

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УПРАВЛЕНИЯ»  
(ГУУ)

*На правах рукописи*



**Халтурин Роман Александрович**

**Методология распределения ресурсов в пассажирских  
транспортных системах на основе теории принятия решений в  
условиях неопределенности**

Специальность: **2.9.9. «Логистические транспортные системы»**

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук, профессор  
**Карелина Мария Юрьевна**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ .....	18
1.1 Значимость разработки методологии эффективного распределения ресурсов в транспортных системах для экономики РФ .....	18
1.2 Основные положения системных исследований в области эффективности распределения ресурсов в сложных организационных системах .....	33
1.3 Анализ научных трудов и публикаций, исследующих методы теории принятия решений в условиях неопределенности.....	48
Выводы по первой главе.....	58
2. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ СНЯТИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЦЕЛЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ .....	63
2.1 Методологическое обеспечение проектирования сложных логистических транспортных систем.....	63
2.2 Постановка задач и структура исследования систем управления ресурсами в сложных транспортных системах с учётом состояния неопределенности при оптимизации процессов.....	81
2.3 Исследование информационного состояния неопределенности при решении оптимизационных задач процессов управления.....	88
2.4 Исследование моделей определения весовых коэффициентов ранговых последовательностей на основе сценарного подхода в сложных системах распределения ресурсов .....	97
Выводы по второй главе.....	108
3. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ МНОГООБРАЗИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ПАССАЖИРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ.....	112

3.1	Разработка концепции структуры многоуровневой иерархической пассажирской транспортной системы.....	112
3.2	Разработка модели структуры системы распределения ресурсов в транспортном комплексе, основанной на технологическом принципе представления показателей .....	124
3.3	Разработка модели структуры системы распределения ресурсов, основанной организационно-технологическом принципе представления показателей на различных уровнях.....	137
3.4	Разработка модели структуры системы распределения ресурсов, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей.....	149
	Выводы по третьей главе.....	164
4.	РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ТРАНСПОРНЫХ PP-СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ....	169
4.1	Обоснование применения методов решения многокритериальных оптимизационных задач в условиях неопределенности в целях исследования ...	169
4.2	Разработка аналитических инструментов снятия неопределенности в сложных многокритериальных системах распределения ресурсов .....	176
4.3	Анализ эффективности аналитических инструментов снятия неопределенности с целью выявления объективных моделей управления ресурсами в сложных в транспортных системах .....	188
	Выводы по четвёртой главе.....	208
5.	ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ЦЕЛЯХ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СИСТЕМЕ НАЗЕМНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА В Г. МОСКВЕ .....	210
5.1	Описание и постановка вычислительного эксперимента, исходные данные для моделирования.....	210
5.2	Применение разработанного программного обеспечения для проведения вычислительного эксперимента.....	230

5.2.1 Специализированное ПО, реализующее модель, основанную на технологическом принципе представления показателей.....	230
5.2.2 Специализированное ПО, реализующее модели, основанные на организационно-технологическом и на функционально-сетевом принципе представления показателей .....	240
5.3 Метод распределения ресурсов в сложных многоуровневых пассажирских транспортных системах с многокритериальным целеполаганием .....	248
5.3.1 Результаты проведения вычислительного эксперимента в РР-системе, основанной функционально-сетевом принципе представления показателей .....	248
5.3.2 Синтез оптимальной структуры распределения ресурсов в системе наземного пассажирского транспорта в г. Москве.....	255
Выводы по пятой главе.....	266
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	270
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	274
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	275
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	300
<i>Приложение А. Финансовый потенциал развития ГПТОП в городах РФ .....</i>	<i>301</i>
<i>Приложение Б. Листинг программного обеспечения, автоматизирующего расчёты в РР-системе, основанной функционально-сетевом принципе представления показателей .....</i>	<i>304</i>
<i>Приложение В. Документы, подтверждающие практическую значимость исследования.....</i>	<i>316</i>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** Транспорт играет важнейшую роль в стимулировании социально-экономического, промышленного и градостроительного развития субъектов РФ, поэтому при эффективном управлении создаёт необходимые предпосылки для формирования положительных макроэкономических показателей экономики РФ в целом. Анализ структуры налоговых платежей показывает, что в совокупности транспортные предприятия обеспечивают стабильный рост поступлений налогов и сборов в бюджетную систему РФ. Особенно важна их роль при формировании доходов региональных бюджетов, в которых они формируют от 4-6 до 12-20 % от общей суммы налоговых поступлений всех субъектов экономической деятельности в зависимости от специфики региона. Учитывая его существенный вклад в формирование внутреннего валового продукта, значительный уровень обеспеченности занятости населения и объём привлекаемых инвестиций, транспортный комплекс относится к числу ведущих отраслей экономики РФ. Однако положительный эффект не характерен для всех сегментов транспортного комплекса в РФ. Анализ статистических данных по финансированию городского пассажирского транспорта за последние десятилетия показывает обратно пропорциональную зависимость между показателями объёмного роста (количество перевезённых пассажиров) и показателями отраслевого финансирования. Потому реализацию заложенного в транспортный комплекс потенциала невозможно назвать удовлетворительной из-за локальной функциональной неэффективности. В анализе «Исследование финансового потенциала развития городского пассажирского транспорта», проведённом Российской академией транспорта (РАТ) в 2023-2024 гг., подчёркивается актуальность затронутой проблемы и её нерешённость из-за отсутствия эффективных универсальных моделей распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах, применяемых на всей территории РФ.

Важно отметить, что финансирование программ по развитию транспортного комплекса РФ, в основном, осуществляется из федерального бюджета или за счёт

инвестиций компаний с государственно-частным участием. Между тем, системный анализ проблемы неэффективности городского пассажирского транспорта показывает, что имеет место неэффективность системы управления, а именно – отсутствие эффективной системы распределения ресурсов, как основного инструмента достижения целей в сложных организационных системах. Поэтому неслучайно, ключевым направлением, декларируемым при реализации государственных программ и распоряжений Правительства РФ, является необходимость разработки инструментов эффективного распределения выделяемых ресурсов на их осуществление. Основные трудности создания универсальных объективных инструментов распределения ресурсов в транспортных системах определяются их сложной многоуровневой структурой, противоречивым целеполаганием и наличием высокой степени неопределённости вследствие активного влияния внутреннего и внешнего факторного пространства. В сложной многоуровневой иерархической системе управления транспортным комплексом при решении задачи распределения ресурсов основным элементом является модель получения транспортно-экономического баланса. В общей структуре функционала системы транспортного планирования в РФ, разработанной в Минтрансе РФ, модель транспортно-экономического баланса (ТЭБ) и модель баланса пассажирских перевозок (БПП) расположены на одном иерархическом уровне, что закономерно, так как эффективное сочетание (баланс) данных подсистем является обязательным условием функционирования всей системы управления транспортным комплексом (ТК РФ). Важно отметить, что ТЭБ и БПП являются подсистемами, основным функционалом которых является обработка данных, полученных из подсистем загрузки транспортной сети, аналитическое моделирование исследуемых процессов и выработка объективных рекомендаций для подсистем финансово-экономического моделирования, межотраслевого планирования и контроля.

Поэтому в целях эффективной реализации национальных программ по развитию транспортного комплекса РФ важнейшим направлением является разработка методологии управления, направленной на преобразование системы

транспортного планирования, использующей научно-обоснованные модели распределения ресурсов в транспортных системах. Подтверждением тому является констатация необходимости её разработки в «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» (далее Транспортной стратегии). В Транспортной стратегии указано, что приоритетным направлением развития ТК РФ является создание эффективных моделей управления пассажирскими транспортными системами.

**Степень разработанности проблемы.** Основоположниками научных исследований в области процессов эффективности и разработки прикладных математических методов управления в сложных системах являются математики-экономисты Л.В. Канторович (лауреат Нобелевской премии) и С.С. Шаталин. Их исследования применялись при разработке методов стратегического планирования в СССР. В последующие годы на основе исследований Л.В. Канторовича и С.С. Шаталина в области методов программно-целевого стратегического планирования для комплекса межотраслевых задач планирования была разработана концепция координационного взаимодействия при организации межотраслевого управления в условиях плановой системы народного хозяйства. В 70-80-х годах прошлого века методы стратегического планирования в сфере межотраслевого взаимодействия совершенствовались отечественными учёными В.М. Архиповым, В.В. Леонтьевым, Ю.В. Яременко, А.И. Анчишкиным и другими, которые исследовали и разрабатывали модели сбалансированного межотраслевого развития на основе общей теории систем. Системные научные разработки применительно к методам совершенствования структур управления в контексте стратегической эффективности экономики производились в 70-80-е годы прошлого века и другими учёными, приверженцами фундаментальной теории общих систем, такими как, Б.З. Мильнер, В.С. Рапопорт, О.С. Виханский и др.

На современном этапе характерной особенностью развития теории эффективностей является переход от понятия «эффективность», как синонима экономической результативности производства, к понятию «эффективность», как синонима результативности управления (эффективность управления), под

эффективностью понимают соотношение между результатом деятельности и некой характеристикой (ресурсом), необходимой для достижения требуемого результата. Понятие эффективность уже не ассоциируется только с набором финансовых показателей, но является совокупным результатом, требующим учёта как финансовых, так и нефинансовых показателей. Данная концепция была разработана Р.С. Капланом и Д.П. Нортон, получила наименование «balanced scorecard» и была признана в качестве признанного мирового стандарта. Согласно «balanced scorecard» выбор стратегии осуществляется как решение многокритериальной задачи в целях проактивного управления. Методы решения задач в многокритериальных информационных ситуациях рассматривались ещё в XIX веке Ф. Эджуортом и В. Парето. Они определяли искомым эффективным состоянием такое состояние (распределение товаров между потребителями), которое не может быть улучшено путем перераспределения товаров ни для одного участника без «ущемления интересов» некоторых других участников. Такие состояния были названы С. Смейлом критическими точками Парето. Методы получения Парето-оптимальных решений активно исследовались и разрабатывались отечественными и зарубежными учёными – Подиновским В.В., Ногиным В.Д., Бусленко Н.П., Черноруцким И.Г., Эрроу К.Дж. и др., доказавшими, что свойства множества эффективных решений имеет важнейшее прикладное значение для задач поиска оптимума баланса распределения ресурсов в сложных системах.

Выше отмечалось, что в сложных системах транспортного комплекса управление и планирование деятельности затрудняется многочисленными факторами неопределенной природы. Поэтому к разработке методов теории принятия решения в условиях неопределённости регулярно обращались учёные, и интерес к данной научной тематике не ослабевает.

В разработку теории принятия решений в условиях неопределённости внесли существенный вклад отечественные и зарубежные ученые Белман Р., Вильсон А., Заде Л.А., Мартин Н., Мушик Э., Мюллер П., Ногин В.Д., Подиновский В.В., Саати Т., Таха, Хедми А., Штойер Р. и другие. В работах перечисленных авторов

рассматривается значительное количество моделей, позволяющих эффективно решать задачи в сложных системах в зависимости от условий их функционирования. Однако в большинстве практических случаев при решении прикладных задач, где возникает потребность в руководстве по принятию решений, допускают упрощение, используя методы экспертного оценивания, что, в свою очередь, вносит субъективизм в процедуры получения решений и приводит к значительным финансовым издержкам при реализации масштабных проектов управления.

**Целью диссертационного исследования** является разработка методологии распределения ресурсов в логистических многоуровневых пассажирских транспортных системах с многокритериальным целеполаганием на основе методов теории принятия решений в условиях неопределённости.

Для достижения цели исследования в диссертации поставлены **следующие задачи**.

1. Разработать основные научные положения логистики управления структурой многоуровневой системы с противоречивым целеполаганием и функционирующей в условиях неопределённости, в области методов определения эффективного распределения ресурсов, позволяющих реализовать концепцию сбалансированного развития транспортного комплекса.

2. Разработать варианты представления и комплекс моделей структуры логистической системы распределения ресурсов, дифференцируемых в зависимости от технологических и организационных принципов на основе существующей практики закрепления управляющих функций между субъектами управления, облегчающих формулировку и решение задач её расчета, анализа и синтеза.

