрицы парных сравнений вариантов построения СМС по отношению к каждому показателю качества — вероятности блокировки, количеству базовых станций, а также компоненты соответствующих главных собственных векторов и векторов приоритетов.

Таблица 7.23

**Матрица парных сравнений
по отношению к вероятности блокировки**

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | V_1 | P_{1j} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| N_1 | 1 | 1/3 | 1/7 | 1/9 | 1/9 | 0,23 | 0,03 |
| N_2 | 3 | 1 | 1/7 | 1/9 | 1/9 | 0,35 | 0,04 |
| N_3 | 7 | 7 | 1 | 1/7 | 1/7 | 1 | 0,11 |
| N_4 | 9 | 9 | 7 | 1 | 2 | 4,08 | 0,47 |
| N_5 | 9 | 9 | 7 | 1/2 | 1 | 3,09 | 0,35 |

Таблица 7.24

**Матрица парных сравнений
по отношению к плотности обслуживаемых абонентов**

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | V_2 | P_{2j} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| N_1 | 1 | 1/5 | 3 | 1/3 | 1/5 | 0,53 | 0,07 |
| N_2 | 5 | 1 | 7 | 3 | 3 | 3,16 | 0,45 |
| N_3 | 1/3 | 1/7 | 1 | 1/5 | 1/7 | 0,27 | 0,04 |
| N_4 | 3 | 1/3 | 5 | 1 | 1/3 | 1,11 | 0,16 |
| N_5 | 5 | 1/3 | 7 | 3 | 1 | 2,04 | 0,29 |

Таблица 7.25

**Матрица парных сравнений
по отношению к количеству базовых станций**

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | V_3 | P_{3j} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| N_1 | 1 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3,74 | 0,51 |
| N_2 | 1/7 | 1 | 1/5 | 1/3 | 3 | 0,49 | 0,07 |
| N_3 | 1/3 | 5 | 1 | 3 | 5 | 1,9 | 0,26 |

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | V_3 | P_{3j} |
| N_4 | 1/5 | 3 | 1/3 | 1 | 3 | 0,9 | 0,12 |
| N_5 | 1/7 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 1 | 0,32 | 0,04 |

В табл. 7.26 приведенны вычисленные ранее векторы приоритетов показателей качества и вариантов построения СМС по отношению к каждому показателю качества, а также вычисленные согласно (2.21) компоненты вектора глобальных приоритетов \vec{C} .

Таблица 7.26

**Результаты вычисления компонент
глобального вектора приоритетов СМС 3-го поколения**

| <i>СМС</i> | P_{1j} | P_{2j} | P_{3j} | C |
|------------|----------|----------|----------|--------|
| N_1 | 0,03 | 0,07 | 0,51 | 0,1779 |
| N_2 | 0,04 | 0,45 | 0,07 | 0,0863 |
| N_3 | 0,11 | 0,04 | 0,26 | 0,1498 |
| N_4 | 0,47 | 0,16 | 0,12 | 0,3418 |
| N_5 | 0,35 | 0,29 | 0,04 | 0,2551 |
| P_j | 0,62 | 0,09 | 0,3 | |

Максимальному значению компонент вектора \vec{C} соответствует наиболее предпочтительный вариант СМС (N_4), который характеризуется минимальной допустимой вероятностью блокировки $P_{bl} = 0,02$, плотностью обслуживаемых абонентов $N_a/S_0 = 183$ аб./км² и количеством базовых станций $N_{BTS} = 18$.

7.5. Выбор предпочтительной технологии сетей мобильной связи 4-го поколения

Для сравнительного анализа были выбраны следующие технологии мобильной связи 4-го поколения: HSPA, WiMAX и LTE [104, 106, 133, 140].

Развитие технологии мобильной связи создало HSPA+ (HSPA релиз 7 и отдельные поправки релиза 8). В нисходящем канале их отличает модуляция 64-QAM с SIMO (1x2) или 64-QAM с SIMO (2x2). В восходящем канале добавлена модуляция 64-QAM и улучшены возможности для VoIP. Поправки в соответствии с релизом 8 позволяют использовать в нисходящем канале режим MIMO (2x2) с модуляцией 64-QAM, рассматривается возможность использования MIMO больших порядков в нисходящем канале и MIMO (2x2) — в восходящем канале.

Сети мобильной связи с технологией WiMAX предназначены для предоставления сервисов как неподвижным, так и подвижным пользователям. Мобильный WiMAX (релиз 1.5) имеет сравнимые с HSPA+ (релиз 8) пиковые скорости в нисходящем канале при одинаковой модуляции, скорости кодирования и ширине канала. При этом у мобильного WiMAX в восходящем канале пиковая скорость выше в 2–3 раза. Мобильный WiMAX поддерживает ширину канала до 20 МГц, как частотное, так и временное дуплексирование. Его частотные профили планируются в диапазонах 700, 1700, 2300, 2500 и 3500 МГц. Мобильный WiMAX обеспечивает «гладкую IP — сеть» (из конца в конец).

Следующим шагом эволюции систем 3GPP, являются системы Long Term Evolution (LTE). Их отличает технология OFDMA в нисходящем канале и SC-FDMA — в восходящем. Модуляция — до 64-QAM, ширина канала — до 20 МГц, дуплексирование TDD и FDD. Применены адаптивные антенные системы, гибкая сеть доступа. Сетевая архитектура полностью IP — сеть. В системе LTE применяются технологии и методы, уже применяемые в мобильном WiMAX, поэтому схожие эффективности систем LTE. Системы LTE — это революционное улучшение 3G. LTE представляет переход от систем CDMA к системам OFDMA, а также переход к полностью IP — системе с коммуникацией пакетов. Поэтому внедрение этой технологии на существующих сетях мобильной связи означает необходимость новых радиочастотных ресурсов для получения преимущества от широкополосного канала. Для обеспечения обратной совместимости необходимы двухрежимные абонентские устройства.

Мобильный WiMAX представляет собой гладкую IP-сеть, сеть LTE более сложна. Если сеть WiMAX основывается полностью на IP-протоколах IEEE, то сеть LTE более сложна, включает больше протоколов [104, 106, 133, 140, 249].

Показатели качества рассмотренных технологий СМС носят конкурирующий характер. Поэтому необходимо применять методы многокритериальной оптимизации для выбора предпочтительного варианта технологий СМС.

В табл. 7.27 представлены исходные значения показателей качества для разных стандартов сотовой сети связи: K_1 — спектральная эффективность (нисходящий канал), K_2 — радиус действия, K_3 — скорость передачи данных.

Таблица 7.27

Исходные данные для сравнительного анализа сетей мобильной связи 4-го поколения

| Показатели качества | HSPA | | WiMAX | LTE |
|--------------------------------------|---------|---------|-----------|------|
| | Релиз 7 | Релиз 8 | Релиз 1.5 | |
| Спектральная эффективность, бит/Гц/с | 0,87 | 1,75 | 1,59 | 1,57 |
| Радиус действия, км | 30 | 40 | 50 | 5 |
| Скорость передачи Мбит/с | 21 | 35 | 48 | 75 |

Эти параметры приведены к стандартному виду показателей качества — нормированы к максимальным значениям (табл. 7.28).

Таблица 7.28

Преобразованные значения показателей качества

| Показатели качества | HSPA | | WiMAX | LTE |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| K_1 | 0,497 | 1 | 0,909 | 0,897 |
| K_2 | 0,6 | 0,8 | 1 | 0,1 |
| K_3 | 0,28 | 0,467 | 0,64 | 1 |

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий для выбора предпочтительного варианта технологий СМС 4-го поколения.

На рис. 7.6 показано иерархическое представление задачи выбора СМС.

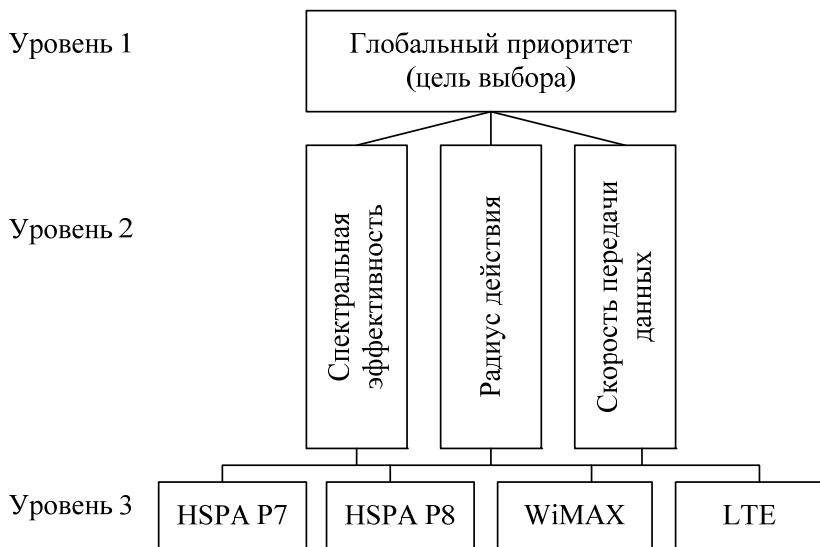


Рис. 7.6. Декомпозиция задачи выбора в иерархию технологий сетей мобильной связи

В табл. 7.29 приведены матрица парных сравнений показателей качества, а также вычисленные согласно (2.19) оценки компонент главного собственного вектора и вектора приоритетов показателей качества.

Далее выполнены парные сравнения вариантов технологий на 3-м уровне иерархии. В частности, выполнены парные сравнения технологий по отношению к выбранным показателям качества. В результате обработки полученных матриц парных сравнений вычислены соответствующие главные собственные векторы и векторы приоритетов.

Таблица 7.29

Матрица парных сравнений показателей качества

| | K_1 | K_2 | K_3 | V_i | P_j |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| K_1 | 1 | 3 | 1/3 | 1 | 0,2584 |
| K_2 | 1/3 | 1 | 1/5 | 0,4058 | 0,1049 |
| K_3 | 3 | 5 | 1 | 2,464 | 0,6367 |

В табл. 7.30, 7.31, 7.32 приведена матрицы парных сравнений стандартов сети мобильной связи по отношению к показателям качества — спектральной эффективности, к радиусу действия, скорости передачи данных [249]. Здесь же приведены вычисленные компоненты соответствующих главных собственных векторов и векторов приоритетов.

Таблица 7.30

Матрица парных сравнений вариантов технологий СМС по отношению к спектральной эффективности

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | V_1 | P_{1j} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| N_1 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 0,299 | 0,057 |
| N_2 | 5 | 1 | 3 | 3 | 2,59 | 0,4935 |
| N_3 | 5 | 1/3 | 1 | 3 | 1,495 | 0,2849 |
| N_4 | 5 | 1/3 | 1/3 | 1 | 0,863 | 0,1645 |

Таблица 7.31

Матрица парных сравнений технологий СМС по отношению к радиусу действия

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | V_2 | P_{2j} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| N_1 | 1 | 1/3 | 1/5 | 5 | 0,76 | 0,1301 |
| N_2 | 3 | 1 | 1/3 | 7 | 1,627 | 0,2785 |
| N_3 | 5 | 3 | 1 | 7 | 3,201 | 0,5481 |
| N_4 | 1/5 | 1/7 | 1/7 | 1 | 0,253 | 0,0433 |

Таблица 7.32

Матрица парных сравнений технологии СМС по отношению к скорости передачи данных

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | V_3 | P_{3j} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| N_1 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/7 | 0,31 | 0,0433 |
| N_2 | 3 | 1 | 1/3 | 1/5 | 0,67 | 0,0928 |
| N_3 | 5 | 3 | 1 | 3 | 2,59 | 0,3593 |
| N_4 | 7 | 5 | 5 | 1 | 3,64 | 0,5046 |

В табл. 7.33 приведены результаты вычисления вектора глобальных приоритетов. Видно, что предпочтительным вариантом технологии СМС является вариант N_4 . Это технология LTE со скоростью передачи данных 75 Мбит/с, спектральной эффективностью 1,57 бит/Гц/с и радиусом действия базовых станций 5км.