3. Разработать научные подходы распределения ресурсов в логистических пассажирских транспортных системах на основе теории принятия решений в условиях неопределённости, исключаящую необходимость экспертного оценивания показателей (вероятностных характеристик, оценочных

данных влияния внутреннего и внешнего факторного пространства и т.д.) на исследуемые процессы.

4. Разработать комплекс математических моделей и алгоритмов поиска оптимальных решений в логистических транспортных системах распределения ресурсов в условиях неопределённости, как функции ценности, ожидание которой представляет отношение нестрогого предпочтения во множестве вероятностных распределений.

5. Разработать исследовательское программное обеспечение (ПО), позволяющее выполнять расчеты в комплексе математических моделей и алгоритмов поиска оптимальных решений в логистических транспортных системах распределения ресурсов в условиях неопределённости.

6. Произвести численный эксперимент в многоуровневой системе распределения ресурсов городского пассажирского транспорта, распределенной по видам транспорта и агрегатированной на функциональные подсистемы, проанализировать результаты полученных значений весовых коэффициентов, соответствующих максимально возможному состоянию эффективности и тождественных по физическому смыслу значениям коэффициентов распределения ресурсов.

7. Синтезировать оптимальную структуру системы распределения ресурсов, состоящей из набора коэффициентов распределения ресурсов, соответствующих отдельным элементам во всех агрегатированных подсистемах и на всех иерархических уровнях исследуемой пассажирской транспортной системы.

**Объектом исследования** является система распределения ресурсов, как комплекс прикладных математических моделей, оптимизирующих управление на межотраслевом уровне взаимодействия в логистических многоуровневых организационных структурах на образованиях пассажирского транспорта

**Предметом исследования** является процесс синтеза оптимальных стратегий управления информационными состояниями в логистических пассажирских транспортных системах на основе теории принятия решений в условиях неопределённости

**Научная гипотеза.** Синтез оптимальных стратегий управления распределением ресурсов в сложных пассажирских транспортных системах необходимо производить на основе теории принятия решений в условиях неопределённости. Аналитические модели теории принятия решений должны быть получены как результат многокритериальной оптимизации, позволяющей исключать субъективизм, вызванный информационной неопределённостью при формировании эффективных систем распределения транспортного обслуживания населения в субъектах РФ.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем.

1. Разработана концепция структуры системы распределения ресурсов в логистических многоуровневых пассажирских транспортных системах, заключающаяся в многообразии моделей её описания (модель структуры системы распределения ресурсов, основанная на технологическом принципе, на организационно-технологическом принципе и на функционально-сетевом принципе представления показателей), построенных на едином принципе формирования отдельных блоков морфологических матриц выбора сценариев распределения ресурсов с учётом показателя эффективности или оценочного функционала.

2. Разработан комплекс математических моделей поиска оптимального решения многокритериальных задач в системах распределения ресурсов в условиях неопределённости, в основе решения которых положен метод определения функции ценности, математическое ожидание которой представляет отношение нестрогого предпочтения во множестве вероятностных распределений.

3. Разработана методология синтеза оптимальной структуры распределения ресурсов при управлении логистическими системами городского пассажирского транспорта как последовательность представления, математического описания и анализа многоуровневой сложной системы на основе теории принятия решений в условиях неопределённости, исключающая необходимость экспертного оценивания значимости оценочного функционала.

4. Разработаны алгоритмы, реализующие три проблемно-ориентированные стратегии, основанные на различных формах представления системы распределения ресурсов (РР-системы) в пассажирских транспортных системах:

– алгоритм исследования эффективности функционирования отдельных видов транспорта в РР-системе ГПТ;

– алгоритм исследования эффективности действий фактических субъектов управления, отвечающих за организацию функционирования отдельных локаций транспортных систем;

– алгоритм исследования эффективности функционирования транспортных систем, как совокупности отдельных видов транспорта в информационно-аналитических платформах.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в разработке методологии, позволяющей решать следующие задачи, масштабируемые от уровня показателей отдельного предприятия до показателей транспортного комплекса национальной экономики РФ.

1. Оценка влияния проектов (сценариев) развития транспортной системы на достижение конкретных показателей Транспортной стратегии РФ на период до 2030 года.

2. Объективное обоснование корректировок в стратегии, необходимых при изменении внутреннего или внешнего факторного пространства, в привязке к целевым индикаторам реализации Транспортной стратегии РФ на период до 2030 года.

3. Комплексная оценка эффективности проектов развития транспортной инфраструктуры с учётом взаимного влияния различных видов транспорта и различных объектов транспортной инфраструктуры.

4. Разработано исследовательское программное обеспечение (ПО), позволяющее выполнять расчёты в комплексе математических моделей и

алгоритмов поиска оптимальных решений в логистических транспортных системах распределения ресурсов в условиях неопределённости.

**Методология исследования** основывается на базовых принципах системного анализа, предполагающих обязательные этапы (анализ исследуемой системы; формирование цели исследования, математическое формулирование проблемы исследования; построение математической модели системы; оптимальный синтез системы на основе построенных моделей); теории эффективностей (задача оценки эффективности при выборе рационального способа действий – стратегии распределения ресурсов); методах управления информационными ситуациями в условиях неопределённости факторного пространства с неизвестными функциями принадлежности (алгоритм снятия неопределённости в системе с последующей целенаправленной процедурой, направленной на детерминацию информационной среды); теории принятия решений, а именно – специальных прикладных методах, исключающих необходимость экспертного оценивания оценочного функционала (вероятностных характеристиках, оценочных данных влияния внутреннего и внешнего факторного пространства и т.д.) исследуемых процессов; теории сложных многоуровневых систем с учётом специфических условий работы пассажирского транспорта (динамичность, неустойчивость транспортных потоков, нестабильность во времени показателей использования подвижного состава и результативных показателей транспортных предприятий, региональная разнородность по климатическим и географическим условиям и т.д.); методов решения многокритериальных задач (методы векторной оптимизации).

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Основные научные положения, соответствующие логистике управления структурой многоуровневой системы, как системы с противоречивым целеполаганием и функционирующей в условиях неопределённости.

2. Варианты представления и комплекс моделей структуры сложной системы распределения ресурсов, дифференцируемых в зависимости от

технологических и организационных принципов на основе существующей практики закрепления управляющих функций между субъектами управления.

3. Комплекс математических моделей и алгоритмов поиска оптимальных решений в логистических транспортных системах распределения ресурсов в условиях неопределённости.

4. Алгоритмы исследовательского ПО, позволяющие выполнять расчёты в комплексе математических моделей и алгоритмов поиска оптимальных решений в логистических транспортных системах распределения ресурсов в условиях неопределённости.

5. Результаты численного эксперимента – модели получения значений весовых коэффициентов, соответствующих максимально возможному состоянию эффективности и тождественных по физическому смыслу значениям коэффициентов распределения ресурсов.

6. Оптимальная структура системы распределения ресурсов, состоящая из набора коэффициентов распределения ресурсов, соответствующих отдельным элементам во всех агрегатированных подсистемах и на всех иерархических уровнях исследуемой логистической пассажирской транспортной системы.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 2.9.9 Логистические транспортные системы:

– пункт 1. Организационно-технологические и управленческие структуры в логистических транспортных системах;

– пункт 6. Информационные системы управления элементами, подсистемами и транспортно-логистической системой в целом, включая цифровые и интеллектуальные технологии, телематику;

– пункт 9. Организационно-технологические решения в области интеллектуализации и цифровизации транспортно-логистических процессов, идентификации и мониторинга объектов и процессов.

**Личный вклад автора.** Основные идеи, положенные в основу методологии распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах на основе теории

принятия решений в условиях неопределённости, принадлежат автору. Автором исследования последовательно были выполнены следующие этапы разработки РР-системы.

1. Анализ факторов влияния и определения вероятностных характеристик параметров исследуемой системы.
2. Формализация объекта (формирование сложной системы в виде иерархической структуры свойств).
3. Разработка системы показателей для количественной оценки транспортного комплекса.
4. Выбор и формализация оценочного потенциала и критериев принятия решений.
5. Разработка математической модели для связи оценочного функционала с показателями качества транспортного комплекса.
6. Проверка модели и при необходимости её корректировка.
7. Выбор метода оптимизации проведения расчётов и поиск модели распределения ресурсов с оптимальными характеристиками по целеполаганию.

**Степень достоверности** проведённых исследований обоснована:

- применением фундаментальных принципов системного анализа, реализованных в классической методологии формирования системы расчётных случаев при выборе сценария распределения ресурсов в сложной организационно-технической системе и оценке её эффективности;
- использованием для объективной оценки в РР-системах аналитических инструментов, основанных на теории принятия решений в условиях неопределённости и исследовательского ПО (алгоритмический язык С++), подтвердившего эффективность разработанных методов в сравнении с апробированными методами, в частности – с методом определения весовых коэффициентов (оценки Фишберна и др.);
- публикациями автора в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ;

– результатами численного эксперимента, проведенного на разработанном ПО.

**Апробация результатов работы.** Результаты исследования доложены, обсуждены и одобрены на всероссийских и международных конференциях.

1) Международная научная конференция - II Зельднеровские чтения «Территориально локализованные точки роста: российский и зарубежный опыт», 27 апреля 2024 г., РАНХиГС, г. Москва.

2) Международная научная конференция - «2025 Intelligent technologies and electronic devices in vehicle and road transport complex» (TIRVED-2025), 12-14 ноября 2025 г., МАДИ, г. Москва.

3) XIV Всероссийское совещание по проблемам управления, посвященное 85-летию Института проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, 17-20 июня 2024 года, г. Москва.

4) VI Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и разработки 2026», 5 июня 2026 г., МЦНС «Наука и Просвещение», г. Пенза.

5) XXIX Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной науки», 5 июня 2026 г., МЦНС «Наука и Просвещение», г. Пенза.

Результаты исследования внедрены в работу следующих предприятий и образовательных учреждений.

1) ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта (ОАО «НИИАТ») для совершенствования технологий и систем организации перевозок на пассажирском транспорте.

2) ООО ГК «Альтекс» для совершенствования системы распределения ресурсов при организации перевозок.

3) ООО «ПРЯМЫЕ ДОРОГИ» для совершенствования системы организации перевозок.

4) ФГБОУ ВО «Государственный университет управления» в учебный процесс.

5) ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» в учебный процесс.

Результаты исследования реализованы в разработке и регистрации следующих программ для ЭВМ: «Программное обеспечение универсального бортового компьютера для мониторинга технических показателей транспортных средств» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660177 от 08.04.2025) и «Программное средство выбора оптимального распределения ресурсов в пассажирской транспортной системе» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025669731 от 30.07.2025).

**Публикации.** По теме работы опубликовано 17 работ общим объёмом 12,3 печатных листа. Из них 11 работ по специальности 2.9.9. Логистические транспортные системы и 2 работы по смежной специальности 2.9.4 Управление процессами перевозок в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, получено 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка сокращений и приложений. Общий объём диссертационного исследования составляет 320 страниц машинописного текста, включающего 74 рисунка и 21 таблицу. Библиографический список состоит из 243 наименований.

# 1. ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ РФ

## 1.1 **Значимость разработки методологии эффективного распределения ресурсов в транспортных системах для экономики РФ**

Транспортный комплекс Российской Федерации представляет собой одну из ключевых инфраструктурных систем, обеспечивающих экономическое развитие страны и качество жизни населения. Эффективное функционирование транспортных систем напрямую влияет на территориальную связанность регионов, доступность социальных и экономических благ для граждан, а также – на конкурентоспособность национальной экономики в целом. В условиях масштабности территории Российской Федерации, неравномерности распределения населения и экономической активности по регионам, вопросы оптимального распределения ресурсов в транспортной отрасли приобретают особую актуальность и стратегическую значимость. [1, 2, 3].

Анализ динамики финансирования транспортного комплекса за последние годы свидетельствует о существенном росте государственных инвестиций в развитие транспортной инфраструктуры. Согласно данным, представленным на рисунке 1.1 (а), фактическое финансирование транспортного комплекса за период с 2010 по 2020 год увеличилось в три раза, а в перспективе до 2030 года планируется увеличение объёмов финансирования на порядок [4].



Рисунок 1.1 (а) – Динамика финансирования транспортного комплекса в РФ.

Источник: [4]

Такое масштабное наращивание капитальных вложений отражает стратегическое понимание государством роли транспортной инфраструктуры как фундамента социально-экономического развития. Однако столь значительный рост инвестиций одновременно ставит перед научным сообществом и практиками сложнейшую задачу обеспечения эффективности использования выделяемых средств.

Следует отметить, что финансирование программ по развитию транспортного комплекса Российской Федерации осуществляется преимущественно из федерального бюджета или за счёт инвестиций компаний с государственно-частным участием (рисунок 1.1 (б)). Это обстоятельство накладывает дополнительную ответственность на механизмы принятия решений о распределении ресурсов, поскольку речь идет об использовании значительных объёмов государственных средств, эффективность применения которых должна

быть научно обоснована и подтверждена соответствующими методологическими подходами.

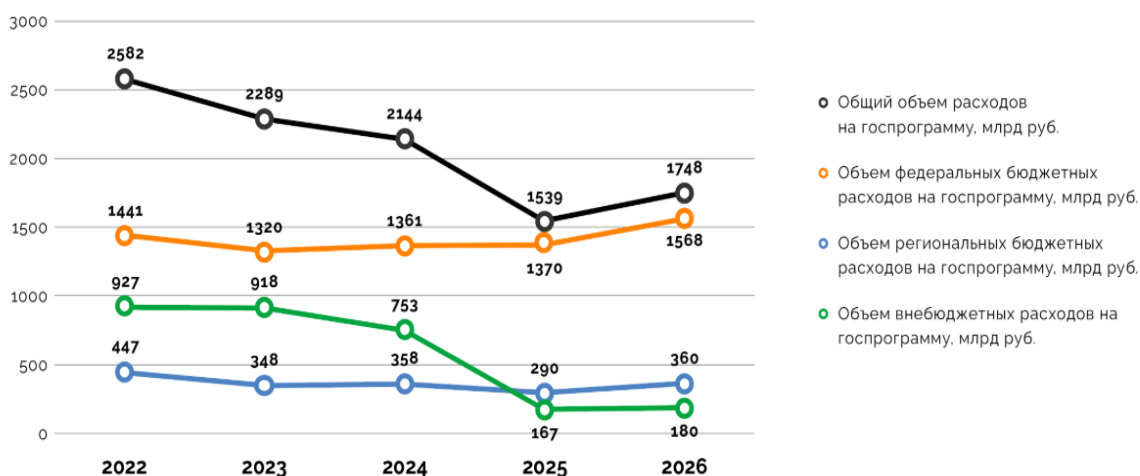


Рисунок 1.1 (б) – Динамика финансирования транспортного комплекса в РФ с 2022 по 2026 гг. Источник: [4]

Результаты исследования финансового потенциала развития городского пассажирского транспорта, проведенного Российской академией транспорта в 2023-2024 годах, выявили критическую картину состояния транспортных систем в городах России [5]. Согласно представленным в исследовании данным, города Российской Федерации по степени финансовой обеспеченности транспортных систем можно разделить на три категории. Первую группу составляют всего пять городов из четырех регионов, включая Санкт-Петербург, Якутск, Мурманск, Сургут и Нижневартовск, которые полностью покрывают эксплуатационные расходы и инвестиционные потребности своих транспортных систем, что составляет лишь 3,8 процента от общего числа рассматриваемых городов. Вторая группа включает тридцать пять городов из шестнадцати регионов, что составляет 27 процентов, которые способны полностью покрывать эксплуатационные расходы, однако инвестиции в развитие транспорта обеспечиваются только на уровне от 20 до 97 процентов от нормативной потребности. Наиболее тревожной является третья группа, объединяющая девяносто один город из пятидесяти

четырёх регионов, что составляет 69 процентов, где не покрываются даже базовые эксплуатационные расходы на транспортное обслуживание населения.

Такая статистика свидетельствует о глубоком системном кризисе в области финансирования и управления городским пассажирским транспортом общественного пользования в большинстве российских городов. Данная ситуация обусловлена не только объективным недостатком финансовых ресурсов, но и отсутствием научно обоснованных универсальных моделей распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах, применяемых на всей территории Российской Федерации с учётом региональной специфики и различий в масштабах городов.

Расчёты, представленные в исследовании Российской академии транспорта, показывают, что для развития систем городского пассажирского транспорта общественного пользования в 131 городе Российской Федерации потребуются значительные ресурсы. Эксплуатационные расходы оцениваются в 708,8 миллиардов рублей ежегодно, что составит 5670 миллиардов рублей за восьмилетний период. При этом региональные и муниципальные фонды должны обеспечить 651,6 миллиарда рублей в год, что составит 5212 миллиардов за восемь лет, а федеральный фонд должен выделять 57,3 миллиарда рублей ежегодно, что составит 458,8 миллиарда за весь период. Что касается инвестиционного потенциала, исходя из норматива 30000 рублей на одного жителя с приоритетом развития городского электрического транспорта, включающего трамвай, электробус и троллейбус, общая потребность оценивается в 1728 миллиардов рублей. Из этой суммы региональные и муниципальные фонды должны обеспечить 334,5 миллиарда рублей, а федеральный фонд должен предоставить 1394 миллиарда рублей [5].

Данные расчёты демонстрируют масштаб финансовых потоков в транспортной отрасли, которые необходимо эффективно распределять. В настоящее время отсутствует методология распределения ресурсов на основе теории принятия решений в условиях неопределенности, что может привести к

неэффективному использованию средств и недостижению целевых показателей пассажирских транспортных систем.

Анализ статистических данных о динамике пассажирских перевозок, представленных на рисунке 1.2, свидетельствует о существенных изменениях в структуре и объёмах транспортного обслуживания населения Российской Федерации за последние годы. Наблюдается тревожная тенденция снижения общего количества перевезенных пассажиров транспортом общего пользования, что отражает комплекс проблем, включающих снижение качества транспортного обслуживания, недостаточное обновление подвижного состава, отток пассажиров на личный автомобильный транспорт и альтернативные формы мобильности [5].



Рисунок 1.2 – Количество перевезенных пассажиров в РФ транспортом общего пользования. Источник: разработано автором по данным [5]

Особую тревогу вызывает структура перевозок пассажиров по видам транспорта, проиллюстрированная на рисунке 1.3. Данные убедительно свидетельствуют о деградации системы перевозок городским электрическим

транспортом, удельный вес которого в общей структуре объёмов перевозок неизбежно снижается. Эта тенденция противоречит современным принципам устойчивого развития городских территорий и экологическим императивам, поскольку городской электрический транспорт является наиболее экологичным и энергоэффективным видом общественного транспорта [6, 7, 8, 9].

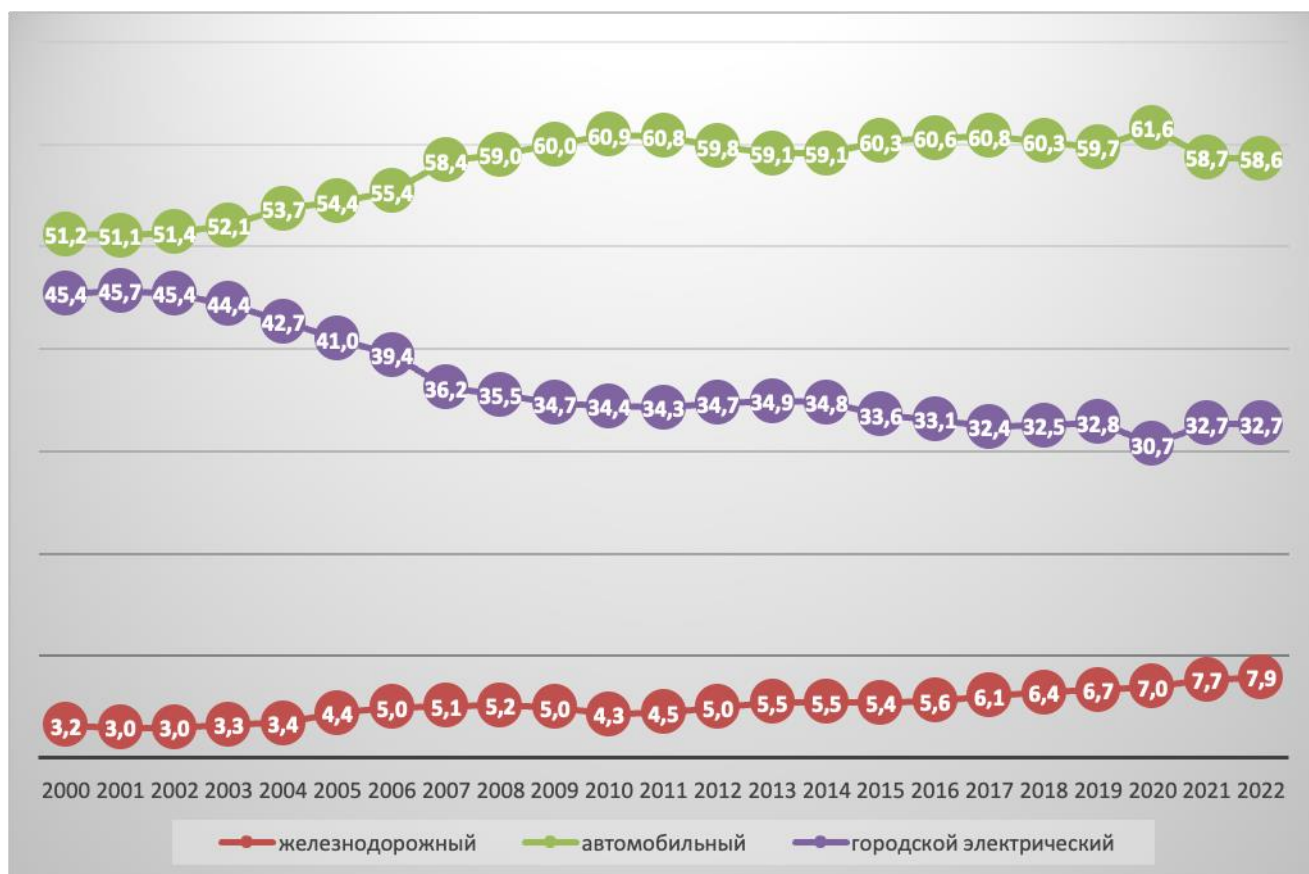


Рисунок 1.3 – Структура перевозок пассажиров по видам транспорта в РФ, %

Источник: разработано автором по данным [5]

Данное снижение в пользу автобусного транспорта ведёт к увеличению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу городов и росту транспортных издержек.

Анализ ситуации на примере города Москвы, представленный в таблице 1.1, позволяет оценить какие серьёзные задачи по распределению ресурсов стоят в крупных городах и мегаполисах. Москва является крупнейшим транспортным узлом страны, и на своём примере демонстрирует высокую степень развития

различных видов транспорта. Общий объём перевозок в столице составляет 2,15 миллиарда пассажиров в год, что эквивалентно 11,4 миллионам поездок ежедневно. При этом структура распределения пассажиров по видам транспорта весьма неравномерна: метрополитен обеспечивает 60 процентов перевозок, автобусное сообщение составляет 25,7 процента, городская железная дорога обслуживает 8,3 процента пассажиропотока, трамвай перевозит 3,7 процента, электробусы обеспечивают 2,2 процента, а троллейбусы практически выведены из эксплуатации и составляют лишь 0,1 процента перевозок.

Важнейшим показателем, характеризующим масштаб инфраструктурных объектов транспортной системы, является количество объектов инфраструктуры, необходимых для обеспечения функционирования различных видов транспорта. Согласно данным таблицы 1.1, для обслуживания транспортного комплекса Москвы требуется 54 объекта для хранения подвижного состава, 10 688 маршрутных объектов инфраструктуры и 50 объектов для технического обслуживания и ремонта. Эти цифры наглядно демонстрируют сложность задачи планирования, размещения и финансирования объектов транспортной инфраструктуры, требующей применения современных методов многокритериальной оптимизации и принятия решений в условиях множественных ограничений.

Таблица 1.1 – Объем перевозок и процент распределения по видам транспорта, г. Москва, 2022 г.