Таблица 7.33

Результаты вычисления компонент глобального вектора приоритетов технологии СМС 4-го поколения

| <i>СМС</i> | P_{1j} | P_{2j} | P_{3j} | <i>С</i> |
|------------|----------|----------|----------|----------|
| N_1 | 0,057 | 0,13 | 0,043 | 0,0553 |
| N_2 | 0,494 | 0,279 | 0,093 | 0,2158 |
| N_3 | 0,285 | 0,548 | 0,359 | 0,3586 |
| N_4 | 0,165 | 0,043 | 0,505 | 0,3704 |
| P_j | 0,26 | 0,1 | 0,64 | |

7.6. Выбор предпочтительного типа мобильного телефона

Полагается, что задано некоторое множество разных типов мобильных телефонов, которые характеризуются совокупностью технико-экономических показателей качества. Необходимо выбрать единственный предпочтительный вариант мобильного телефона.

Согласно методологии решения многокритериальных задач вначале найдено подмножество Парето-оптимальных типов мобильных телефонов в критериальном пространстве показателей качества, а затем в этом подмножестве выбран единственный предпочтительный вариант с привлечением дополнительной информации от экспертов на основе метода анализа иерархий. При этом использовались данные о 19 мобильных телефонах, которые оценивались совокупностью показателей качества, характеризующих их потребительские свойства: k_1 — характеристики процессора, k_2 — характеристики экрана, k_3 — характеристики камеры, k_4 — характеристики оперативного запоминающего устройства, k_5 — цена [248, 251, 252]. Нетрудно видеть, что показатели качества

мобильных телефонов связаны и противоречивы между собой. Для удобства было проведено преобразование этих данных согласно (6.2) и (6.3). В табл. 7.34 приведены результаты преобразования исходных значений показателей качества мобильных телефонов.

Таблица 7.34

Преобразованные значения показателей качества мобильных телефонов

| № | Телефон | $k_{1н}$ | $k_{2н}$ | $k_{3н}$ | $k_{4н}$ | $k'_{5н}$ | Парето-оптимальные варианты |
|----|--------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------------------------|
| 1 | Samsung Galaxy S5 | 0,63 | 0,85 | 1 | 0,66 | 0,21 | + |
| 2 | Samsung Galaxy S4 | 0,59 | 0,83 | 0,81 | 0,66 | 0,37 | – |
| 3 | Samsung Galaxy S3 | 0,51 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 0,54 | – |
| 4 | Samsung Galaxy Note Edge | 1 | 0,93 | 1 | 1 | 0,14 | + |
| 5 | Samsung Galaxy A7 | 0,48 | 0,91 | 0,81 | 0,66 | 0,27 | – |
| 6 | Samsung Galaxy Ace 4 | 0,37 | 0,66 | 0,31 | 0,17 | 1 | + |
| 7 | HTC Desire Eye | 0,85 | 0,86 | 0,81 | 0,66 | 0,2 | + |
| 8 | HTC One E8 | 0,92 | 0,83 | 0,81 | 0,66 | 0,19 | + |
| 9 | HTC Desire 700 | 0,44 | 0,83 | 0,5 | 0,33 | 0,35 | – |
| 10 | HTC Desire 510 | 0,44 | 0,78 | 0,31 | 0,33 | 0,51 | – |
| 11 | HTC Desire 610 | 0,44 | 0,78 | 0,5 | 0,33 | 0,43 | – |
| 12 | Asus ZenFone 6 | 0,74 | 1 | 0,81 | 0,66 | 0,38 | + |
| 13 | Asus ZenFone 5 | 0,44 | 0,83 | 0,5 | 0,66 | 0,41 | – |
| 14 | Lenovo Vibe Z2 | 0,92 | 1 | 1 | 1 | 0,18 | + |
| 15 | Lenovo S90 | 0,44 | 0,83 | 0,81 | 0,66 | 0,38 | – |
| 16 | Lenovo S580 | 0,44 | 0,83 | 0,5 | 0,33 | 0,81 | + |
| 17 | Lenovo S856 | 0,44 | 0,93 | 0,5 | 0,33 | 0,43 | – |
| 18 | Lenovo A7000 | 0,55 | 0,93 | 0,5 | 0,66 | 0,59 | + |
| 19 | Sony Xperia L C2105 | 0,37 | 0,71 | 0,5 | 0,33 | 0,62 | – |

На основе полученных данных в критериальном пространстве оценок показателей качества из исходного множества 19 типов мобильных телефонов выделено подмножество Парето-оптимальных, которое включает 9 вариантов мобильных телефонов (в табл. 7.34 они отмечены знаком +).

Далее рассмотрен выбор предпочтительного типа мобильного телефона из подмножества Парето-оптимальных с использованием метода анализа. Для подмножества Парето-оптимальных вариантов построена матрица парных сравнений совокупности показателей качества. Для заполнения этой таблицы с помощью опытного эксперта выполнены парные сравнения важности показателей качества мобильных телефонов [52]. Результаты вычисления значений компонент вектора приоритетов показателей качества согласно (2.19) и (2.20) приведены в табл. 7.35.

Таблица 7.35

Матрица парных сравнений показателей качества мобильных телефонов и вычисленные оценки компонент вектора приоритетов

| Показатели качества | Процессор | Экран | Камера | ОЗУ | Цена | V_i | P_j |
|---------------------|-----------|-------|--------|-----|------|-------|-------|
| Процессор | 1 | 5 | 9 | 3 | 7 | 3,936 | 0,509 |
| Экран | 1/5 | 1 | 3 | 1/3 | 5 | 1,043 | 0,135 |
| Камера | 1/9 | 1/3 | 1 | 1/7 | 1/3 | 0,278 | 0,036 |
| ОЗУ | 1/3 | 3 | 7 | 1 | 5 | 2,032 | 0,263 |
| Цена | 1/7 | 1/5 | 3 | 1/5 | 1 | 0,441 | 0,057 |

Далее выполнены парные сравнения типов мобильных телефонов в отдельности по отношению к выбранным показателям качества: характеристики процессора, ОЗУ, экрана, камеры, цены.

В результате обработки полученных матриц парных сравнений вычислены собственные векторы и векторы приоритетов. Для примера в табл. 7.36 приведена матрица парных сравнений мобильных телефонов по отношению к ОЗУ, а также вычисленные компоненты главного собственного вектора \bar{V}_4 и соответствующего вектора приоритетов мобильных телефонов \bar{P}_{4j} .

Таблица 7.36

**Матрица парных сравнений
мобильных телефонов по отношению к ОЗУ**

| № | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | N_6 | N_7 | N_8 | N_9 | V_4 | P_{4j} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| N_1 | 1 | 1/4 | 7 | 2 | 2 | 2 | 1/4 | 5 | 2 | 1,484 | 0,114 |
| N_2 | 4 | 1 | 9 | 4 | 4 | 4 | 2 | 7 | 4 | 3,697 | 0,285 |
| N_3 | 1/7 | 1/9 | 1 | 1/7 | 1/7 | 1/7 | 1/9 | 1/3 | 1/7 | 0,183 | 0,014 |
| N_4 | 1/2 | 1/4 | 7 | 1 | 2 | 2 | 1/4 | 5 | 2 | 1,273 | 0,098 |
| N_5 | 1/2 | 1/4 | 7 | 1/2 | 1 | 2 | 1/4 | 5 | 2 | 1,091 | 0,084 |
| N_6 | 1/2 | 1/4 | 7 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1/4 | 5 | 2 | 0,935 | 0,073 |
| N_7 | 4 | 1/2 | 9 | 4 | 4 | 4 | 1 | 7 | 4 | 3,169 | 0,246 |
| N_8 | 1/5 | 1/7 | 3 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/7 | 1 | 1/5 | 0,299 | 0,024 |
| N_9 | 1/2 | 1/4 | 7 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/4 | 5 | 1 | 0,801 | 0,062 |

Аналогично вычислены компоненты векторов приоритетов P_j по отношению к характеристикам процессора, экрана, камеры и цены. Компоненты этих векторов приведены в виде соответствующих столбцов в табл. 7.37. В этой таблице в нижней строке также приведены полученные ранее компоненты вектора приоритетов показателей качества \bar{P}_i . С использованием этих данных вычислены значения компонент вектора глобальных приоритетов C_j согласно соотношению (2.21), которые приведены в последнем столбце табл. 7.37.

Таблица 7.37

**Результаты вычисления значения компонент
глобального вектора приоритетов**

| № | Типы телефонов | P_j | | | | | C_j |
|---|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 | k_1 | |
| 1 | Samsung Galaxy S5 | 0,054 | 0,06 | 0,25 | 0,114 | 0,056 | 0,077 |
| 2 | Samsung Galaxy Note Edge | 0,287 | 0,167 | 0,214 | 0,285 | 0,018 | 0,252 |
| 3 | Samsung Galaxy Ace 4 | 0,021 | 0,013 | 0,014 | 0,014 | 0,365 | 0,037 |

| № | Типы телефонов | P_i | | | | | C_j |
|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 | k_1 | |
| 4 | HTC Desire Eye | 0,033 | 0,081 | 0,11 | 0,098 | 0,042 | 0,059 |
| 5 | HTC One E8 | 0,228 | 0,039 | 0,094 | 0,084 | 0,034 | 0,148 |
| 6 | Asus ZenFone 6 | 0,116 | 0,264 | 0,081 | 0,073 | 0,082 | 0,121 |
| 7 | Lenovo Vibe Z2 | 0,191 | 0,226 | 0,184 | 0,246 | 0,029 | 0,201 |
| 8 | Lenovo S580 | 0,022 | 0,032 | 0,028 | 0,024 | 0,269 | 0,038 |
| 9 | Sony Xperia L C2105 | 0,047 | 0,117 | 0,024 | 0,062 | 0,105 | 0,063 |
| P_i | | 0,509 | 0,135 | 0,036 | 0,263 | 0,057 | |

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов выбран предпочтительный тип мобильного телефона. Таким является мобильный телефон типа Samsung Galaxy Note Edge , который характеризуется следующими характеристиками: процессор — 2.7 ГГц, экран — 5.6'', камер — 16Мп, ОЗУ — 3 Гб и цена — 19000 грн.

7.7. Выбор предпочтительного протокола маршрутизации беспроводной сенсорно-актуаторной сети

В настоящее время активное развитие получили беспроводные сенсорно-актуаторные сети (БСАС), которые эффективно используются для решения прикладных задач распределенного сбора информации о контролируемом параметре в сетях мониторинга и контроля. Такие сети являются гомогенными, самоорганизующимися, одноранговыми, с ячеистой топологией, узлы которых способны к ретрансляции информации. Автономные источники питания в виде батареи в этих сетях накладывают жесткие ограничения по энергоэффективности на все протоколы маршрутизации, применяемые в сенсорных сетях. Поэтому для БСАС важными являются задачи маршрутизации, в частности, поиска оптимальных с точки зрения энергоэффективности маршрутов и поиска маршрутов обеспечивающих максимальное время жизни сети.

Развитие БСАС привело к появлению большого числа протоколов маршрутизации. Это определяет актуальность выбора предпочтительного протокола маршрутизации для конкретной реализации.

Высоким спросом для приложений беспроводной сенсорно-актуаторной сети (БСАС) используются 3 вида алгоритмов:

- централизованные алгоритмы: основаны на том, что один узел обладает знаниями обо всей сети. Эти алгоритмы используются крайне редко из-за значительных энергозатрат на передачу «главному узлу» информации о состоянии всей сети;
- распределенные алгоритмы: в отличие от предыдущего алгоритма, связь поддерживается за счет обмена информацией между узлами;
- алгоритмы, основанные на местоположении: узлы используют информацию об ограниченной области вокруг них и используют эту информацию для локальной маршрутизации.

Парадигма алгоритма маршрутизации является важным фактором для выбора протокола маршрутизации для использования в конкретной сети. Если использовать алгоритмы, предназначенные для работы с ограниченной областью, то необходимо оптимизировать связи между соседними узлами. С другой стороны, для централизованных алгоритмов множество сообщений, передаваемых только на центральный узел, является преимуществом. Использование распределенных алгоритмов требует надежной и эффективной связи между любыми парами узлов. В свою очередь, алгоритмы на основе местоположения, эффективность которых обеспечивается знанием географических координат, например, с помощью GPS, делают решение более дорогим [254].

Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) является адаптивным протоколом, который позволяет строить маршруты передачи информации с высокой энергетической эффективностью. Сети, использующие протокол SPIN, работают с высокоуровневыми дескрипторами данных — мета-данными. Для того чтобы исключить передачу избыточной информации, в сети используются согласование мета-данных и знания о доступных ресурсах. Это позволяет узлам эффективно распределять информацию между ретрансляторами с ограниченным источником питания.

Directed Diffusion — протокол, ориентированный на данные (data-centric). В сетях, использующих данный протокол для маршрутизации, сенсорные узлы используют связку «атрибут-значение». Для получения данных узел генерирует запрос по определенной схеме, подобно работе базы данных, где узлы выступают в роли

ячеек данных. Обычно источником таких запросов является базовая станция (БС). Узлы хранят предыдущие запросы, а при получении нового обновляют кэш запросов, что позволяет определять скорость передачи данных. При получении сообщения с запросом устанавливается связь с отправителем и при этом активизируются датчики сбора данных. Такая связь называется градиентом и характеризуется скоростью передачи данных, продолжительностью и временем окончания сеанса связи. При получении запроса узел старается установить как можно больше градиентов в направлении к БС. Для поиска оптимального используются положительные и отрицательные подкрепления. Также алгоритм подразумевает работу с двумя видами градиентов: «разведывательный» и градиент данных. Первый предназначен для настройки маршрута, а второй — для отправки данных.

Rumor Routing. Этот алгоритм подразумевает использование запросов от БС, которые распространяются по всей сети узлам, которые наблюдали события, отраженные в запросе. Для этого узел, который фиксирует изменение контролируемого параметра, передает пакет, который называется агентом. Агенты распространяются по сети, агрегируя данные от других узлов с событиями, в направлении БС. Для избегания образования петель, агенты хранят список посещенных узлов. Помимо доставки информации, агенты позволяют поддерживать актуальные знания о сети каждым узлом, обновляя информацию из агента. Тем не менее, некоторые узлы могут не получать эту информацию, т. к. агент распространяется между некоторыми соседними узлами случайным образом.

Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH). В алгоритме LEACH роль главы кластера периодически выполняют разные узлы сети для равномерного использования энергии. Преимущество LEACH в использовании циклов. В каждом цикле заново выбирается глава кластера из числа узлов, которые не были главами кластеров, для обеспечения процента глав кластеров относительно общего числа узлов сети. Затем глава кластера рассылает расписание для доступа с временным разделением (TDMA) внутри кластера. Это позволяет узлам включать передачу только тогда, когда глава кластера свободен. Также глава кластера отвечает за агрегацию данных, полученных от узлов своего кластера, для устранения избыточности.

Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (TEEN) в отличие от иерархических протоколов используется для реактивных сетей, которые немедленно реагируют на изменение

различных параметров. В этом протоколе глава кластера рассылает пороговые значения (*hard* и *soft*), при достижении которых узел передает информацию. Если параметр из набора атрибутов достигает жесткого порогового значения, узел включает передатчик и передает данные. Затем другие узлы передают данные в соответствующем временном промежутке при выполнении следующих условий: текущее значение атрибутов больше *hard* порога и текущее значение атрибута отличается от заданного значения на величину, равную или большую, чем *soft* порог. Обе стратегии направлены на уменьшение затрат энергии на передачу сообщений.

Основным недостатком этого алгоритма является то, что если контролируемое значение не достигнет порогового уровня, то узлы не будут связываться между собой, пользователь не получит никакой информации и не будет осведомлен о работоспособности сети. Таким образом, данный алгоритм не применим для приложений, где передача информации должна быть регулярна.

Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) считается улучшением алгоритма LEACH. Вместо распределения узлов в кластеры он предусматривает формирование цепочек сенсорных узлов. На основе этой структуры каждый узел передает и принимает информацию только от одного ближайшего соседнего узла. Это позволяет регулировать мощность передачи. Узел выполняет агрегацию данных, пересылает их по цепочке до базовой станции. В каждом цикле только один узел из цепочки взаимодействует с базовой станцией. Цепочка строится с максимальной эффективностью по энергозатратам.

Self-Organizing Protocol (SOP) протокол маршрутизации и самоорганизации используется в гетерогенных сенсорных сетях с поддержкой как стационарных, так и мобильных узлов. Оконечные датчики, которые собирают информацию об атрибутах окружающей среды, передают данные определенному числу узлов, которые выполняют роль маршрутизаторов. Они являются стационарными и образуют основную сеть коммуникации. Собранные данные передаются маршрутизаторами на более мощные базовые станции. Каждый конечный узел должен иметь возможность связаться хотя бы с одним маршрутизатором, чтобы быть частью данной сенсорной сети. Оконечные узлы могут быть идентифицированы посредством адреса маршрутизатора, которому они передают информацию. Таким образом, формируется иерархическая архитектура, где группы узлов формируются и объединяются по необходимости.

Geographic Adaptive Fidelity (GAF) — протокол, направленный на оптимизацию производительности БСАС за счет поиска эквивалентных узлов, с точки зрения передачи информации. Эквивалентными считаются такие узлы, которые могут поддерживать связь одним и тем же множеством соседних узлов. Для определения эквивалентных узлов необходимо знать глобальное (или, по крайней мере, локальное) местоположение узлов сети. Формируется виртуальная сетка с таким размером ячеек, чтобы все узлы ячейки могли взаимодействовать с узлами соседней и наоборот. Таким образом, узлы в одной ячейке — эквивалентные. Для обеспечения энергоэффективности только один из узлов в ячейке будет обеспечивать связь, в то время как остальные будут резервными.

Geographic and Energy and Aware Routing (GEAR) — алгоритм маршрутизации, который также основан на знании местоположения узлов. Локализация происходит с помощью систем глобального позиционирования или другим систем. Выбор узла-ретранслятора для построения маршрута основывается на эвристическом выборе из множества соседних узлов. Маршруты, построенные с использованием протокола GEAR, образуются за счет рекурсивной географической передачи пакета внутри сенсорного поля. Таким образом, достигается высокая энергоэффективность при использовании в одноранговых сетях.

Sequential Assignment Routing (SAR) один из первых протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях, который обеспечивает понятие Quality Of Service (QoS — качество услуг) критериев маршрутизации. Он базируется на выставлении атрибутов уровня приоритета каждого пакета. Кроме того, связи и маршруты имеют метрику, характеризующую их возможность обеспечить качество обслуживания. Эта метрика определяется задержками и энергозатратами. На основе алгоритма создается дерево маршрутов с корнем в одном hop'e от базовой станции. Для этого учитываются несколько параметров, таких как приоритет пакетов, энергетические ресурсы, показатели QoS. Также протокол периодически актуализирует маршруты, чтобы реагировать на выход из строя одного из активных узлов.

A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks (SPEED) — протокол, также обеспечивающий QoS. Для его работы требуется, чтобы каждый узел сохранял информацию о своих соседях и использовал данные об их географическом положении для поиска путей. Кроме того, протокол стремится обеспечить

Обобщенные характеристики разных протоколов маршрутизации

| № | Протоколы маршрутизации | Мобильность | Потребляемая мощность | Согласованность | Агрегация данных | Локализация | QoS | Сложность структуры | Масштабируемость | Множественность путей |
|----------|-------------------------|------------------|-----------------------|-----------------|------------------|-------------|-----|-----------------------|------------------|-----------------------|
| N_1 | SPIN | Возможна | Ограничена | Да | Да | Нет | Нет | Низкая | Ограничена | Да |
| N_2 | Directed Diffusion | Ограничена | Ограничена | Да | Да | Нет | Нет | Низкая | Ограничена | Да |
| N_3 | Rumor Routing | Очень ограничена | Не определена | Нет | Да | Нет | Нет | Низкая | Хорошая | Нет |
| N_4 | LEACH | Фиксированные БС | Максимальна | Нет | Да | Да | Нет | Главные узлы кластера | Хорошая | Нет |
| N_5 | TEEN | Фиксированные БС | Минимальна | Нет | Да | Нет | Нет | Главные узлы кластера | Хорошая | Нет |
| N_6 | PEGASIS | Фиксированные БС | Максимальна | Нет | Нет | Да | Нет | Низкая | Хорошая | Нет |
| N_7 | SOP | Нет | Не определена | Нет | Нет | Нет | Нет | Низкая | Низкая | Нет |
| N_8 | GAF | Ограничена | Ограничена | Нет | Нет | Да | Нет | Низкая | Хорошая | Нет |
| N_9 | GEAR | Ограничена | Ограничена | Нет | Нет | Да | Нет | Низкая | Ограничена | Нет |
| N_{10} | SAR | Нет | Не определена | Да | Да | Нет | Да | Средняя | Ограничена | Нет |
| N_{11} | SPEED | Нет | Не определена | Нет | Нет | Да | Да | Средняя | Ограничена | Да |

определенную скорость доставки каждого пакета. Таким образом, можно заранее оценить задержку прохождения пакета от отправителя к получателю, разделив расстояние на скорость пакета. Также SPEED позволяет находить обходные маршруты в случае перегрузок сети. Модуль маршрутизации в протоколе SPEED называется Stateless Geographic Non-Deterministic Forwarding (SNFG) и работает с четырьмя другими модулями на сетевом уровне. Оценка задержки на каждом узле основывается на определении времени, которое прошло после запроса подтверждения получения переданного пакета данных. Исходя из значения задержки, SNFG выбирает узел, который отвечает требованиям по скорости обработки. Если такового нет, рассматриваются соседние узлы.

В табл. 7.38 представлены обобщенные характеристики рассмотренных протоколов маршрутизации.

Приведенные в табл. 7.38 данные использованы при сравнении протоколов маршрутизации методом анализа иерархий, в частности, при формировании матриц парных сравнений протоколов с учетом мнений экспертов.

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий для выбора единственного предпочтительного протокола маршрутизации БСАС с учетом совокупности показателей качества. Были взяты данные по 11 протоколам маршрутизации (табл. 7.38). В табл. 7.39 приведена матрица парных сравнений этих протоколов маршрутизации по табл. 7.38 согласно (2.19), затем вычислены собственный вектор и вектор приоритетов согласно (2.20).

Таблица 7.39

Матрица парных сравнений протоколов маршрутизации

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | N_6 | N_7 | N_8 | N_9 | N_{10} | N_{11} | V_j | P_j |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|
| N_1 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/5 | 1/6 | 3 | 2 | 1/7 | 1/9 | 4 | 5 | 0,661 | 0,038 |
| N_2 | 3 | 1 | 2 | 1/2 | 1/4 | 4 | 3 | 1/5 | 1/6 | 6 | 7 | 1,258 | 0,073 |
| N_3 | 2 | 1/2 | 1 | 1/3 | 1/4 | 5 | 3 | 1/6 | 1/7 | 5 | 6 | 0,988 | 0,057 |
| N_4 | 5 | 2 | 3 | 1 | 1/2 | 5 | 4 | 1/3 | 1/4 | 6 | 7 | 1,88 | 0,109 |
| N_5 | 6 | 4 | 4 | 2 | 1 | 6 | 5 | 1/2 | 1/3 | 5 | 6 | 2,543 | 0,148 |
| N_6 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/5 | 1/6 | 1 | 1/2 | 1/5 | 1/8 | 2 | 3 | 0,399 | 0,023 |

| | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | N_5 | N_6 | N_7 | N_8 | N_9 | N_{10} | N_{11} | V_j | P_j |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|--------|
| N_7 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 2 | 1 | 1/6 | 1/7 | 3 | 4 | 0,555 | 0,031 |
| N_8 | 7 | 5 | 6 | 3 | 2 | 5 | 6 | 1 | 1/2 | 7 | 8 | 3,529 | 0,205 |
| N_9 | 9 | 6 | 7 | 4 | 3 | 8 | 7 | 2 | 1 | 8 | 9 | 4,87 | 0,283 |
| N_{10} | 1/4 | 1/6 | 1/5 | 1/6 | 1/5 | 1/2 | 1/3 | 1/7 | 1/8 | 1 | 2 | 0,297 | 0,018 |
| N_{11} | 1/5 | 1/7 | 1/6 | 1/7 | 1/6 | 1/3 | 1/4 | 1/8 | 1/9 | 1/2 | 1 | 0,222 | 0,0129 |

В табл. 7.40 показаны результаты оценки матриц парных сравнений десяти экспертов и вектор приоритетов, вычисленный согласно (2.20) и затем вычислен средний вектор приоритетов.