Объем перевозок по видам транспорта (пассажиры в тысячах)								
Показатели Вид ГПТ	Протяженность маршрутной сети, км	Кол-во перевоз. пасс, млн. чел.	Кол-во маршрутов	Кол- во ПС	Кол-во объектов инфраструктуры			% распред. пасс по видам т
					Хранение	Маршрутные	ТО + ТР	
Трамвай	183,1	152,2	43	700	5 ТП	958	4 ТП	3,7 %
Троллейбус	9,5	0,0142	1	18	1 ТП	8	1 ТП	0,1 %
Электробус	790	117,3	117	1300	3 ЭП	1400	3 ЭП	2,2 %
Автобус	7995,5	877	795	4800	20 АП	8600	17 АП	25,7 %
Метрополитен	460,5	2070	14	5956	20 ЭД	263	20 ЭД	60 %
ЖД (городская)	357	250	5 тактовых	155	5 ЖД Д	167	5 ЖД/Д	8,3 %
ИТОГО:	9795,6	2,15 млрд чел. (ежедневно 11,4 млн)	975	12929	54	10688 (при условии совмещенных)	50	100 %

ТП – трамвайный парк (троллейбусный парк)

ЭП – электробусный парк

АП – автобусный парк

ЭД – депо электротранспорта (метрополитен)

ЖД Д – железнодорожное депо

Объекты инфраструктуры являются ключевым показателем для оценки содержания, развития и эффективности деятельности транспортного комплекса. Разнородный характер задач, связанных с управлением этими объектами, требует их агрегирования по отдельным группам или стратам в соответствии с классификационными признаками, такими как тип подвижного состава, технологические особенности эксплуатации, территориальное расположение и критерии эффективности функционирования. Отсутствие единой методологической основы для такой классификации и последующего распределения ресурсов между различными стратами объектов инфраструктуры приводит к неоптимальным управленческим решениям и снижению общей эффективности транспортной системы.

Для решения накопившихся проблем планируется внедрение автоматических систем управления транспортным комплексом, в основу которых положена система моделирования транспортных потоков. Согласно концепции, представленной на рисунке 1.4, процесс моделирования включает несколько последовательных стадий, направленных на реализацию национальных программ по повышению эффективности транспортного комплекса до 2030 года [10]. Однако успешное внедрение таких систем невозможно без надежной методологической базы, позволяющей принимать обоснованные решения в условиях неопределённости исходных данных, изменчивости внешних факторов и множественности критериев эффективности [4].

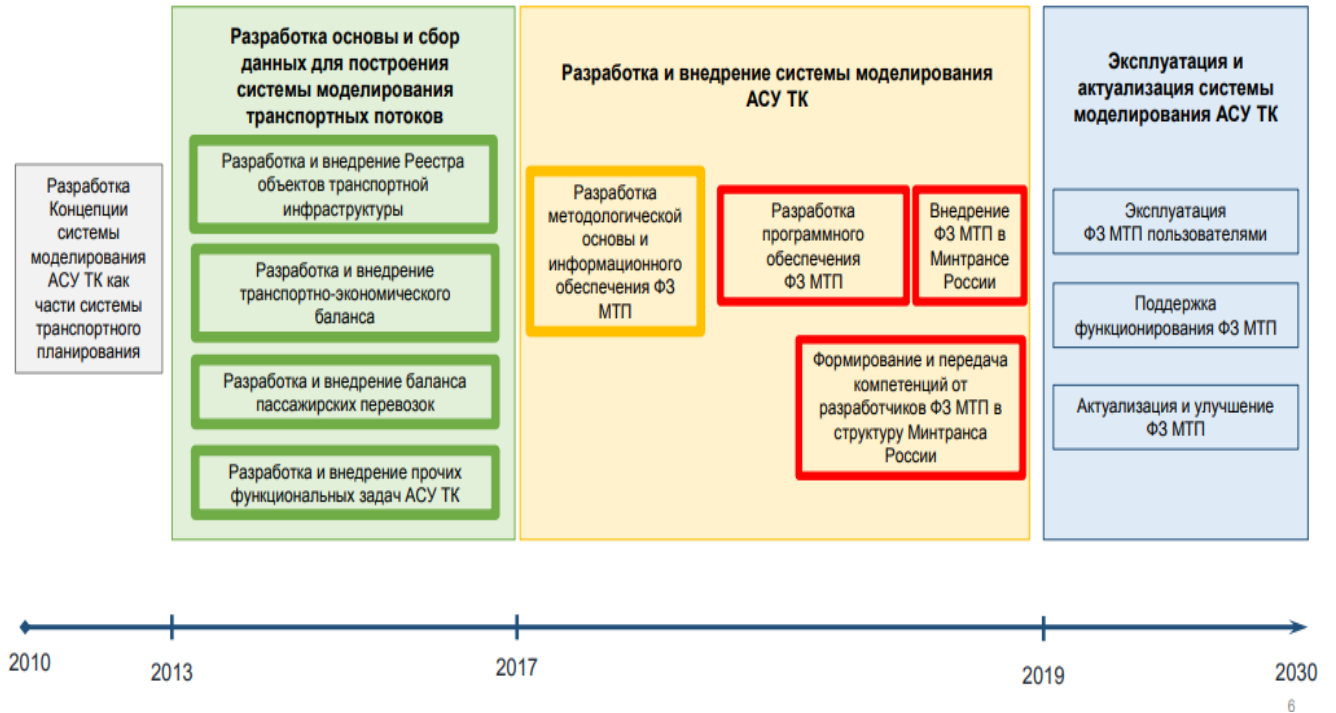


Рисунок 1.4 – Стадии решения задачи моделирования транспортных потоков в целях реализации национальных программ по повышению эффективности транспортного комплекса до 2030 г. Источник: [4]

Функционал системы транспортного планирования в составе автоматизированной системы управления транспортным комплексом, показанный на рисунке 1.5, включает широкий спектр задач, от прогнозирования пассажиропотоков до оптимизации маршрутных сетей и графиков движения. Эффективная реализация этих функций требует интеграции различных методов моделирования, оптимизации и принятия решений, что предполагает наличие единой методологической платформы, способной обеспечить согласованность решений на всех уровнях планирования и управления транспортной системой [4].

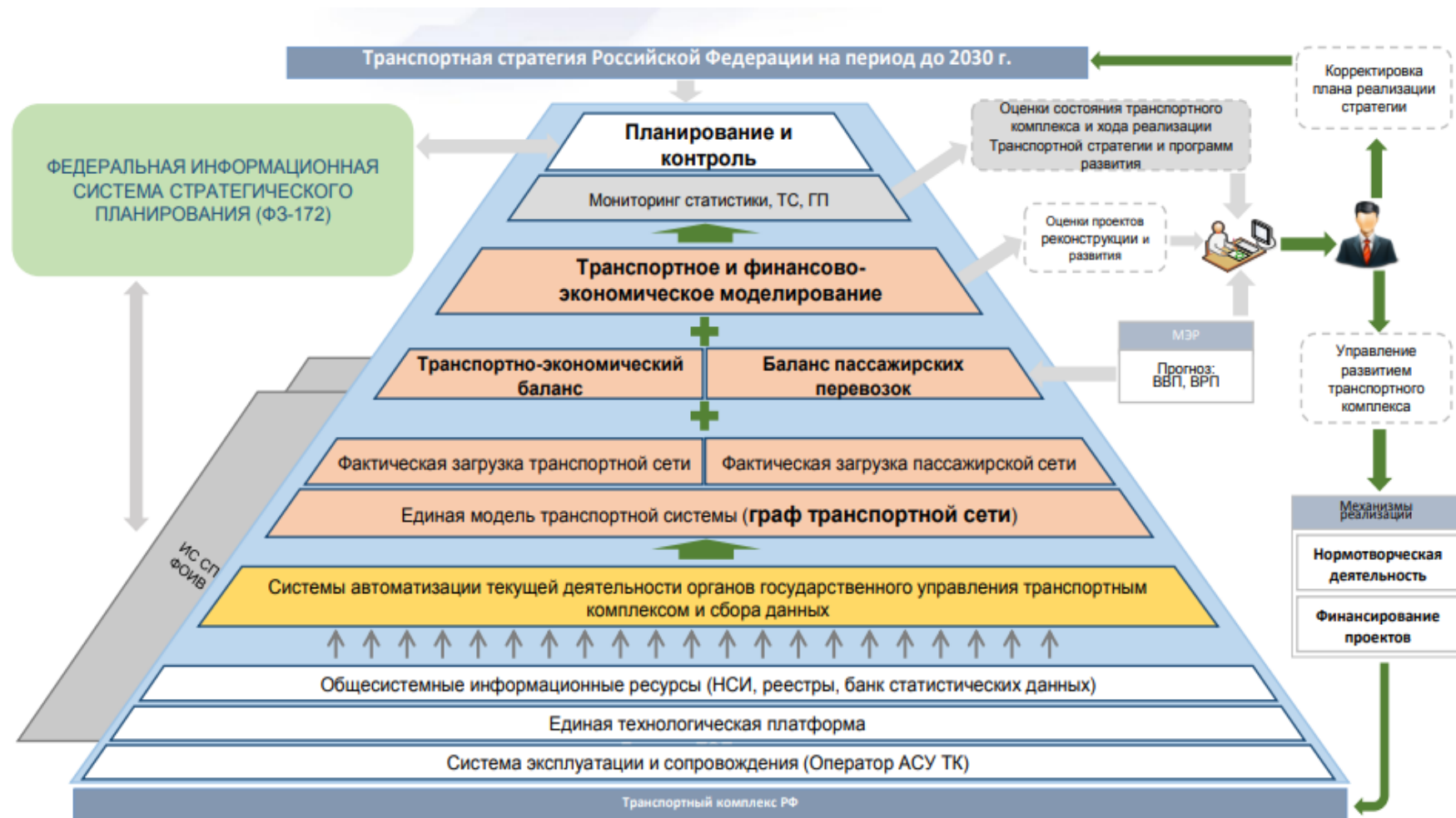


Рисунок 1.5 – Функционал системы транспортного планирования в АСУ ТК. Источник: [4]

Масштаб планируемых капитальных вложений в развитие транспортного комплекса Российской Федерации, представленный на Рисунке 1.6, в рамках Транспортной стратегии на период до 2030 года, подчеркивает стратегическую важность разработки эффективных механизмов распределения инвестиционных ресурсов. Значительные объёмы финансирования должны быть направлены на развитие различных видов транспорта, модернизацию существующей инфраструктуры, внедрение новых технологий и повышение качества транспортного обслуживания населения. При этом решения о распределении ресурсов должны приниматься на основе объективных критериев эффективности с учётом множества факторов, включая социальные, экономические, экологические и технологические аспекты [11].

Особенную сложность в постановке и создании системы моделирования и распределения ресурсов представляет необходимость учитывать многообразие целей и альтернативных средств их достижения, разнообразие видов транспорта для решения поставленных задач, а также неоднозначность затрат на реализацию проектов при распределении ресурсов. Актуальность и необходимость многокритериальной оценки подтверждается многочисленными научными публикациями, в которых подчёркивается сложность структуры показателей результативности предоставления транспортной услуги при необходимости соответствия действующим нормативным актам Российской Федерации [12].

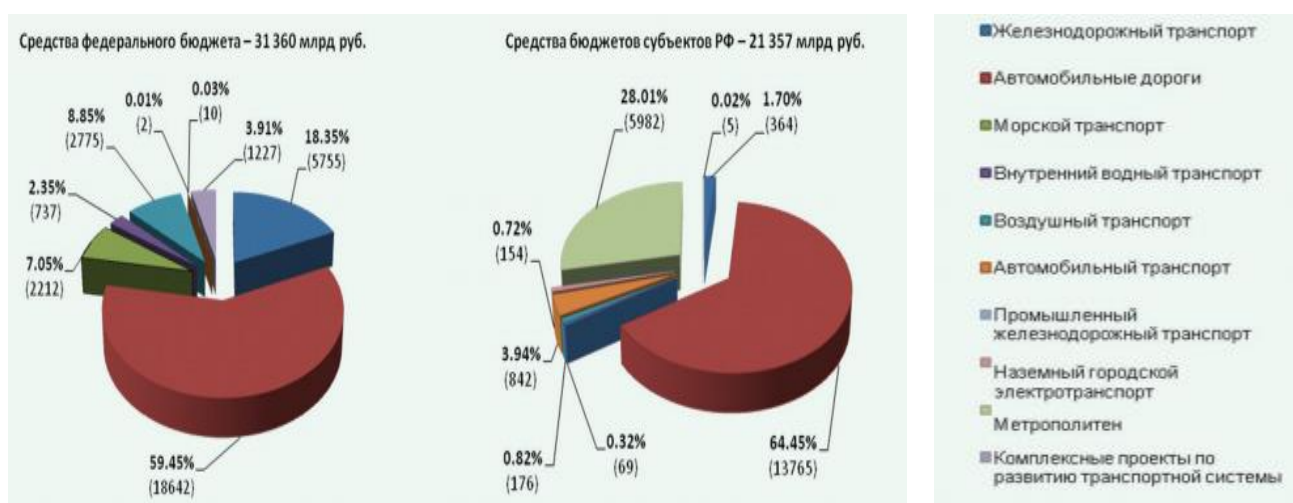


Рисунок 1.6 – Капитальные вложения в реализацию программы Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Источник: [11]

Система показателей результативности предоставления транспортной услуги, представленная на рисунке 1.7, демонстрирует многоаспектность оценки эффективности функционирования транспортных систем в соответствии с действующими нормативными актами. Эта система включает показатели доступности транспортных услуг, их качества, безопасности, экологичности, экономической эффективности и социальной значимости. Комплексный учёт всех этих показателей при принятии решений о распределении ресурсов требует применения методов многокритериальной оптимизации и теории принятия решений в условиях неопределённости [12].

Декомпозиция системы показателей качества транспорта общего пользования, представленная на рисунке 1.8, иллюстрирует иерархическую структуру критериев оценки, включающую показатели различных уровней детализации. На верхнем уровне находятся интегральные показатели качества транспортного обслуживания, которые декомпозируются на частные показатели, характеризующие отдельные аспекты функционирования транспортной системы. Такая иерархическая структура требует разработки методов агрегирования частных показателей в интегральные оценки и механизмов учета приоритетов различных критериев при принятии решений о распределении ресурсов [12].

Анализ представленных данных позволяет сформулировать ключевые вызовы, стоящие перед научным сообществом и практиками в области управления транспортными системами. Во-первых, это необходимость обработки и анализа больших объёмов разнородной информации о состоянии транспортных систем, пассажиропотоках, технических характеристиках подвижного состава и инфраструктуры, финансовых показателях и множестве других факторов. Во-вторых, это необходимость принятия решений в условиях неопределённости, обусловленной изменчивостью внешних условий, неполнотой информации, случайным характером многих процессов в транспортных системах. В-третьих, это необходимость согласования множественных, часто противоречивых целей различных заинтересованных сторон, включая государственные органы, транспортные предприятия, пассажиров и общество в целом.

Существующие подходы к планированию и управлению транспортными системами во многих случаях основаны на упрощенных моделях, не учитывающих всю сложность реальных процессов, или на экспертных оценках, субъективность которых может приводить к неоптимальным решениям. Отсутствие единой научно обоснованной методологии распределения ресурсов приводит к тому, что решения принимаются преимущественно на основе административных критериев или сложившейся практики, без должного учета экономической эффективности, социальной значимости и перспектив развития различных направлений инвестирования.

Групповые свойства услуги	Показатели качества
1. Информативность	Информация: <ul style="list-style-type: none"> <li>• об отправлении и прибытии транспортных средств;</li> <li>• о предоставляемых пассажирам услугах и их стоимости;</li> <li>• о размещении необходимых помещений, средств связи, объектов общественного питания и др.</li> </ul>
2. Комфортность	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Площадь (объем) помещения, приходящаяся на одного пассажира</li> <li>• Частота уборки транспортных средств и помещений</li> <li>• Температура воздуха в транспортном средстве и помещениях</li> <li>• Освещенность в транспортном средстве и помещениях</li> <li>• Допустимые значения шума, вибрации и влажности</li> <li>• Среднее (допустимое) наполнение салона транспортного средства и помещений.</li> </ul>
3. Скорость	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Продолжительность</li> <li>• Средняя скорость движения транспортного средства</li> <li>• Частота остановок транспортного средства.</li> </ul>
4. Своевременность	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Доля транспортных средств, отправляемых по расписанию</li> <li>• Долю транспортных средств, прибывающих по расписанию</li> <li>• Средний интервал движения транспортных средств- Максимальный интервал движения транспортных средств.</li> </ul>
5. Сохранность багажа	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Процент багажных отправок, прибывающих с повреждениями</li> <li>• Средняя стоимость ущерба от повреждения багажа</li> <li>• Стоимость возмещения от потери багажа.</li> </ul>
6. Безопасность	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Надежность функционирования транспортных средств (ресурс, срок службы, вероятность безотказной работы, наработка на отказ, периодичность контроля технического состояния транспортных средств органами государственного надзора, наличие документа, подтверждающего допуск транспортного средства к эксплуатации)</li> <li>• Профессиональная пригодность исполнителей транспортных услуг (стаж работы на занимаемой должности, уровень квалификации (класс вождения), периодичность повышения квалификации, число нарушений управления транспортными средствами и должностных инструкций за определенный период)</li> <li>• Готовность транспортного средства к выполнению конкретной перевозки (укомплектованность экипажем, съемным оборудованием и инвентарем, обеспеченность нормативной документацией, маршрутными картами, и др.).</li> </ul>

Рисунок 1.7 – Показатели результативности предоставления транспортной услуги в действующих нормативных актах РФ. Источник: [12]



Рисунок 1.8 – Декомпозиция системы показателей качества транспорта общего пользования. Источник: [12]

В условиях ограниченности финансовых ресурсов и необходимости обеспечения максимальной отдачи от каждого вложенного рубля государственных средств, разработка методологии эффективного распределения ресурсов в транспортных системах приобретает первостепенное значение для экономики Российской Федерации. Такая методология должна обеспечивать возможность объективной оценки альтернативных вариантов распределения ресурсов, учитывать множественность критериев эффективности, позволять работать в условиях неопределённости исходных данных и изменчивости внешних условий, а также обеспечивать согласованность решений на различных уровнях управления транспортной системой.

Таким образом, значимость разработки методологии эффективного распределения ресурсов в транспортных системах определяется масштабом инвестиций в транспортную отрасль, критическим состоянием транспортных систем большинства российских городов, сложностью и многокритериальностью задач планирования и управления транспортом, а также необходимостью обеспечения максимальной эффективности использования государственных средств в условиях их ограниченности.

## **1.2 Основные положения системных исследований в области эффективности распределения ресурсов в сложных организационных системах**

Проблема эффективного распределения ресурсов в сложных организационных системах является одной из фундаментальных задач современной науки управления и системного анализа. Транспортные комплексы, представляющие собой многоуровневые иерархические структуры с множеством взаимосвязанных элементов, относятся к классу больших сложных систем, для которых характерна высокая степень неопределённости, многокритериальность целей функционирования и наличие множественных ограничений различной природы. Понимание системных закономерностей функционирования таких

объектов и разработка адекватного методологического аппарата для принятия решений о распределении ресурсов требует глубокого осмысления теоретических основ системного подхода и его практического применения к транспортным системам.

Основоположниками в разработке прикладных математических методов управления в сложных системах в СССР были советские ученые академики А.Н. Колмогоров и П.К. Анохин. Ими была разработана теория функциональных систем, базирующаяся на общих разделах математических функций и положенная в основу методологии стратегического развития социально-экономических систем в СССР в 30-е годы XX-го века [13; 14].

Развитием методов стратегического планирования в СССР в последующие годы занимались математики-экономисты Л.В. Канторович (лауреат Нобелевской премии) и С.С. Шаталин. На основе их исследований в области методов программно-целевого стратегического планирования для комплексного решения межотраслевых задач планирования была разработана концепция координационного взаимодействия при организации межотраслевого управления в условиях плановой системы народного хозяйства [15; 16; 17; 18; 19]. В 70-80-х гг. прошлого века методы стратегического планирования совершенствовались отечественными учеными В.М. Архиповым, В.В. Леонтьевым, Ю.В. Яременко, А.И. Анчишкиным и др., которые исследовали и разрабатывали модели сбалансированного межотраслевого развития на основе общей теории систем [20; 21; 22].

Концептуальной основой системных исследований в области распределения ресурсов служит общая теория систем, сформулированная в середине двадцатого века и получившая дальнейшее развитие в работах отечественных и зарубежных учёных. Центральным звеном этой теории является понятие системы как совокупности взаимосвязанных элементов, объединённых общей целью функционирования и обладающих свойствами, не сводимыми к простой сумме свойств составляющих элементов. Это свойство эмерджентности, присущее сложным системам, имеет принципиальное значение для понимания процессов

распределения ресурсов в транспортных комплексах, поскольку оптимизация функционирования отдельных элементов системы не гарантирует достижения оптимального состояния системы в целом [23].

Транспортный комплекс как объект исследования представляет собой типичную организационно-техническую систему, характеризующуюся наличием технической подсистемы, включающей подвижной состав, инфраструктурные объекты, системы управления движением, и организационной подсистемы, определяющей структуру управления, регламенты взаимодействия элементов, механизмы принятия решений и распределения ресурсов. Взаимодействие этих подсистем определяет интегральную эффективность функционирования транспортного комплекса и создаёт специфические условия для постановки и решения задач оптимального распределения ресурсов.

Одной из ключевых характеристик сложных организационных систем является их иерархическая структура, отражающая многоуровневость принятия решений и распределения функций управления между различными уровнями иерархии. В случае транспортных систем можно выделить несколько уровней управления: стратегический уровень, определяющий долгосрочные направления развития и структуру капитальных вложений; тактический уровень, обеспечивающий планирование маршрутной сети, графиков движения и распределение подвижного состава по маршрутам; оперативный уровень, отвечающий за текущее регулирование транспортного процесса и реагирование на возмущающие воздействия. Эффективность функционирования такой иерархической системы существенным образом зависит от согласованности решений, принимаемых на различных уровнях управления, что требует применения специальных методов координации и интеграции [11].

Важнейшим понятием системного подхода при исследовании сложных объектов является понятие цели функционирования системы. В отличие от простых технических систем, для которых цель обычно может быть формализована в виде единственного скалярного критерия эффективности, сложные организационные системы характеризуются множественностью целей, часто

противоречащих друг другу. Применительно к транспортным системам можно выделить группу экономических целей, связанных с минимизацией затрат на функционирование системы и максимизацией экономической эффективности инвестиций; группу социальных целей, определяющих требования к доступности, комфортности и безопасности транспортного обслуживания населения; группу экологических целей, направленных на снижение негативного воздействия транспорта на окружающую среду; группу технологических целей, обеспечивающих требуемый уровень технического состояния и надёжности функционирования транспортной системы [24].

Характерной особенностью современного этапа развития теории эффективностей является:

1. Переход от понятия «эффективность», как синонима экономической результативности производства к понятию «эффективность», как синоним результативности управления (эффективность управления в количественных оценках). В этом случае под эффективностью следует понимать соотношение между результатом деятельности и некой характеристикой в количественных оценках (ресурсом), необходимой для достижения требуемого результата [25].

2. Понятие эффективность уже не ассоциируется только с набором финансовых показателей, но является совокупным результатом, требующим как учета финансовых, так и не финансовых показателей. Данная концепция была разработана Р.С. Капланом и Д.П. Нортон, получив наименование «balanced scorecard» и была признана в качестве признанного мирового стандарта [26; 27]. Согласно «balanced scorecard» система оценки деятельности предприятия состоит из 25 показателей различной природы и предполагает обратную связь в виде контроля достижения требуемых результатов, при этом требуемые результаты определяются не на показателях прошлых лет, а на индикаторах опережающего развития. То есть фактически выбор стратегии осуществляется как решение многокритериальной задачи в целях проактивного управления.

Решение задачи получения эффективных решений в условиях многокритериальности требует отдельного обзора научных работ.