Таблица 7.40

Выбор предпочтительного протокола маршрутизации БСАС

| Протоколы маршрутизации | C_j |
|--------------------------------|--------|
| SPIN | 0,0442 |
| Directed Diffusion | 0,077 |
| Rumor Routing | 0,0589 |
| LEACH | 0,1103 |
| TEEN | 0,1426 |
| PEGASIS | 0,0237 |
| SOP | 0,0299 |
| GAF | 0,2076 |
| GEAR | 0,2721 |
| SAR | 0,023 |
| SPEED | 0,0145 |

Из табл. 7.40 видно, что согласно МАИ предпочтительным вариантом маршрутизации является протокол маршрутизации N9 — GEAR, который соответствует максимальной компоненте глобального вектора приоритетов [254].

Достоинством использования метода анализа иерархий для выбора предпочтительного варианта протокола маршрутизации является учет суждений экспертов и последующая формализованная процедура обработки полученных данных для решения такой задачи выбора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование сложных систем должно базироваться на системном подходе, при котором учитываются всесторонние, как правило, противоречивые требования к проектируемой системе. Ранее при проектировании ограничивались выбором строго допустимых вариантов систем. С усложнением и увеличением стоимости проектируемых систем актуальным является выбор оптимальных проектных вариантов систем с учетом совокупности показателей качества системы. При этом задается критерий оптимальности системы, который определяет предпочтение одного проектного варианта системы над другим. Здесь возникает непростая задача «аппроксимации» функции выбора оптимальных вариантов системы, которая имеется в представлении заказчика системы (лица, принимающего решения), некоторой другой функцией выбора, которую можно представить в виде формализованного критерия оптимальности с использованием строгих математических методов.

При проектировании оптимальной системы не следует выделять один наиболее важный показателей качества и не сводить задачу выбора оптимальных проектных вариантов к решению задачи скалярной оптимизации с ограничениями на остальные показатели качества. Вначале необходимо считать все показатели качества равнозначными по важности и применять безусловный критерий предпочтения (критерий Парето) при выборе оптимальных проектных вариантов. Это приводит к решению многокритериальной оптимизационной задачи. В результате решения такой задачи исключаются безусловно худшие варианты и выделяется подмножество Парето-оптимальных проектных решений, для которых достигается компромисс, то есть согласованный по критерию Парето оптимум введенных показателей качества системы. Такой оптимум означает, что дальнейшее улучшение каждого из показателей качества может быть достигнуто лишь за счет ухудшения других показателей качества системы. Парето-оптимальные варианты системы являются несравнимыми между собой. В случае, когда для последующих этапов проектирования должен выбираться единственный предпочтительный вариант системы, необходимо решать задачу сужения подмножества Парето до единственного проектного решения. Для этого должна привлекаться дополнитель-

ная информация от экспертов, на основе которой задается некоторый условный критерий предпочтения и строится строгая формализованная процедура выбора единственного предпочтительного проектного варианта из подмножества Парето-оптимальных.

В настоящей работе рассмотрена методология многокритериального анализа и выбора оптимальных проектных решений, которая включает взаимосвязанную совокупность подходов к заданию критерия оптимальности систем, а также методов нахождения подмножества Парето-оптимальных проектных вариантов и дальнейшего сужения подмножества Парето до единственного предпочтительного варианта системы. В частности, проанализировано два подхода к формализованному заданию критерия оптимальности — кардиналистический и ординалистический. Кардиналистический подход основан на введении и сравнении значений некоторых целевых функций, характеризующих ценность (полезность) проектных вариантов системы. Ординалистический подход к определению понятия оптимальности системы основан на введении понятия бинарных отношений, что позволяет формализовать операции попарного сравнения альтернатив и выбора оптимальных вариантов системы. Формализованные процедуры выбора оптимальных проектных вариантов систем удобно реализовать в критериальном пространстве значений совокупности показателей качества. Рассмотрены некоторые методы нахождения подмножества Парето-оптимальных проектных решений, в частности, метод рабочих характеристик и весовой метод, которые фактически сводят задачу многокритериальной оптимизации к некоторой совокупности скалярных оптимизационных задач с ограничениями. Рассмотрены методы сужения подмножества Парето-оптимальных решений до единственного предпочтительного варианта системы на основе теории полезности и теории размытых множеств, а также на основе лексографических отношений и анализа иерархий.

Рассмотрены практические особенности применения методологии многокритериального анализа и выбора на примерах разных типов средств связи. В частности, рассмотрены решения традиционных задач оптимизации систем передачи информации, а также сетей связи с коммутацией сообщений на основе многокритериального подхода. Проанализированы многомерные потенциальные характеристики различных типов систем передачи информации с учетом совокупности показателей информационной, энергетической и частотной эффективности. Приведены также примеры ре-

шения нестандартных задач многокритериального выбора оптимальных проектных вариантов сети передачи данных с пакетной коммутацией, а также оптимальных вариантов маршрутизации в сети связи, когда не удастся применить аналитические методы оптимизации и показатели качества сетей связи оцениваются путем статистического моделирования.

Исследованы особенности решения задач многокритериального выбора оптимальных проектных вариантов систем мобильной связи на номинальном этапе планирования с учетом совокупности противоречивых показателей качества, характеризующих свойства систем мобильной связи. Рассмотрены примеры выбора Парето-оптимальных проектных вариантов и полученные многомерные потенциальные характеристики и многомерные диаграммы показателей качества для систем мобильной связи 2-го и 3-го поколений.

Рассмотрены особенности применения методов многокритериальной оптимизации при планирования транспортных сетей в системах мобильной связи. Приведены результаты решения задачи нахождения подмножества Парето-оптимальных вариантов топологии транспортной сети и последующего выбора предпочтительной топологии с учетом совокупности показателей качества — коэффициента неготовности и нормированной стоимости сети.

Рассмотрены практические особенности применения методологии многокритериального анализа и выбора оптимальных проектных вариантов на примере выбора предпочтительных вариантов речевого кодека при проектировании сетей IP-телефонии с учетом совокупности показателей качества. Исследования проведены на примере 23 речевых кодеков, которые характеризуются 5 показателями качества: скоростью кодирования, задержкой при кодировании, размером кадра, сложностью реализации, качеством речи. Приведены результаты исследований многокритериального выбора предпочтительного варианта речевого кодека как в исходном множестве вариантов, так и в предварительно найденном подмножестве Парето-оптимальных вариантов. Проведены исследования сравнительной эффективности различных методов выбора предпочтительного варианта речевого кодека на основе теории полезности, теории размытых множеств и метода анализа иерархий.

Проведены исследования особенностей многокритериального выбора предпочтительных проектных вариантов методом анализа иерархий для разных типов средств телекоммуникаций. В част-

ности, рассмотрены примеры многокритериального выбора для модемов в системах цифровой связи с различным видом модуляции (MPSK и MFSK), для систем телевизионного вещания стандартов DVB-T и ATSC, для систем массового обслуживания в сетях связи, для разных технологий сетей мобильной связи 4-го поколения (HSPA, WiMAX, LTE), для разных протоколов маршрутизации в беспроводной сенсорно-актуаторной сети, а также для разных типов мобильных телефонов. Согласно метода анализа иерархий на основе суждений экспертов формируются матрицы парных сравнений показателей качества и сравниваемых проектных вариантов. После обработки этих матриц вычисляются оценки компонент главных собственных векторов и векторов приоритетов на разных уровнях иерархии: уровне показателей качества и уровне вариантов систем. Эти оценки используются для вычисления компонент глобального вектора приоритетов, по максимальному значению которых выбирается предпочтительный вариант средства телекоммуникаций.

Для практической реализации методологии многокритериального анализа и выбора предпочтительных проектных вариантов средств телекоммуникаций созданы соответствующие программные комплексы. Программы решают задачи выбора и задания значений показателей качества для допустимых проектных вариантов систем, нормирования и приведения показателей качества к сопоставимому виду, выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов систем, оценивание многомерных потенциальных характеристик и диаграмм обмен показателей качества, а также сужение подмножества Парето до единственного предпочтительного варианта системы. Эти программы могут быть использованы при создании систем поддержки принятия проектных решений, что дает возможность автоматизации процесса проектирования при выборе предпочтительных вариантов средств телекоммуникаций.

Проведенные исследования дают основания рекомендовать к использованию многокритериальный подход при проектировании, не только при выборе вариантов средств телекоммуникаций, но и при решении других задач в области телекоммуникаций, в частности, организации бизнес-процессов в биллинговых системах, системах обслуживания пользователей, системах управления сетевыми ресурсами, при стратегическом планировании услуг связи и перспективном планировании развития различных типов средств телекоммуникаций.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- 2G — второе поколение систем мобильной связи;
- 3G — третье поколение систем мобильной связи;
- 4G — четвертое поколение систем мобильной связи;
- Archane — система принятия решений;
- ATSC — стандарт телевизионного вещания;
- BER (Bit Error Rate) — коэффициент ошибок по битам;
- BS (Base Station) — базовая станция;
- BSC (Base Station Controller) — контроллер базовой станции;
- BSS (Base Station System) — подсистема базовой станции;
- BTS (Base Transceiver Station) — базовая приемо-передающая станция;
- CDMA (Code Division Multiple Access) — множественный доступ с кодовым разделением;
- CN (Core Network) — базовая сеть;
- COFDM — многочастотная модуляция;
- CTNP (Cellular Transmission Network Planning) — планирование транспортной сети;
- DSS — системы поддержки принятия решений;
- DVB-T — стандарт телевизионного вещания;
- EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) — улучшенная передача данных для развития GSM;
- FDMA (Frequency Division Multiple Access) — метод частотного разделения каналов;
- GAF (Geographic Adaptive Fidelity) — протокол, направленный на оптимизацию производительности BCAC за счет поиска эквивалентных узлов, с точки зрения передачи информации;
- GEAR (Geographic and Energy and Aware Routing) — алгоритм маршрутизации, который также основан на знании местоположения узлов;
- GPRS (General Packet Radio Service) — пакетная радиосвязь общего пользования;
- GSM (Global System for Mobile communications) — глобальный цифровой стандарт мобильной связи;
- GTE (General Telephone & Electronics Corporation) — телефонная компания в США;
- HLR (Home Location Register) — домашний регистр местоположения;

HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) — высокоскоростные цепи коммутации данных;

HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) — высокоскоростная пакетная передача данных от базовой станции к мобильному телефону;

HSPA (High Speed Packet Access) — технология беспроводной широкополосной радиосвязи;

IF (intermediate frequency) — промежуточная частота;

IGRP (Cisco System's Interior Gateway Routing Protocol) — протокол маршрутизации;

IP (Internet Protocols) — интернет-протокол;

ISDN (Integrated Services Digital Network) — цифровая сеть с интеграцией служб;

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) — протокол маршрутизации, использующий циклы;

LTE (Long Term Evolution) — долгосрочная технология мобильной передачи данных;

MFN — многочастотные сети вещания;

MFSK — некогерентная модуляция;

MIPS (Millions of Instructions per second) — скорость обработки, измеряемая в миллионах инструкций в секунду;

MIMO (Multiple Input Multiple Output) — метод пространственного кодирования сигнала;

MOS (Mean Opinion Score) — тест, который используют в телефонных сетях для определения качества сети;

MPSK — когерентная модуляция;

MS (Mobile Station) — мобильная станция;

MSC (Mobile Switching Center) — центр коммутации мобильной связи;

NETCAP — интерактивная система оптимизации;

NMC (Network Management Center) — центр управления сетью;

NYNEX Science and technology — телефонная компания;

PDN (Packet Data Network) — сеть пакетной передачи данных;

PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) — протокол маршрутизации, считается улучшением алгоритма LEACH;

PLMN (Public Land Mobile Network) — наземная мобильная сеть общего пользования;

PSTN (Public Switched Telephone Network) — телефонная сеть общего пользования;

QoS (Quality Of Service) — качество услуг;

RAN (Radio Access Network) — сеть радиодоступа;

RNC (Radio Network Controller) — контроллер управления радиосети;