Многокритериальные модели рассматривались еще в XIX веке Ф. Эджуортом и В. Парето. Они определяли эффективным состоянием, такое состояние (распределение товаров между потребителями), которое не может быть улучшено путём перераспределения товаров ни для одного участника без «ущемления интересов» некоторых других участников. Следовательно, оптимальность по Парето отражает идею ресурсного равновесия: если состояние не является эффективным, то необходимо перераспределять ресурсы, чтобы перейти к нему. Методы получения Парето-оптимальных решений активно исследовались и разрабатывались отечественными и зарубежными учёными Подиновским В.В., Ногиным В.Д., Бусленко Н.П., Черноруцким И.Г., Эрроу К. Дж. и др. [28; 20; 30; 31; 32; 33].

Множественность целей функционирования транспортной системы порождает необходимость применения методов многокритериальной оптимизации при решении задач распределения ресурсов. Классические методы оптимизации, основанные на максимизации или минимизации единственного критерия эффективности, оказываются неприменимыми в случае наличия нескольких критериев, поскольку улучшение системы по одному критерию, как правило, приводит к ухудшению по другим критериям. Это обстоятельство требует введения понятия Парето-оптимального решения, представляющего собой такое решение, улучшение которого по одному из критериев невозможно без ухудшения хотя бы по одному из остальных критериев. Множество Парето-оптимальных решений образует так называемую границу Парето, из которой необходимо выбрать единственное решение с учётом предпочтений лиц, принимающих решения, или дополнительных соображений.

Концепция сбалансированного развития транспортного комплекса, иллюстрируемая на рисунке 1.9, отражает системный подход к формированию стратегии развития транспортной инфраструктуры с учётом множественности целей и интересов различных заинтересованных сторон.

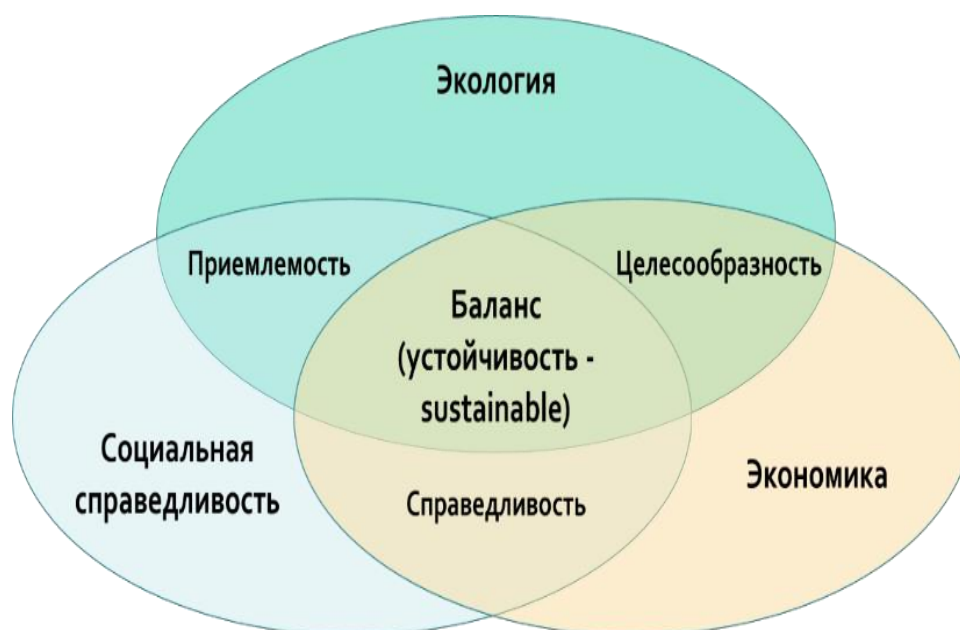


Рисунок 1.9 – Концепция сбалансированного развития транспортного комплекса РФ. Источник: [24]

Эта концепция предполагает достижение баланса между экономической эффективностью инвестиций, социальной значимостью транспортных проектов, экологической устойчивостью развития и технологической модернизацией транспортного комплекса. Реализация такого подхода требует разработки интегральных показателей эффективности, агрегирующих частные критерии различной природы в единую оценку, пригодную для сравнения альтернативных вариантов распределения ресурсов [24].

Проблема распределения ресурсов в транспортных системах осложняется необходимостью учета специфики различных видов транспорта, обладающих различными технико-экономическими характеристиками и эффективных в различных условиях эксплуатации. Как показано на рисунке 1.10, эффективные зоны использования различных видов городского пассажирского транспорта определяются совокупностью факторов, включающих величину пассажиропотока, дальность перевозок, плотность транспортной сети, характер расселения населения и структуру городской застройки. Метрополитен демонстрирует наибольшую эффективность при обслуживании крупных стабильных пассажиропотоков на магистральных направлениях в крупнейших городах. Трамвай эффективен для

средних по величине пассажиропотоков на маршрутах средней протяженности с относительно равномерным распределением пассажиропотока по длине маршрута. Троллейбус и электробус находят применение на маршрутах с меньшей интенсивностью движения, требующих гибкости маршрутной сети. Автобус обладает максимальной универсальностью и может использоваться в широком диапазоне условий эксплуатации [24].

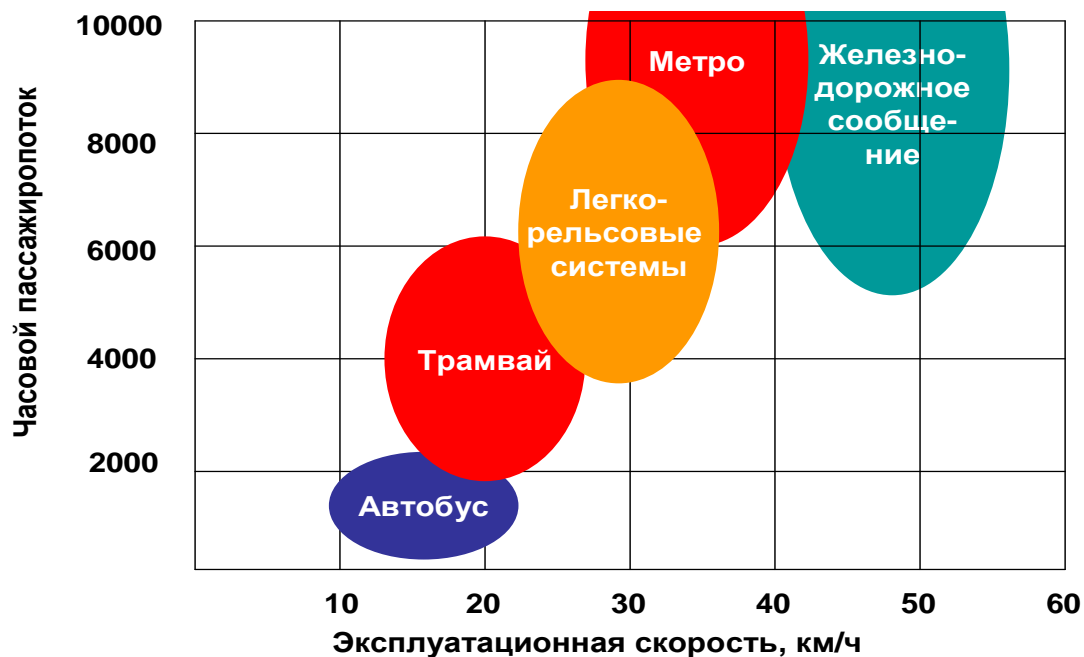


Рисунок 1.10 – Эффективные зоны использования видов городского пассажирского транспорта. Источник: [24]

Таким образом, задача эффективного распределения ресурсов в транспортном комплексе предполагает более сложный алгоритм действий в силу своей комплексной природы. В данном случае не стоит задача выбора какого-либо одного вида транспорта как единственно правильного решения, а требуется определение оптимальной структуры транспортной системы, включающей различные виды транспорта в соответствующих пропорциях, обеспечивающей синергетический эффект от их совместного функционирования. Это требует применения методов системного синтеза, позволяющих формировать рациональную структуру сложной системы с учётом взаимного дополнения и

компенсации недостатков отдельных элементов системы за счёт преимуществ других элементов.

Важнейшим аспектом системного подхода к анализу эффективности распределения ресурсов является разграничение понятий эффективности отдельных операций и эффективности функционирования системы в целом. Эффективность отдельной операции характеризует степень достижения локальной цели этой операции при заданных ресурсных ограничениях и может быть оценена на основе частных критериев эффективности, специфичных для данной операции. Вклад операции в достижение глобальной цели функционирования системы с учётом взаимодействия с другими операциями и элементами системы характеризует эффективность всей системы.

Классическим примером расхождения эффективности в транспортных системах является ситуация, когда оптимизация работы отдельных маршрутов или видов транспорта без учёта их влияния на общую структуру приводит к снижению эффективности всей транспортной системы. Например, сокращение интервалов движения на одном маршруте может привести к перераспределению пассажиропотоков и снижению загрузки других маршрутов. Аналогично, закрытие убыточного маршрута может привести к перегрузке альтернативных маршрутов, увеличению времени поездки пассажиров и общему снижению качества транспортного обслуживания и эффективности его функционирования.

Таким образом, для распределения ресурсов в сложных пассажирских транспортных системах необходимо применять методы системного анализа.

Важную роль в исследованиях эффективности распределения ресурсов играет проблема неопределённости, которая присуща сложным организационным системам. Неопределённость может проявляться в различных формах. Стохастическая неопределённость связана со случайным характером многих процессов в транспортных системах, например колебания пассажиропотоков или спроса на транспортные услуги, и может быть описана с помощью теории вероятностей и математической статистики при наличии достаточного объёма данных о поведении соответствующих случайных величин.

Однако в практике управления транспортными системами часто приходится сталкиваться с неопределённостью нестохастической природы, когда отсутствуют объективные основания для использования вероятностных методов описания неопределённости. Такая неопределённость может быть обусловлена недостаточностью информации о параметрах системы, изменчивостью внешних условий функционирования, субъективностью оценок и предпочтений лиц, принимающих решения, принципиальной невозможностью точного прогнозирования будущих состояний системы на длительную перспективу. Для работы с такого рода неопределённостью в системных исследованиях применяются специальные методы, основанные на теории нечетких множеств, интервальном анализе, методах экспертных оценок, робастной оптимизации и других подходах.

Классификация факторного пространства с указанием методов снятия неопределённости в системах, содержащих задачу распределения ресурсов, представлена на Рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – Классификация факторного пространства с указанием методов снятия неопределённости в системах транспортного комплекса.

Источник: [разработано автором]

Эта классификация выделяет несколько типов неопределённости в зависимости от природы факторов и возможностей получения информации о них. Детерминированные факторы характеризуются полной определенностью и могут быть точно измерены или рассчитаны. Стохастические факторы описываются известными законами распределения вероятностей и могут быть исследованы статистическими методами. Факторы с интервальной неопределённостью характеризуются известными границами возможных значений, но неизвестным распределением внутри этих границ. Факторы с нечеткой неопределённостью описываются функциями принадлежности, отражающими степень возможности или правдоподобия различных значений фактора [34].

Формируемая функция принадлежности задает некоторое подмножество общей допустимой области изменения фактора и в некотором смысле отражает степень неопределённости фактора. Чем меньше данное подмножество, тем более определенным является фактор, и наоборот. В предельных случаях функция принадлежности может вырождаться либо в единственную точку, что соответствует полной определенности фактора, либо в характеристическую функцию всей допустимой области, что соответствует ситуации полной неопределённости, когда любое значение фактора из допустимой области является одинаково возможным. Применение аппарата нечетких множеств позволяет формализовать экспертные знания о параметрах системы, учесть субъективные предпочтения лиц, принимающих решения, и обеспечить работу с качественными характеристиками, не поддающимися точному количественному измерению [35; 36; 37].

Перечисленные подходы снятия неопределённости нестохастической природы в системах управления транспортными комплексами, содержащих задачу распределения ресурсов, как правило, затруднены в силу специфических условий, характерных для транспортной отрасли Российской Федерации. К числу таких условий относится поведенческая неопределённость, обусловленная отсутствием единой централизованной системы управления транспортными комплексами, поскольку контроль за состоянием системы возложен на муниципальные органы

различного уровня, обладающие различной степенью компетентности, различными приоритетами и различными возможностями финансирования транспортных систем. Это приводит к высокой вариабельности подходов к организации транспортного обслуживания населения в различных городах и регионах, затрудняет обобщение накопленного опыта и разработку единых методологических подходов к распределению ресурсов.

Природная неопределённость связана с недостаточной изученностью явлений и событий, сопровождающих процесс функционирования системы, что обусловлено отсутствием объективных данных по всей номенклатуре показателей, необходимых для принятия обоснованных решений о распределении ресурсов. Во многих городах отсутствуют системы автоматизированного учета пассажиропотоков, не проводятся регулярные обследования транспортных потоков, не ведется мониторинг технического состояния подвижного состава и инфраструктурных объектов, что создаёт информационный дефицит для принятия управленческих решений. Отсутствие достоверной информации о текущем состоянии транспортной системы и закономерностях её функционирования существенно затрудняет прогнозирование будущих состояний системы и оценку последствий принимаемых решений.

Нечеткое представление о целеполагании в системе обусловлено тем, что на различных этапах её развития нередко декларировались противоположные представления о приоритетах развития транспортного комплекса. В разные периоды акцент делался то на развитии метрополитена как наиболее прогрессивного вида транспорта, то на приоритет автобусного сообщения как наиболее гибкого и экономичного, то на возрождение трамвайного движения как экологически чистого вида транспорта, то на внедрение новых видов транспорта, таких как электробусы. Отсутствие последовательной долгосрочной стратегии развития транспортных систем и частая смена приоритетов приводят к неэффективному использованию инвестиционных ресурсов, распылению средств между различными направлениями развития без достижения качественного изменения ситуации ни по одному из направлений.

Таким образом, можно констатировать, что исследуемый процесс управления ресурсами при синтезе оптимальных программ по развитию транспортного комплекса сопровождается информационной ситуацией с наибольшей степенью неопределённости, характеризуемой недостаточностью объективных данных, нечеткостью целей, изменчивостью внешних условий и субъективностью оценок. Это обстоятельство предъявляет особые требования к методологии принятия решений о распределении ресурсов, которая должна быть устойчивой к неопределённости исходных данных, допускать работу с качественными оценками и экспертными суждениями, обеспечивать гибкость при изменении целей и приоритетов, а также допускать поэтапное уточнение решений по мере получения дополнительной информации о системе.

Системный подход к исследованию эффективности распределения ресурсов предполагает рассмотрение транспортной системы как элемента более широкой социально-экономической системы региона или города. Транспорт выполняет важнейшую обслуживающую функцию, обеспечивая связность территории, доступность рабочих мест, объектов образования, здравоохранения, культуры и других социально значимых объектов для населения. Качество транспортного обслуживания существенным образом влияет на качество жизни населения, инвестиционную привлекательность территории, эффективность функционирования экономики региона. Следовательно, оценка эффективности распределения ресурсов в транспортной системе не может ограничиваться учётом только прямых эффектов, связанных с транспортной деятельностью, но должна включать оценку косвенных социально-экономических эффектов, возникающих в результате изменения характеристик транспортного обслуживания.

К числу таких косвенных эффектов относятся изменение стоимости земли и недвижимости в зонах влияния транспортной инфраструктуры, изменение структуры занятости населения и размещения предприятий, влияние на развитие туризма и рекреационной деятельности, воздействие на экологическую ситуацию и здоровье населения, влияние на социальную интеграцию и территориальную справедливость. Учёт этих факторов требует применения методов комплексной

социально-экономической оценки транспортных проектов, выходящих за рамки традиционного анализа эффективности инвестиций и включающих элементы социального, экологического и пространственного анализа [12].

Особое значение в системных исследованиях эффективности распределения ресурсов имеет проблема временной динамики развития транспортных систем. Решения о распределении ресурсов, принимаемые в текущий момент времени, определяют траекторию развития системы на длительную перспективу и оказывают влияние на её характеристики в течение многих лет. Это обусловлено длительным жизненным циклом инфраструктурных объектов транспортной системы, высокой капиталоемкостью инвестиционных проектов, инерционностью процессов структурной перестройки системы. В этих условиях возникает необходимость применения методов динамической оптимизации, позволяющих учитывать эволюцию системы во времени и обеспечивать согласованность краткосрочных и долгосрочных решений.

Динамический подход к оптимизации распределения ресурсов предполагает формирование последовательности взаимосвязанных решений, принимаемых в различные моменты времени с учётом текущего состояния системы, прогноза внешних условий и поставленных долгосрочных целей. При этом необходимо учитывать возможность корректировки принятых решений при получении новой информации [11].

Системный анализ эффективности распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах требует также учета взаимосвязи различных элементов: эксплуатационная деятельность, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава, развитие инфраструктуры, обновление подвижного состава, подготовка кадров, внедрение новых технологий. Эти факторы не являются независимыми и оказывают существенное влияние на функционирование всей транспортной системы. Решение о приобретении нового подвижного состава повлияет на требования к инфраструктуре, системы технического обслуживания, обучение персонала и т.д.

Планирование в пассажирских транспортных системах предполагает одновременное рассмотрение всех взаимосвязанных элементов и обеспечение их согласованности при формировании программы распределения ресурсов. Это требует применения методов комплексного системного моделирования, которые позволяют отобразить основные взаимосвязи между различными подсистемами транспортного комплекса и оценить эффективность функционирования.

Системный подход предполагает последовательное повышение детализации и точности принимаемых решений по мере накопления информации о системе и уточнения целей её функционирования. На начальных этапах проектирования программы развития транспортной системы принимаются концептуальные решения о приоритетных направлениях развития, структуре капитальных вложений, основных проектах и мероприятиях на основе агрегированных оценок и экспертных суждений. По мере проработки программы осуществляется детализация принятых решений, уточнение параметров проектов, проведение более детальных технико-экономических расчётов, что позволяет корректировать первоначальные решения с учётом полученной дополнительной информации.

Итеративный характер процесса принятия решений о распределении ресурсов отражает объективную необходимость последовательного снятия неопределённости по мере продвижения от концептуальной стадии планирования к стадии детального проектирования и реализации программы развития. Этот подход согласуется с современными методологиями управления проектами, предполагающими гибкое реагирование на изменение условий реализации проекта и поэтапное уточнение проектных решений на основе получаемой обратной связи о ходе реализации проекта и достигаемых результатах [4].

Таким образом, основные положения системных исследований в области эффективности распределения ресурсов в сложных организационных системах формируют методологическую базу для разработки конкретных методов и алгоритмов решения задач оптимального распределения ресурсов в транспортных комплексах. Эти положения подчеркивают необходимость комплексного многокритериального подхода к оценке эффективности, учета системных

эффектов и взаимосвязей между элементами системы, работы в условиях неопределённости различной природы, обеспечения согласованности решений на различных уровнях управления и временных горизонтах планирования, итеративного уточнения решений и адаптации к изменяющимся условиям функционирования системы.

### **1.3 Анализ научных трудов и публикаций, исследующих методы теории принятия решений в условиях неопределенности**

Проблема принятия решений в условиях неопределённости является одной из центральных в современной науке управления сложными системами. Необходимость осуществлять выбор управленческих воздействий при неполной информации о состоянии системы, параметрах её функционирования и влиянии внешней среды характерна для большинства задач управления транспортными комплексами. Эта проблема многократно усиливается в условиях динамично изменяющейся внешней среды, множественности критериев оценки эффективности и наличия конфликтующих интересов различных заинтересованных сторон.

Фундаментальный вклад в развитие теории принятия решений в условиях неопределённости внесли работы таких выдающихся учёных как Белман Р., Вильсон А., Заде Л.А., Мартин Н., Мушик Э., Мюллер П., Ногин В.Д., Подиновский В.В., Саати Т., Таха, Хедми А., Штоейер Р. [38; 39; 40; 41; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 48]. Разработанные этими учёными концептуальные подходы и математические методы создали теоретическую базу для решения широкого класса задач управления в условиях недостаточности информации. Однако анализ современных прикладных исследований показывает, что существует значительный разрыв между теоретическими достижениями и их практическим применением в задачах управления транспортными системами.

Центральным вопросом в задачах принятия решений при неопределённости является выбор адекватного способа представления и обработки неполной или

нечеткой информации. В современной научной литературе можно выделить несколько основных подходов к решению этой проблемы. Первый подход основан на применении методов экспертного оценивания, когда недостающая информация восполняется суждениями квалифицированных специалистов. Второй подход использует вероятностные методы, предполагая возможность описания неопределённости через законы распределения случайных величин. Третий подход базируется на теории нечётких множеств и в определенном смысле сводится к теории случайных множеств. Четвёртый подход - методы робастной оптимизации, которые обеспечивают устойчивость решений к вариациям параметров системы в заданном диапазоне.

На практике широкое распространение получили методы экспертного оценивания, благодаря их универсальности и относительной простоте применения. Данные методы позволяют работать с плохо формализуемыми факторами, учитывать опыт специалистов, агрегировать мнения различных экспертов для получения обобщенной оценки. Вместе с тем, применение экспертных методов сопряжено с рядом серьезных ограничений и проблем, которые часто недооцениваются. К числу этих проблем относятся субъективность экспертных суждений, зависимость результатов от компетентности и личных предпочтений экспертов, сложность обеспечения согласованности оценок при работе с группой экспертов, отсутствие объективных критериев проверки достоверности экспертных оценок.

Анализ современных исследований в области управления сложными организационными системами, как справедливо отмечается в работе [49], показывает необходимость учитывать и оценивать большое количество разнообразных по своей природе факторов при принятии решений в условиях неопределённости и недостаточности информации [50; 51]. При этом в научной литературе наблюдается характерная тенденция, заключающаяся в том, что качественные экспертные оценки, изначально призванные лишь уточнить относительную важность или степень влияния различных факторов, преобразуются в количественные коэффициенты, которые затем используются в

математических моделях как объективные параметры системы. Такая подмена приводит к созданию иллюзии формализованности и объективности процесса принятия решений, в то время как фактически субъективность экспертных суждений лишь маскируется математическим аппаратом, но не устраняется.

Характерным примером такого подхода является исследование [52], в котором при формализации задачи управления процессом оказания услуг вводится вектор состояния системы, включающий такие трудно формализуемые параметры как эмоции клиента, требования клиентов и уровень удовлетворенности. Для количественной оценки этих параметров предлагается использовать экспертные оценки, которые затем обрабатываются с помощью математических процедур для получения интегрального показателя эффективности. При этом весовые коэффициенты, определяющие вклад каждого параметра в интегральную оценку, также устанавливаются экспертным путем. В результате формируется математическая модель, которая внешне выглядит строго формализованной, однако её ключевые параметры имеют субъективную природу и не могут быть проверены объективными методами.

Аналогичная ситуация наблюдается в исследовании [53], посвященном разработке методов повышения эффективности распределения ресурсов при возникновении чрезвычайных ситуаций. Несмотря на декларируемую цель создания формализованных алгоритмов поддержки принятия решений, для определения важности факторов и их ранжирования автор обращается к методам экспертного оценивания со ссылками на работы [54; 55]. При этом в том же исследовании упоминается возможность применения математических методов теории принятия решений, основанных на использовании субъективных критериев Вальда, Гурвица, Сэвиджа, Гермейера, Лапласа-Байеса и Ходжи-Лемана [56; 57]. С помощью критериев можно формализовать процесс выбора решения при различных вариантах неопределённости, избегая прямого обращения к экспертным оценкам весовых коэффициентов, но в зависимости от выбранного критерия, их применение приводит к получению различных численных значений эффективности для одной и той же ситуации.

В зависимости от специфики задачи можно использовать различные критерии. Критерий Вальда ориентирован на максимально осторожную стратегию, которая гарантирует приемлемый результат в наихудших условиях. Благоприятное развитие событий предполагает критерий оптимизма. Компромисс между крайним пессимизмом и оптимизмом представляет собой критерий Гурвица, а критерий Сэвиджа минимизирует максимальное сожаление о принятом решении. На предположении о равной вероятности всех возможных состояний среды основан критерий Лапласа. Каждый из этих критериев отражает определенную философию принятия решений и может быть предпочтительным в различных ситуациях, однако проблема обоснованного выбора критерия для конкретной задачи остается открытой.