RNP (Radio Network Planning) — планирование радиосети;

SAR (Sequential Assignment Routing) — один из первых протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях, который обеспечивает понятие качества услуг критериев маршрутизации;

SDH (Synchronous Digital Hierarchy) — синхронная цифровая иерархия;

SES (Severely Errored Second) — секунды, сильно пораженные ошибками;

SFN — одночастотные сети вещания;

SNP (Switching Network Planning) — планирование системы коммутации сети;

SONET toolkit — система принятия решений;

SOP (Self-Organizing Protocol) — протокол маршрутизации и самоорганизации используется в гетерогенных сенсорных сетях;

SPEED (A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks) — протокол, также обеспечивающий качество услуг;

SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) — протокол, который позволяет строить маршруты передачи информации с высокой энергетической эффективностью;

SSS (Switching Subsystem) — коммутационная подсистема;

TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocols) — протокол управления передачей данных / интернет-протокол;

TDMA (Time Division Multiple Access) — метод временного разделения каналов;

TEEN (Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol) — протокол, который используется для реактивных сетей;

UE (User Equipment) — устройство пользователя;

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) — универсальная система мобильной связи;

UTRAN (UMTS Terrestrial RAN) — сеть наземного радиодоступа UMTS;

WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) — широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов;

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) — телекоммуникационная технология беспроводной связи;

АМ — амплитудная модуляция;
БСАС — беспроводные сенсорно-актуаторные сети;
ГИС — геоинформационные системы;
ГНК — гауссовский непрерывный канал;
ДНК — дискретно-непрерывный канал;
ИС — индекс согласованности;
КС — канал связи;
ЛПР — лицо, принимающее решение;
МАИ — метод анализа иерархии;
МДО — многомерные диаграммы обмена;
МПХ — многомерные потенциальные характеристики;
МСЭ (ITU — International Telecommunication Unit) — между-
народный союз электросвязи;
НИР — научно-исследовательские работы;
НК — непрерывный канал;
ОБП-8Т — 8-уровневая одночастотная амплитудная модуляция
с подавленной боковой полосой;
ОС — отношение согласованности;
ПК — программные комплексы;
РГ — рабочая группа;
СВЧ — сверхвысокие частоты;
СМО — системы массового обслуживания;
СМС — сеть мобильной связи;
СПД — система передачи данных;
СПДС — система передачи дискретных сообщений;
СПИ — система передачи информации;
ССМС — сотовая сеть мобильной связи;
ТП — теория полезности;
ТРМ — теория размытых множеств;
ТСЕ (Transcoder Equipment) — транскодер;
УК — узел коммутации;
ФМ — фазовая модуляция;
ЧМ — частотная модуляция;
ЭВМ — электронно-вычислительная машина;
ЭГ — экспертная группа;
ЭКР — экспериментально-конструкторские работы;
ЭО — экспертное оценивание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флейшман Б.С. Элементы потенциальной эффективности сложных систем. – М.: Радио и связь, 1971. – 203 с.
2. Миркин Б.Г. Проблема группового выбора. – М.: Наука, 1974. – 256 с.
3. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. – М.: Сов. радио, 1975. – 358 с.
4. Сервинский Е.Г. Оптимизация систем передачи дискретной информации. – М.: Связь, 1977.
5. Березин Л.В. Теория и проектирование радиосистем / Л.В. Березин, В.А. Вейцель. – М.: Сов. радио, 1977. – 350 с.
6. Месарович М. Общая теория систем: Математические основы / М. Месарович, Я. Такахаря. – М.: Мир, 1978. – 240 с.
7. Левин Г.М. Декомпозиционные методы оптимизации проектных решений / Г.М. Левин, В.С. Танаев. – Минск: Наука и техника, 1978. – 230 с.
8. Шнепс М.А. Системы распределения информации. Методы расчета. – М.: Связь, 1979.
9. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 386 с.
10. Янбых Г.Ф. Методы анализа и синтеза сетей ЭВМ / Г.Ф. Янбых, Б.Я. Эттинглер. – Л.: Энергия, 1980. – 230 с.
11. Юрлов Ф.Ф. Техничко-экономическая эффективность сложных радиоэлектронных систем. – М.: Сов. радио, 1980. – 250 с.
12. Кини Р.Л. Принятие решений при многих критериях. Предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 420 с.
13. Шварц М. Сети ЭВМ. Анализ и проектирование. – М.: Радио и связь, 1981. – 320 с.
14. Вермишев Ю.Х. Методы автоматического поиска решений при проектировании сложных технических систем. – М.: Радио и связь, 1982. – 230 с.
15. Ильичов А.В. Эффективность проектируемых элементов сложных систем / А.В. Ильичов, В.Д. Волков, В.А. Грущанский. – М.: Высшая школа, 1982. – 540 с.
16. Михалевич В.С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В.С. Михалевич, В.Л. Волкович. – М.: Наука, 1982. – 210 с.

17. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
18. Ильичов А.В. Эффективность проектируемых элементов сложных систем / А.В. Ильичов, В.Д. Волков, В.А. Грущанский. – М.: Высшая школа, 1982.
19. Литвак, Б. Г. Экспертная информация: методы получения и анализа / Б.Г. Литвак. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
20. Волкова В.Н. Теория систем и методы системного анализа в управлении и связи / В.Н. Волкова, В.А. Воронков, А.А. Денисов и др. – М.: Радио и связь, 1983. – 256 с.
21. Лазарев В.Г., Лазарев Ю.В. Динамическое управление потоками информации в сетях связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 226 с.
22. Филипс Д. Методы анализа сетей / Д. Филипс, А. Гарсиа-Диас. – М.: Мир, 1984. – 340 с.
23. Панкова Л. А. Организация экспертизы и анализ экспертной информации / Л.А. Панкова, А.М. Петровский, Н.В. Шнейдерман. – М: Наука, 1984. – 214 с.
24. Ланнэ А.А. Многокритериальная оптимизация / А.А. Ланнэ, Д.А. Улахович. – Л.: ВАС, 1984. – 320 с.
25. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. – М.: Радио и связь, 1984. – 120 с.
26. Брахтман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернатив в технике. – М.: Сов. радио, 1984. – 326 с.
27. Окунев Ю.Б. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи / Ю.Б. Окунев, В.Г. Плотников. – М.: Наука, 1985. – 320 с.
28. Зюко А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.Г. Зюко, И.П. Панфилов, В.Л. Банкет, П.В. Иващенко. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
29. Губонин Н.С. Оптимизация систем передачи информации по совокупности технико-экономических показателей / Н.С. Губонин // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1985. – №1. – С. 57–62.
30. Ногин В.Д. Основы теории оптимизации / В.Д. Ногин, И.О. Протодьяконов, И.И. Евлампиев. – М.: Высшая школа, 1986. – 379 с.
31. Энкарачо, Ж., Шлехтендаль Э. Автоматизированное проектирование. Основные понятия и архитектура систем / Ж. Энкарачо, Э. Шлехтендаль. – М.: Радио и связь, 1986. – 420 с.

32. Сингх М. Системы: декомпозиция, оптимизация, управление / М. Сингх, А. Титл. – М.: Мир, 1986. – 345 с.
33. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств / Л.С. Гуткин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
34. Березовский Б.А., Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты / Б.А. Березовский, Ю.М. Барышников, В.И. Борзенко, Л.М. Кепнер. – М.: Наука, 1986. – 128с.
35. Зайченко Ю.П. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техніка, 1986. – 168 с.
36. Дубов Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 221 с.
37. Системы подвижной радиосвязи. / Под ред. И.М. Пышкина. – М.: Радио и связь, 1986. – 328 с.
38. Морозов В.К. Основы теории информационных сетей / В.К. Морозов, А.В. Долганов. – М.: Высшая школа, 1987. – 224 с.
39. Локшин М.Г. Сети телевизионного и звукового ОБЧ ЧМ вещания: Справочник / М.Г. Локшин, А.А. Шур, А.В. Кокарев, Р.А. Краснощеков. – М.: Радио и связь, 1988. – 144 с.
40. Апорович А.Ф. Проектирование радиотехнических систем. – Минск.: Высшая школа, 1988. – 240 с.
41. Вязгин В.А. Математические методы автоматизированного проектирования / В.А. Вязгин, В.В. Федоров. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
42. Перепелица В.А. Многокритериальные задачи теории графов. Алгоритмический подход. – К.: УМК ВО, 1989. – 68 с.
43. Иваненко В.И. Проблема неопределенности в задачах принятия решений / В.И. Иваненко, В.А. Лабровский. – К.: Наукова думка, 1990. – 320 с.
44. Лазарев В.Г., Лазарев Ю.В. Динамическое управление потоками информации в сетях связи. – М.: Радио и связь, 1990. – 226 с.
45. Рыбкин Л.В. Автоматизация проектирования систем управления систем связи / Л.В. Рыбкин, Ю.В. Кобзар, В.К. Демин. – М.: Радио и связь, 1990. – 360 с.
46. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. – М.: Радио и связь, 1990. – 240 с.
47. Мушик Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер. – М.: Мир, 1990. – 208 с.
48. Солодовников В.В. Теория сложности и проектирование систем управления / В.В. Солодовников, В.И. Тумаркин. – М.: Наука, 1990. – 360 с.

49. Вилкас Э.Й. Оптимальность в играх и решениях. – М.: Наука, 1990. – 256 с.
50. Айзерман М.А., Алексеров Ф.Т. Выбор вариантов: основы теории. – М.: Наука, 1990. – 226 с.
51. Сухопутная подвижная радиосвязь. Кн.1. Основы теории / Под ред. И.М. Пышкина, В.С. Семенихина. – М.: Радио и связь, 1990. – 423с.
52. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
53. Мулен Э. Кооперативное принятие решений: аксиомы и модели. – М; Мир, 1991. – 463 с.
54. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
55. Быховский Ю.А. Частотное планирование сотовых сетей подвижной радиосвязи // Электросвязь. – 1993. – №8. – С. 30–32.
56. Норенков И.П. Разработка систем автоматизированного проектирования. – М.: ГТУ им. Н.Е. Баумана, 1994. – 250 с.
57. Петренко А.И. Основы построения систем автоматизированного проектирования / А.И. Петренко, О.И. Семенко. – К.: Высшая школа, 1994. – 320 с.
58. Быховский М.А. Исследование эффективности сотовых систем сухопутной подвижной связи с кодовым разделением каналов / М.А. Быховский // Электросвязь. – 1995. – №8. – С. 29–33.
59. Захарченко М.В. Автоматизация проектирования устройств, систем та мереж зв'язку / М.В. Захарченко, В.К. Стеклов, Н.О. Князева. – К.: Радиоаматор, 1996. – 430 с.
60. Быховский М.А. Сравнение различных систем сотовой подвижной связи по эффективности использования радиочастотного спектра // Электросвязь. – 1996. – №5. – С. 9 – 12.
61. Шмалько А.В. Цифровые сети связи. Основы планирования и построения. – М.: Эко-Трендз, 1997. – 284 с.
62. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Эко-Трендз, 1998. – 240 с.
63. Lee Jhong S. CDMA systems engineering handbook / Jhong S. Lee, Leonard E. Miller. – Norwood: Artech House, Inc, 1998. – 1254 p.
64. Никодимов И.Ю. Планирование сети GSM / И.Ю. Никодимов, М.И. Мансырев // Сети и системы связи. – 1999. -№13. – С. 24–30.
65. Варгаузин В.А. Сравнительная характеристика европейского и американского стандартов цифрового наземного телевиде-

- ния / А.В. Варгаузин, А. Артамонов // Теле-Спутник. – 1999. – №11. – С. 52 – 56.
66. Patacca J–P. Core and Access Transmission Network Planning / Jean–Pierre Patacca, John Vasek, Murray Felton. – Ericsson Radio Systems AB, 1999. – 32 p.
67. Алексеев О.В. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / О.В. Алексеев, А.А. Головкин, И.Ю. Пивоваров. – М.: Высшая школа, 2000. – 230 с.
68. Невдяев Л.М. Мобильная связь третьего поколения / Л.М. Невдяев, Ю.М. Горностаев. – М.: МЦНТИ, 2000. – 208 с.
69. Уайндер С. Справочник по технологии и средствам связи. – М.: Мир, 2000. – 650 с.
70. Олійник В.Ф. Основи теорії систем зв'язку: Математичні моделі телекомунікаційних систем. – К.: Техніка, 2000. – 340 с.
71. Никодимов И.Ю. Планирование сети GSM / И.Ю. Никодимов, М.И. Мансырев, С.И. Пономарев, А.В. Троц // Электросвязь. – 2000. – №3.
72. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации и принятия решений. – СПб.: Издательство „Лань”, 2001. – 384 с.
73. Стеклов В.К. Телекомунікаційні мережі / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. – К.: Техніка, 2001. – 235 с.
74. Локшин, Б.А. Сравнение видов модуляции в наземном цифровом вещании // Теле-Спутник. – 2001. – 3(65). – С. 34–46.
75. Шмалько А.В. Цифровые сети связи: основы планирования и построения. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 282 с.
76. Lee H. Multicriteria hub decision making for rural area telecommunication networks / H. Lee, Y. Shi, S.M. Nazem, S.Y. Kang and others // European Journal of Operational Research. – 2001. – No. 133. – P. 483 – 495.
77. Карташевский В.Г. Сети подвижной связи / В.Г. Карташевский, С.Н.Семенов, Т.В. Фирстова. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 300 с.
78. Альвадоро Р. Принципы проектирования корпоративных IP-сетей / А. Ретана, Д. Слайс, У. Расс. – М.: Вильямс, 2002. – 340 с.
79. Lempiäinen J. Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS / J. Lempiäinen, M. Manninen. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 293 pp.
80. Обезгельдыев А.О. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизация / А.О. Обезгельдыев, Э.Г. Петров, К.Е. Петров. – К.: Наукова думка, 2002. – 332 с.

81. Стеклов В.К. Проектирование телекоммуникационных сетей / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. – К.: Техніка, 2002. – 390 с.
82. Назаров, А.Н. Модели и методы расчета структурно-сетевых параметров сетей АТМ. – М.: Телеком, 2002. – 256 с.
83. Архипкин В.Я. В-CDMA: синтез и анализ систем фиксированной радиосвязи / В.Я. Архипкин, И.А. Голяницкий. – М.: Эко-Трендз, 2002. – 196 с.
84. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: Количественный подход. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 176 с.
85. Laiho J. Radio Network Planning and Optimisation for WCDMA: Dissertation. – Helsinki University of Technology, 2002. – 81 pp.
86. ITU-T Recommendation G.826. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections. – Geneva, 2003. – 34 pp.
87. Билоус Ю.В. Методы территориально-частотного планирования сотовых систем подвижной радиосвязи и анализ их эффективности: диссертация к.т.н. – Харьков: ХНУРЕ, 2003. – 211 с.
88. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Вильямс, 2003 – 1104с.
89. Бескоровайный В.В. Формирование множества эффективных вариантов при решении задач структурного синтеза территориально распределенных объектов // Радиоэлектроника и информатика. – 2003. – №. 4. – С. 113–116.
90. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
91. ITU-T Recommendation G.821. Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an Integrated Services Digital Network. – Geneva, 2003. – 18 pp.
92. Бабков В.Ю. Системы связи с кодовым разделением каналов / В.Ю. Бабков, А.Н. Никитин, К.Н. Осенний, М.А. Сиверс. – СПб.: ТРИАДА, 2003. – 239 с.
93. Mishra R. Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation. 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 286 pp.
94. Rybarczyk G. Transmission Network Planning Guidelines for Astelit / G. Rybarczyk, D. Zhuravlev. – Nokia, 2004. – 40 p.
95. Чернооруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления. – СПб.: Питер, 2004. – 256 с.

96. Гоцуляк А.Ф. Система передачи речи и обмена данными 3G-1x / А.Ф. Гоцуляк, В.П. Гавриленко, С.Н. Орлов, Э.Ю. Пархимович // Connect. – 2004. – №2. – С. 109 – 140.
97. Закиров З.Г. Сотовая связь стандарт GSM. Современное состояние, переход к сетям третьего поколения / З.Г. Закиров, А.Ф. Надеев, Р.Р. Файзуллин. – М.: Эко-Трендз, 2004. – 264 с.
98. Granat J. Multicriteria analysis in telecommunications / J. Granat, A.P. Wierzbicki // Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences. – 2004. – P. 1–6.
99. Стеклов В.К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман – К.: Техніка, 2004. – 204 с.
100. Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation. 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G / Edited by Ajay R Mishra. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 286 pp.
101. UMTS Radio Network Planning, Optimization and QOS Management. For Practical Engineering Tasks / Edited by J. Lempiäinen and M. Manninen. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 343 pp.
102. Лямец В.И. Системный анализ / В.И. Лямец, А.Д. Тевяшев. – Харьков: ХНУРЭ, 2004. – 448с.
103. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения. – Спб.: Наука и техника, 2005. – 240 с.
104. Holma N. WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications/ Harri Holma, Antti Toskala. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 450pp.
105. Громаков Ю.А. Планирование сетей GSM и UMTS с использованием репитеров / Ю.А. Громаков, С.Н. Смоловик, С.В. Воробьев // Электросвязь. – 2005. – №8. – С. 1–7.
106. Вишневский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
107. Saati P. Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs and Risks. – Pittsburgh, 2005. – 352 pp.
108. Ларионов Ю.И. Исследование операций в информационных системах / Ю.И. Ларионов, В.М. Левикин, М.А. Хажмурадов. – Харьков: Компания СМІТ, 2005. – 364с.
109. Громаков Ю.А. Методы планирования и оптимизации параметров радиоподсистемы UMTS / Ю.А. Громаков, С.Н. Смоловик // Мобильные системы. – 2005. – №9. С.12 – 17.

110. Сюваткин В.С. WiMAX – технология беспроводной связи: основы построения, стандарты, применение / В.С. Сюваткин, В.И. Есипенко, И.П. Ковалев, В.Г. Сухоробров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 536 с.
111. Wiley Jn. Next Generation Mobile Systems 3G and Beyond / Edited by Minoru Etoh. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 406 p.
112. Справочник по управлению использованием спектра на национальном уровне. – Женева: Бюро радиосвязи, МСЭ, 2005. – 256 с.
113. Soldani D. QoS and QoE Management in UMTS Cellular Systems / D. Soldani, M. Li. Cuny. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 483 pp.
114. Климаш М.М. Радіомережі коміркового зв'язку: навч. посібник / М.М. Климаш, Є.М. Яцишин. – Львів: УАД, 2005. – 352 с.
115. Next Generation Mobile Systems 3G and Beyond / Edited by Minoru Etoh. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 406 pp.
116. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
117. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. – К.: Слово, 2006. – 816 с.
118. Nawrocki J. Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation. Theory and Practice. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 547 pp.
119. Wiley Jn. Radio Network Planning and Optimisation for UMTS. Second Edition / J. Laiho, A. Wacker. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 664 pp.
120. Веселовский К. Системы подвижной радиосвязи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 336 с.
121. Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation. Theory and Practice / Edited by Maciej J. Nawrocki. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 547 pp.
122. QoS and QoE Management in UMTS Cellular Systems / Edited by D. Soldani, M. Li, R. Cuny. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 483 pp.
123. WCDMA (UMTS) Deployment Handbook. Planning and Optimization Aspects. /C. Chevallier, C. Brunner, A. Garavaglia and others. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 416 pp.
124. Шикин Е.В. Исследование операций / Е.В. Шикин, Г.Е. Шикина. – М.: Изд-во Проспект, 2006. – 350 с.

125. Бабков В. Управление качеством услуг в сетях CDMA2000 1x EV-DO / В. Бабков, А. Русаков, В. Устюжанин. // Мобильные телекоммуникации. – 2006. – № 5. – С. 52 – 59.
126. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За ред. В.В. Поповського. – Харків: Компанія СМІТ, 2006 – 564 с.
127. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. – М.: Техносфера, 2007. – 488 с.
128. Тихвинский В.О. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев. – М.: ЭкоТрендз, 2007. – 400 с.
129. Емельянов В.В. Системы сотовой подвижной радиосвязи. – Харьков: Торсинг, 2007. – 300 с.
130. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 432 с.
131. Климаш М.М. Технології безпроводного зв'язку / М.М. Климаш, В.О. Пелішок, П.М. Михайленич. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2007. – 818с.
132. Климаш М.М. Радіомережі коміркового зв'язку стандартів CDMA / М.М. Климаш, В.О. Пелішок, П.М. Михайленич, О.В. Щур. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2007. – 238 с.
133. Mishra A.R. Advanced Cellular Network Planning and Optimisation. 2G/2.5G/3G Evolution TO 4G. / Edited by Ajay R. Mishra. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 542 pp.
134. Бабков В.Ю. Сети мобильной связи. Частотно–территориальное планирование. Учебное пособие для вузов / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, П.А. Михайлов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 224 с.
135. Климаш М.М. Технології мобільного зв'язку / М.М. Климаш, В.О. Пелішок, П.М. Михайленич. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2007. – 615 с.
136. William W. Wireless Communications: The Future. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 274 pp.
137. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. – ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 64с.
138. Берлин А.Н. Цифровые сотовые системы связи. – М.: ЭкоТрендз, 2007. – 296 с.
139. Глоба Л.С. Математичні основи побудови інформаційно-телекомунікаційних систем. – К.: Норіта-плюс, 2007. – 264 с.

140. Holma H. WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE / H. Holma, A. Toskala. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 574 pp.
141. Mishra, A.R. Advanced Cellular Network Planning and Optimization. 2G/2.5G/3G Evolution TO 4G. /Edited by Ajay R. Mishra. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 542 pp.
142. Кааранен Х. Сети UMTS. Архитектура, мобильность, сервисы / Х. Кааранен, А. Ахтиайнен, Л. Лаитинен, С. Найан, В. Ниemi. – М.: Техносфера, 2007. – 464 с.
143. Тихвинский В.О. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев. – М.: ЭкоТрендз, 2007. – 400 с.
144. Türke U. Efficient Methods for WCDMA Radio Network Planning and Optimization / U. Türke. – Dissertation Universität Bremen, 2007. – 187 pp.
145. Сычев К.И. Многокритериальное проектирование мультисервисных сетей связи // Телекоммуникации. 2007. – №9. – С. 2–7.
146. Волков А. Н. UMTS. Стандарт сотовой связи третьего поколения / А.Н. Волков, А.Е. Рыжков, М.А. Сиверс. – СПб.: «Линк», 2008. – 224 с.
147. Tolstrup M. Indoor Radio Planning. A Practical Guide for GSM, DCS, UMTS and HSPA / M. Tolstrup. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2008. – 344 pp.
148. Гордиенко А. Эволюция транспортных сетей в мобильной связи // Сети/NetworkWorld. – 2008. – №1. – С. 44–45.
149. Groe, John B. CDMA Mobile Radio Design / J.B. Groe, L.E. Larson. – Norwood: Artech House, Inc, 2008. – 344 pp.
150. Ильченко М.Ю. Сучасні телекомунікаційні системи / М.Ю. Ильченко, С.О. Кравчук – К.: Наукова думка, 2008. – 328 с.
151. Ногин В.Д. Проблема сужения множества Парето // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – №1. – С. 98–112.
152. Гилязов Р.Л. Проектирование распределительного уровня мультисервисной сети связи с учетом конфликтных интересов различных групп пользователей / Р.Л. Гилязов, В.Ю. Столбов // Телекоммуникации. – 2008. – №11. – С. 15–21.
153. Grosan C. Designing resilient networks using multicriteria metaheuristics / C. Grosan, A. Abraham, A. Hassainen // Telecommunication System. – 2009. – №40. – P. 75–88.

154. Климаш М.М. Забезпечення параметрів QoS у мультисервісній транспортній мережі на основі технології IP/MPLS / М.М. Климаш, О.А. Лаврів // Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2009. – 268 с.
155. Wiley J. LTE and the Evolution to 4G Wireless. Design and Measurement Challenges / Edited by Moray Rumney. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 457 pp.
156. Kappler C. UMTS Networks and Beyond / C. Kappler. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 363 pp.
157. Гилязов Р.Л. Об одном подходе к учету иерархической структуры критериев оптимальности мультисервисной сети передачи данных / Р.Л. Гилязов, В.Ю. Столбов // Проблемы управления. – 2009. – №1. – С. 44–52.
158. Вишневский В.М. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G / В.М. Вишневский, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.
159. GSM – Architecture, Protocols and Services. Third Edition / J. Eberspächer, H.-J. Vögel, C. Bettstetter, C. Hartmann. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 327 pp.
160. Гольштейн Б.С. Сети связи / Б.С. Гольштейн, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновский. – СПб.: БХВ «Петербург», 2010. – 400 с.
161. Гельгор А.Л. Сотовые сети мобильной связи стандарта UMTS / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов – СПб.: Политехнический университет, 2010. – 227 с.
162. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
163. Климаш М.М. Технології мереж мобільного зв'язку / М.М. Климаш, В.О. Пелішок, П.М. Михайленич. – К.: «Освіта України», 2010. – 624 с.
164. Захарченко М.В. Математичні основи оптимізації телекомунікаційних систем / М.В. Захарченко, С.М. Горохов, М.М. Балан, М.М. Гаджиев, В.В. Корчинский, А.Г. Ложковський. – Одеса: ОНАЗ, 2010. – 240с.
165. Гольдштейн Б.С. Сети связи / Б.С. Гольдштейн, Н.А. Соколов, Г.Г. Яновский. – СПб.: БХВ – Петербург, 2010. – 400 с.
166. Mishra Ajay R. Cellular Technologies for Emerging Markets: 2G, 3G And Beyond. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2010. – 330 pp.

167. Климаш М.М. Оптичні та радіоканали телекомунікацій. / М.М. Климаш, О.А. Лаврів, Р.І. Бак. – Львів, НТУ «Львівська політехніка», 2010. – 424с.
168. Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов – СПб.: Политехнический университет, 2010. – 204 с.
169. Розенвассер Д.М. Сравнение помехоустойчивых кодов ВОСП / Д.М. Розенвассер // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова. – 2010. – №1. – С.134 – 137.
170. Ємельянов В.В. Системи стільникового рухомого радіозв'язку / В.В. Ємельянов, І.В. Свид. – Харків: СМІТ, 2011. – 336 с.
171. Бескоровайный В.В. Исследование эффективности критериев обобщенной полезности для задач многокритериального оценивания / В.В. Бескоровайный, Е.В. Соболева // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2011. – № 3(19). – С. 145–151.
172. Турупалов В.В. Метод удосконалення структури транспортної телекомунікаційної мережі на основі багатокритеріальної оптимізації/ Л.О. Шебанова, В.В. Турупалов // Автоматика, телемеханіка, зв'язок. Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2011. – № 25. – С. 5–9.
173. Сергиенко А.Б. Цифровая связь. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 164 с.
174. Методы научных исследований в телекоммуникациях. Т.2. / Под ред. В.В. Поповского. – Х.: СМІТ, 2013. – 330 с.
175. Довгий С.О., Воробієнко П.П., Гуляєв К.Д. Сучасні телекомунікації: Мережі, технології, безпека, економіка, управління. – К.: Азимут-Україна, 2013. – 608 с.
176. Гепко И.А. Современные беспроводные сети / И.А. Гепко, В.Ф. Олейник, Ю.Д. Чайка, А.В. Бондаренко. – К.: ЕКМО, 2013. – 672 с.
177. Bezruk V.M. Methods of Multi-criterion Information-System Optimization // Telecommunications and Radio Engineering. –2001.– 55(8). – P. 52–60.
178. Безрук В.М. Векторна оптимізація та статистичне моделювання в автоматизованому проектуванні систем зв'язку. – Харків: ХНУРЕ, 2002. – 164 с.
179. Рибалко Д.В. Оцінювання ефективності варіантів мереж мобільного зв'язку з урахуванням сукупності показників якості / Д.В. Рибалко // Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених „Молодь та сучасні

- проблеми радіотехніки (РТ–2006)” – Севастополь: СевНТУ, 2006. – С.50.
180. Безрук В.М. Современные технологии автоматизации планирования сетей радиосвязи. Часть 1. Методы выбора проектных решений, оптимальных по совокупности показателей / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 6/3 (30). – С. 9–13.
 181. Рибалко Д.В. Планування мереж стільникового зв'язку при векторному критерії оптимальності / Д.В. Рибалко // Зб. матеріалів 11-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.». – Харків: ХНУРЕ, 2007. – Ч. 1. – С. 148.
 182. Рибалко Д.В. Парето-оптимізація при плануванні мереж стільникового зв'язку / Д.В. Рибалко, В.М. Безрук // Праці Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негауссівських процесів». – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – С.153–155.
 183. Безрук В.М. Автоматизоване проектування мереж зв'язку / В.М. Безрук, Д.В. Рибалко // Міжнародна конференція „IEEE Східно-західний проект & TEST WORKSHOP EWDTW'07”. – Єреван, 2007. – С.581 – 584.
 184. Безрук В.М. Багатокритеріальна оптимізація в плануванні телекомунікаційних мереж / В.М. Безрук, Д.В. Рибалко // Материалы 17-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007). – Севастополь: Вебер, 2007. – С. 338–340.
 185. Bezruk V.M. Multicriteria optimization of management of the packet switching network / V.M. Bezruk, I.V. Svid, I.V. Korsun // Telecommunications and Radio Engineering. – 2008. – 67(1). – P. 23–32.
 186. Безрук В.М. Современные технологии автоматизации планирования сетей радиосвязи. Часть 2. Программные средства многокритериальной оптимизации сетей радиосвязи. / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва, А.В. Анищенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 1/2 (31). – С. 32–36.
 187. Чеботарёва Д.В. Применение методов многокритериальной оптимизации при планировании сетей сотовой связи / Д.В. Чеботарёва, В.М. Безрук // Радіоелектроніка та телекомунікації: Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2008. – № 618. – С. 117–126.

188. Чеботарёва Д.В. Оптимизация планирования транспортных сетей сотовой связи с учетом совокупности показателей качества / Д.В. Чеботарёва, В.М. Безрук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 4/3 (34). – С. 35–39.
189. Чеботарёва Д.В. Оптимизация топологии сетей мобильной связи с учетом совокупности показателей качества / Д.В. Чеботарёва // Материалы 4-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ-2008). – Севастополь: СевНТУ, 2008. – С. 43.
190. Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация проектных решений методом рабочих характеристик при планировании сетей мобильной связи / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва // Материалы Международной конференции «Современные проблемы радиоэлектроники, телекоммуникаций, компьютерной инженерии» (TCSET'2008) – Львов: Национальный университет «Львовская политехника», 2008. – С.412–413.
191. Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация планирования транспортной сети сотовой связи / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва // Сборник научных трудов 3-го Международного Радиоэлектронного Форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2008). Том II. Международная конференция «Телекоммуникационные системы и технологии». – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЕ, 2008. – С.29–32.
192. Bezruk V.M. Automatic control of Radio Communication Networks Design / V.M. Bezruk, D.V. Chebotaryova, A.V. Anishchenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2009. – Vol. 68. Numb. 5. – P. 429–444.
193. Скорик Ю.В. Методология выбора речевых кодеков с учетом совокупности показателей качества на основе метода анализа иерархий / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // Радиоелектроніка та телекомунікації: Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 645. – С. 115–124.
194. Скорик Ю.В. Применение метода анализа иерархий для выбора речевого кодека, оптимального по совокупности показателей качества / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – 5/2 (41). – С. 9–14.
195. Скорик Ю.В. Методы выбора проектных вариантов системы, оптимальных по совокупности показателей качества, с учетом информации от экспертов / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук //

- Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – 6/4 (42). – С. 42–49.
196. Скорик Ю.В. Выбор оптимальных речевых кодеков для сетей IP-телефонии с учетом совокупности показателей качества / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // Радиотехника. – Харьков, 2009. – №159. – С. 243–248.
 197. Чеботарева Д.В. Оптимизация планирования сетей сотовой связи по совокупности показателей качества / Д.В. Чеботарева, И.В. Бондарь, А.В. Анищенко // IX International Electronics and Telecommunication Conference of Students and Young Scientists. – Warsaw, Poland, 2009. – С. 15.
 198. Чеботарева Д.В. Оптимизация транспортной сети сотовой связи по совокупности показателей качества / Д.В. Чеботарева, Р.А. Горбенко // IX International Electronics and Telecommunication Conference of Students and Young Scientists. – Warsaw, Poland, 2009. – С. 16.
 199. Скорик Ю.В. Выбор оптимальных речевых кодеков с учетом совокупности показателей качества методом анализа иерархий / Ю.В. Скорик // Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Ч.1. – Харьков: ХНУРЭ, 2009. – С. 204.
 200. Скорик Ю.В. Применение метода анализа иерархий для выбора речевых кодеков, оптимальных по совокупности показателей качества / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // Міжнародна науково-практична конференція «Обробка сигналів і негаусівських процесів». – Черкаси: ЧДТУ, 2009. – С. 243–246.
 201. Безрук В.М. Многокритериальный подход к маршрутизации в сетях связи / В.М. Безрук, В.В. Варич // Радиотехника. – Харьков, 2010. – Вып. 163. – С. 45–48.
 202. Скорик Ю.В. Выбор оптимальных речевых кодеков с учетом совокупности показателей качества / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій». – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – С. – 135.
 203. Скорик Ю.В. Выбор оптимальных речевых кодеков методом Саати при учете совокупности показателей качества / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // 6-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». – Севастополь: СевНТУ, 2010. – С. 147.
 204. Skoryk Y. Optimization of Speech Codecs on Set of Indicators of Quality / Y. Skoryk, V. Bezruk // International Conference

- “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science” (TCSET, 2010). – Lviv-Slavske, Ukraine, 2010. – P. 212.
205. Скорик Ю.В. Сравнительный анализ методов сужения подмножества Парето-оптимальных вариантов речевых кодеков / Ю.В. Скорик // Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» Ч. 1. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – С. 206.
206. Безрук В.М. Інформаційні мережі зв’язку. Ч.1. Математичні основи інформаційних мереж зв’язку / В.М. Безрук, Ю.М. Бідний, А.В. Омельченко. – Харків: ХНУРЕ, 2011. – 292 с.
207. Безрук В.М., Ємельянов В.В., Кривенко С.А. Інформаційні мережі зв’язку. Ч.3. Мережі мобільного зв’язку. – Харків: ХНУРЕ, 2011. – 420 с.
208. Безрук В.М. Математические модели сетевого трафика мобильной связи третьего поколения / В.М. Безрук, В.А. Тихонов, Н.В. Кудрявцева, Д.В. Чеботарева // Комп’ютерні технології друкарства: Збірник наукових праць. – Львів, 2011. – № 27. – С. 194–207.
209. Bezruk V.M. Multicriterion optimization in telecommunication networks planning, designing and controlling / V.M. Bezruk, A.N. Bukhanko, D.V. Chebotareva, V.V. Varich // Open Book “Telecommunications Networks”. – Chapter 11. – Rijeka: INTECH, 2012. – P. 251–274.
210. Безрук В.М. Применение методов многокритериальной оптимизации в планировании, проектировании и управлении телекоммуникационных сетей / В.М. Безрук, А.Н. Буханько, Д.В. Чеботарёва, В.С. Варич, Ю.В. Скорик // [Электронный ресурс] Проблемы телекоммуникацій. – Харьков, 2012. – № 2 (7). – С. 9–15.
211. Чеботарёва Д.В. Оптимизация сетей мобильной связи третьего поколения на номинальном этапе планирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/9 (57). – С. 32–35.
212. Безрук В.М. Выбор оптимальных проектных решений при планировании сетей радиосвязи / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва // Холодильна техніка і технологія. – Одеса, 2012. – №5 (139). – С. 60–68.
213. Безрук В.М. Принятие решений в телекоммуникационных сетях с учетом совокупности показателей качества. Ч. 1. Методология многокритериальной оптимизации систем /

- В.М. Безрук, А.Н. Буханько // [Электронный ресурс] Проблемы телекоммуникаций. – Харьков, 2012. – №1 (6). – С. 52–66.
214. Безрук В.М. Принятие решений в телекоммуникационных сетях с учетом совокупности показателей качества. Ч. 2. Применение методов многокритериальной оптимизации в планировании, проектировании и управлении телекоммуникационных сетей / В.М. Безрук, А.Н. Буханько, Д.В. Чеботарева, В.С. Варич, Ю.В. Скорик // [Электронный ресурс] Проблемы телекоммуникаций. – Харьков, 2012. – № 2 (7). – С. 9–15.
215. Скорик Ю.В. Выбор оптимальных речевых кодеков методами экспертного оценивания / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – 3/2 (57). – С. 19–24.
216. Bezruk V.M. Modelling and Forecasting of the Traffic in Mobile Communication Network / V.M. Bezruk, D.V. Chebotaryova // Міжнародний науково-технічний симпозиум «Новітні технології в телекомунікації». – Київ: ДУІКТ, 2012. – С. 20–22.
217. Bezruk V.M. Models of the Traffic in Mobile Communication Network / V.M. Bezruk, D.V. Chebotaryova // XI Международная конференция «Современные проблемы радиоэлектроники, телекоммуникаций, компьютерной инженерии» (TCSET, 2012). – Львов: Национальный университет «Львовская политехника», 2012. – С. 255.
218. Чеботарёва Д.В. Многокритериальная оптимизация в планировании сетей мобильной связи третьего поколения / Д.В. Чеботарёва // 8-я Международная молодежная научно-техническая конференция “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2012)”. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – С. 152.
219. Bezruk V. Distance Learning in Communication Systems Automated Designing / V. Bezruk, A. Bukhanko, D. Chebotaryova // 2nd World Conference on Educational Technology Research (2012). – Lefkosa, North Cyprus, 2012. – P. 24–28.
220. Чеботарёва Д.В. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи / Д.В. Чеботарёва, В.М. Безрук. – Харьков: Компания СМІТ, 2013. – 148 с.
221. Безрук В.М., Буханько А.Н., Чеботарева Д.В. Принятие оптимальных решений в инфокоммуникациях с учетом совокупности показателей качества. // Научно-технические технологии

- в инфокоммуникациях: Обработка и защита информации: коллективная монография / под ред. В.М. Безрука, В.В. Баранника. – Харьков: Компания СМІТ, 2013. – С. 104–125.
222. Безрук В.М., Чеботарева Д.В. Методы многокритериальной оптимизации в планировании сетей связи // Научно-практична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій». – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2013. – С. 21–26.
223. Скорик Ю.В. Сравнение стандартов телевизионного вещания методом анализа иерархии / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – 4/4 (64). – С. 26–32.
224. Безрук В.М. Методы многокритериальной оптимизации при выборе речевых кодеков с учетом совокупности показателей качества / В.М. Безрук, Ю.В. Скорик, Д.В. Чеботарёва // [Электронный ресурс] Проблемы телекоммуникаций. – Харьков, 2013. – № 3 (12). – С. 27–35.
225. Безрук В.М. Применение метода анализа иерархий при выборе средств телекоммуникаций с учетом совокупности показателей качества / В.М. Безрук, Ю.В. Скорик // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков, 2013. – С. 24–29.
226. Скорик Ю.В. Выбор средств телекоммуникаций с учетом совокупности показателей качества методом анализа иерархий. / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // Научно-практична конференція Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича. – Чернівці, 2013. – С. 33–35.
227. Скорик Ю.В. Сравнение систем телевизионного вещания по совокупности показателей качества / Ю.В. Скорик, В.М. Безрук // Международная конференція «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии». – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – С. 106–109.
228. Безрук В.М. Автоматизированное проектирование систем радиосвязи / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарева // VI международный научно-технический симпозиум «Новые технологии в телекоммуникациях» (Карпаты, Вышков). – Київ: ДУІКТ, 2013. – С. 19–21.
229. Bezruk V. Selection of Optimum Variants of the Communication System by Methods of Multi-objectiv Optimization / V. Bezruk, D. Chebotaryova // 12-th International Conference “the experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelec-

- tronics (CADSM, 2013)". – Lviv: Politechnic National University, 2013. – P. 34–36.
230. Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация проектных вариантов при планировании сетей LTE / С.А. Иваненко, Д.В. Чеботарёва // Международная научно-практическая конференция «Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии». – Харьков, ХНУРЭ, 2013. – С. 87–89.
231. Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация проектных вариантов при планировании сетей мобильной связи / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). – Севастополь: Вебер, 2013. – С. 494.
232. Безрук В.М. Выбор оптимальных проектных решений в сетях связи при многих критериях / В.М. Безрук, И.В. Свид, А.Н. Буханько, Ю.В. Скорик, Д.В. Чеботарёва // Научная конференция «Воспроизводство интеллектуального капитала в системе высшего профессионального образования». – Белгород: БФИУ, 2013. – С. 232–235.
233. Безрук В.М. Оптимізація та математичне моделювання мереж зв'язку / В.М. Безрук, О.М. Буханько, Д.В. Чеботарьова. – Харків: Компанія СМІТ, 2014. – 194 с.
234. Безрук В.М. Выбор оптимальных речевых кодеков на основе методологии многокритериальной оптимизации / В.М. Безрук, Ю.В. Скорик, О.Г. Лебедев, В.В. Ломакин, М.В. Лифиренко // Информационные системы и технологии. – Орел: Госуниверситет, 2014. – С. 84–92.
235. Безрук В.М. Планирование сетей мобильной связи на основе методов многокритериальной оптимизации / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва // [Электронный ресурс] «Проблемы телекоммуникаций». – Харьков, 2014. – №2(14). – С. 42–51.
236. Чеботарёва Д.В. Автоматизация многокритериального выбора оптимального решения при планировании сетей мобильной связи / Д.В. Чеботарёва, В.М. Безрук // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков, 2014. – №1. – С. 20–22.
237. Безрук В.М. Принятие оптимальных решений при планировании сетей мобильной связи с учетом совокупности показателей качества / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва // Радиотехника. – Харьков, 2014. – Вып.178. – С.119–130.
238. Ніколаєв І.П., Безрук В.М. Методи та технології підтримки прийняття рішень в телемедицині // Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасні проблеми телекомуніка-

- цій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій» (СПТЕЛ-2014). – Львів, 2014. – С.42-46
239. Bezruk V.M., Chebotaryova D.V. Optimal decision making when planning mobile communication networks taking into account a set of quality factors // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015.– 75(18). – P. 1635 – 1649.
240. Valeriy Bezruk. Methods of multi-criteria optimization in planning networks of mobile communication / Valeriy Bezruk, Daryna Chebotarova. // Information and Telecommunication Sciences. – Kyiv: National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute“, 2014. – Volume 5, Number 2. – p. 21–25.
241. Valeriy Bezruk. Multicriteria Optimization in Planning of Mobile Communication Networks / Valeriy Bezruk, Minho Jo, Daria Chebotareva, Stanislav Ivanenko. // 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2014). - Gdansk, Poland, 2014. – p. 633 – 639.
242. Bezruk V.M. Multicriteria Choice of Optimal Design Decisions When Planning of LTE Networks / V.M. Bezruk, D.V. Chebotaryova, S.A. Ivanenko // Proceedings of the XII-th International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (NCSET-2014). – Lviv, 2014. – p. 53–55.
243. Безрук В.М., Ніколаєв І.П. Інфокомунікаційні технології розпізнавання електроенцефалографічних сигналів у телемедицині // Науково-практична конференція «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», Ч.3. – Одеса: ОНАЗ, 2014. – С. 7–9.
244. Безрук В.М. Методи многокритеріальної оптимізації в плануванні мереж мобільної зв'язі / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарєва, С.А. Іваненко // VII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – С. 74–75.
245. Безрук В.М. Планирование сетей мобильной связи на основе методов многокритеріальної оптимізації / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарєва // [Електронний ресурс] «Проблеми телекомунікацій». – Харьков, 2014. – №2(14). – С. 42–51.
246. Bezruk V., Skoryk Y. Choice of preferred telecommunications means on the basis of the hierarchy analysis method // First International Scientific-Practical Conference “Problems of

- Infocommunications science and Technology” (PIC S&T` 2014). – Kharkiv, 2014. – P. 31–33.
247. Безрук В.М. Принятие оптимальных решений при обработке результатов измерений с учетом совокупности показателей качества // 12-й Международный научно-технический семинар “Неопределенность измерения: научные, прикладные, нормативные и методические аспекты” (UM-2015). – София, Болгария, 2015. – С. 78.
248. Безрук В.М., Пономаренко Н.Н., Скорик Ю.В. Анализ эффективности методов многокритериального выбора предпочтительного варианта средств телекоммуникаций // [Электронный ресурс] «Проблемы телекоммуникаций». – Харьков, 2015. – № 1 (16). – С. 42–53.
249. Безрук В.М. Сравнительный анализ и выбор предпочтительного варианта модема в цифровых системах связи с различными видами модуляции / В.М. Безрук, Ю.В. Скорик // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: п’ята міжнародна науково-практична конференція (Одеса 29–30 жовтня, 2015р.), Ч.3. – Одеса, ОНАЗ, 2015. – С. 7–9.
250. Bezruk V.M., Skorik Yu.V. Multicriterial choice of telecommunications means using hierarchical analysis method / V.M. Bezruk, Yu.V. Skorik // Information and Telecommunication Sciences. – K.: NTU of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute“, 2015. – Volume 6, Number 2. – P. 18–24.
251. Безрук В.М. Многокритериальный выбор предпочтительных вариантов средств телекоммуникаций методом анализа иерархий / В.М. Безрук, Ю.В. Скорик, М.Н. Климаш // Проблеми інформатики та моделювання: П’ятнадцята міжнародна науково-технічна конференція. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – С. 20.
252. Bezruk V. Multi-criteria choice of the preferred type of mobile phone by the analytic hierarchy process / V. Bezruk, Y. Skorik // Second International Scientific-Practical Conference “Problems of Infocommunications science and Technology” (PIC S&T` 2015). – Kharkiv, 2015. – P. 108–109.
253. Bezruk V. Multi-criteria selection of optimum means of telecommunications / V. Bezruk, Y. Skorik // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET, 2016). – Lviv, 2016. – P. 624–626.

254. Безрук В.М. Многокритериальный выбор оптимальных средств телекоммуникаций / В.М. Безрук, Ю.В., Д.В. Чеботарёва, Ю.В. Скорик // Десята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій». – Київ, 2016. – С. 137–139.
255. Bezruk V., Zelenin A., Vlasova V., Skorik J., Koltun Y. Select preferred of wireless sensor and actuator network / V. Bezruk, A. Zelenin, V. Vlasova, J. Skorik, Y. Koltun // Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 1/9 (79). – 2016. – P. 4–9.
256. Безрук В.М., Власова В.О., Скорик Ю.В., Колтун Ю.М., Костомицький А.І. Вибір алгоритму самоорганізації бездротової сенсорної мережі методом аналізу ієрархій/ Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: серія «Радіоелектроніка та телекомунікації». – 2016. – №849. – С. 179–184.
257. Чеботарьова Д.В. Вибір 3G роутерів з використанням методів багатокритеріальної оптимізації // Четверта міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації». – Черкаси: ЧТУ, 2016. – С. 29.
258. Власова В.О., Скорик Ю.В., Безрук В.М. Вибір переважних протоколів маршрутизації бездротової сенсорно– актуаторної мережі методом аналізу ієрархії // Матеріали 5-ої міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах». – Чернівці: «Місто», 2016. – С. 101–102.
259. Чеботарьова Д.В., Безрук В.М. Вибір оптимальних варіантів засобів зв'язку методами багатокритеріальної оптимізації // Матеріали докладов регіонального семінара МСЭ «Тенденції розвитку конвергентних сетей: рішення ПОСТ – NGN, 4G и 5G». – Київ: ДУТ, 2016. – С. 143–145.

Наукове видання

Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., Скорик Ю.В.

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ
АНАЛИЗ И ВЫБОР СРЕДСТВ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

Монографія

Формат 60×84 ¹/₁₆. Умов. друк. арк. 15,6.

Тираж ___ прим. Зам. № ___

ФОП Коряк С.Ф.

61166, м. Харків, просп. Леніна, 14

Тел./факс: (057) 702-13-07

E-mail: book@znanius.com

<http://www.smit-book.com>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції ДК № 4965 від 25.08.2015