В работе [58], посвященной разработке оптимизационной модели управления для эффективного распределения ресурсов в многовариантной цифровизированной организационной системе, отмечается необходимость достижения баланса функциональных возможностей системы в условиях неопределённости. Автор справедливо указывает на отсутствие или недостаточное применение формализованных методов решения многокритериальных задач при организации автоматических цифровых систем управления. Для описания множества возможных альтернативных решений предлагается использовать методы группового экспертного оценивания, что согласуется с традиционным подходом определения множества допустимых вариантов и ограничений системы. Однако в дальнейшем для оценки степени соответствия результатов управленческих решений оптимальному значению используется величина энтропии, минимизация которой рассматривается как критерий эффективности. При этом влияние альтернативных переменных на целевую функцию оценивается с помощью коэффициентов значимости, определяемых экспертным путем в двоичной или ранговой форме. Таким образом, декларируемая цель достижения автоматизированного формализованного получения оптимальных решений фактически не реализуется в полной мере, поскольку ключевые параметры модели остаются зависимыми от субъективных экспертных оценок.

Исследование [59] посвящено разработке методологических основ поддержки принятия решений в целях организации эффективных социентальных систем, представляющих собой комплекс взаимодействующих культурных, социальных и политических подсистем. Автор обоснованно выделяет проблему формализации сложных процессов функционирования и взаимодействия управляемых объектов в таких системах, объясняя сложность формализации наличием слабоструктурированных связей со ссылкой на работы [60; 61; 62]. В качестве основного инструмента решения поставленных задач предлагаются интеллектуальные алгоритмы поддержки принятия решений, базирующиеся на динамической модели, описывающей взаимосвязи подсистем и особенности процессов в исследуемой системе. Упоминаются возможности применения методов нечеткой логики [63; 64; 65; 66] и методов объектно-ориентированного моделирования [67; 68; 69; 70] для упорядочивания связей в слабоформализуемых системах, однако эти методы не получают дальнейшего развития в контексте решаемой задачи. Ключевым методом формализации иерархической системы остается экспертное оценивание, применяемое для определения весовых коэффициентов при вычислении интегральных показателей. В результате численные значения коэффициентов, определяющих значимость различных компонентов системы, назначаются на основе некоторых предположений, что является признаком субъективности принимаемых решений и не позволяет говорить о создании объективной формализованной модели поддержки принятия решений.

Работа [71] посвящена управлению жизненным циклом сервисов в условиях конкуренции, то есть при значительном влиянии факторов внешней среды. В качестве альтернативы эвристически сформированному методу лучших практик предлагается использовать методы принятия решений, основанные на моделях решения двойственной задачи сетевого программирования. Базовым инструментом поиска оптимального решения рассматривается итерационная процедура последовательного исследования информационной ситуации в условиях неопределённости. Методология, основанная на итерационных процедурах снятия

неопределённости, является апробированным и широко применяемым инструментом моделирования [72; 73; 74], особенно эффективным при решении однокритериальных задач. Однако в рассматриваемом исследовании эффективность изначально определяется как многокритериальная задача с заданием весовых коэффициентов для различных показателей на всех стадиях реализации проекта, после чего многокритериальная постановка искусственно сводится к однокритериальной путем агрегирования критериев с использованием экспертно заданных весов. Известно, что такое решение может обеспечить эффективность по интегральному показателю, однако не исключает ситуаций, когда улучшение по одному частному показателю достигается в ущерб другим показателям. Кроме того, при увеличении количества исследуемых показателей значительно возрастает вычислительная сложность итерационных процедур, связанная с ростом размерности пространства возможных решений.

Исследование [75] развивает методологические основы поддержки принятия решений в сложных социотехнических системах в рамках разработанного интерсубъективного подхода. Автор справедливо отмечает, что социотехнические системы являются сложными многоуровневыми иерархическими и постоянно развивающимися структурами, требующими разработки качественно новых инструментов управления. Новая парадигма управления должна быть основана на механизмах принятия решений, учитывающих субъективные человеческие факторы, определяемые интеллектуальными и волевыми способностями участников системы. Эта часть факторного пространства практически не поддается измерению в количественных оценках и требует применения инструментов теории принятия решений в условиях неопределённости. Сложность формального описания таких систем заключается в их многоуровневости, когда решения, полученные на одном уровне иерархии, становятся исходными данными или факторами влияния для следующего уровня, на котором могут возникать новые независимые проблемные ситуации, требующие включения в систему дополнительных элементов и связей. В этих условиях автор обоснованно приходит к понятию ресурса как ключевого объекта управления. При определении

методологии исследования предполагается учитывать достижения новых концептуальных направлений, таких как концептуальная кибернетика третьего и четвертого порядков [76; 77; 78], неокибернетика [79; 80], посткибернетика [81], изучающих процессы сложного информационного взаимодействия. Все перечисленные направления базируются на традиционных алгоритмах снятия неопределённости в системе через определение степени неопределённости с использованием энтропии Шеннона и последующую целенаправленную процедуру детерминации информационной среды. В качестве практических инструментов детерминации применяются математическое средневзвешенное, экспертное оценивание и комбинации субъективных критериев Вальда, Лапласа и Сэвиджа с последующим выбором наилучшего решения. Таким образом, несмотря на обращение к новым концептуальным подходам, практическая реализация методологии опирается на известные алгоритмы снятия неопределённости, что не позволяет говорить о разработке качественно нового инструментария. Положительной чертой данного исследования является правильно выбранное направление разработки механизмов снятия неопределённости, основанное на теориях информационного взаимодействия.

В работе [82] обосновывается необходимость разработки новых подходов к построению объективных моделей организационного управления сложными системами и комплексами технических объектов. Отмечается, что одной из существенных предпосылок, открывающих новые возможности в данной области исследования, являются технологические прорывы, связанные с цифровизацией и активным созданием цифровых двойников объектов и процессов. В условиях развития концепции индустрии четвертого поколения важно реализовать новые возможности через создание прикладного специализированного программного обеспечения. Преимущества такого программного обеспечения проявляются в сокращении времени на процедуры принятия решений и оптимизации количества элементов в системе планирования производства. Стратегическое планирование определяется как процесс принятия решений по распределению ресурсов в условиях неопределённости при наличии значительного объёма

неформализованной информации. Для преодоления неопределённости предлагается использовать либо методы теории вероятностей, либо методы экспертного оценивания [83; 84; 85], причем автор отдает предпочтение второму варианту. При формировании математической модели распределения ресурсов значения коэффициентов факторного пространства формализуются через мнения экспертов. Такой подход снижает ценность исследования, направленного на автоматизацию инструментов поддержки решений. Сильной стороной данного исследования является разработка многоуровневой системы поддержки принятия решений и создание алгоритмов, позволяющих оценивать необходимый вклад и эффективность каждого элемента системы при переходе между уровнями. Для определения эффективности в многоуровневой системе предлагается использовать методы анализа иерархий [86], основанные на парных сравнениях с использованием экспертных мнений. Результаты экспертизы сводятся в матрицы значимостей факторов, на основе которых решаются задачи распределения вкладов по элементам системы на различных уровнях. Недостатком метода анализа иерархий в контексте автоматизации алгоритмов принятия решений является наличие трудно формализуемого процесса экспертного оценивания при большом количестве исследуемых критериев.

Наряду с диссертационными исследованиями был выполнен анализ ряда статей [87; 88; 89; 90], посвященных повышению эффективности инструментов принятия решений в сложных организационных системах. Авторы этих публикаций практически единодушно говорят о необходимости разработки формализованных методов поддержки принятия решений в информационных ситуациях неопределённости, объясняя это ростом структурной сложности систем, увеличением количественных и качественных показателей и уровней в системах, а также сложным характером взаимосвязей с внешней средой. Большинство авторов приходит к выводу о возможности применения методов экспертного оценивания, а некоторые применяют модели искусственного сведения неопределенного состояния к известным законам распределения случайных величин, в частности к нормальному распределению. Однако такое искусственное сведение

неопределённости к стохастической форме часто не имеет достаточных оснований и может приводить к получению необъективных результатов [91].

Особо следует отметить работы [92; 93], в которых обосновывается возможность достижения эффективных результатов при принятии решений в сложных организационных системах без обращения к методам экспертного оценивания. В этих исследованиях авторы используют модели векторной оптимизации, построенные на методах районирования. Под районированием понимается определение областей доминирования возможных эффективных решений как совокупности ограничений исходя из существующих количественных оценок в рамках установленных критериев целеполагания с последующим нахождением оптимального решения. Важной особенностью методов районирования является то, что алгоритмы их применения позволяют избежать субъективных решений на основе экспертного оценивания, то есть процесс принятия решения является полностью формализованным и воспроизводимым.

Проведенный анализ современных научных трудов и публикаций, посвященных методам теории принятия решений в условиях неопределённости, позволяет сформулировать ряд важных выводов относительно текущего состояния исследований в данной области и перспективных направлений развития. Во-первых, существует явное противоречие между декларируемой целью создания формализованных автоматизированных систем поддержки принятия решений и фактическим широким использованием субъективных экспертных оценок на критически важных этапах процесса принятия решений. Во-вторых, наблюдается тенденция к подмене качественных экспертных оценок количественными коэффициентами, которые используются в математических моделях как объективные параметры, что создаёт иллюзию формализованности при сохранении субъективной природы получаемых решений. В-третьих, существует недостаточное внимание к методам, позволяющим обеспечить полную формализацию процесса принятия решений без обращения к экспертным оценкам, таким как методы векторной оптимизации и районирования.

В условиях активного развития цифровых технологий и создания автоматизированных систем управления транспортными комплексами особую актуальность приобретает разработка полностью формализованных методов принятия решений о распределении ресурсов, не требующих экспертного оценивания параметров на критических этапах процесса. Такие методы должны обеспечивать объективность получаемых решений, их воспроизводимость при повторном применении к одним и тем же исходным данным, возможность автоматизированной реализации в составе программных систем поддержки принятия решений, прозрачность логики принятия решений для проверки и валидации результатов. Преимущества специализированного программного обеспечения, построенного на основе формализованных методов, проявляются в сокращении времени на процедуры принятия решений, исключении человеческого фактора и связанных с ним ошибок и искажений, возможности обработки больших объёмов данных и анализа множества альтернативных вариантов, обеспечении согласованности решений на различных уровнях управления и в различные моменты времени.

Применительно к задачам управления транспортными комплексами разработка формализованных методов распределения ресурсов без использования экспертного оценивания вероятностных характеристик и оценочных данных влияния факторного пространства является критически важной для повышения объективности и эффективности принимаемых решений. Транспортные системы характеризуются наличием объективно измеримых показателей функционирования, таких как объёмы перевозок, время поездок, эксплуатационные расходы, технические характеристики подвижного состава и инфраструктуры, что создаёт предпосылки для применения формализованных методов оптимизации. Вместе с тем, многокритериальность целей функционирования транспортных систем, множественность альтернативных вариантов распределения ресурсов, наличие различных видов неопределённости требуют разработки специализированных методов, адаптированных к специфике транспортной отрасли.

Поэтому в рамках настоящего исследования будет разработана методология распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах на основе теории принятия решений в условиях неопределённости, использующая специальные прикладные методы, исключающие необходимость экспертного оценивания показателей исследуемых процессов. Данный подход должен обеспечить снижение субъективизма принимаемых решений и, как следствие, повышение эффективности функционирования городского пассажирского транспорта как важнейшей составляющей транспортного комплекса Российской Федерации.

### **Выводы по первой главе**

На основе комплексного анализа тенденций развития транспортного комплекса Российской Федерации и систем городского пассажирского транспорта, выполненного в первой главе настоящего исследования, получены следующие основные результаты и выводы.

Выявлена парадоксальная обратно пропорциональная зависимость между показателями объёмного роста системы транспортного обслуживания населения и показателями отраслевого финансирования. Несмотря на то, что финансирование транспортного комплекса за последние 15 лет увеличилось в несколько раз, наблюдается снижение общего количества перевезенных пассажиров транспортом общего пользования и деградация системы городского электрического транспорта. Это свидетельствует о неэффективности управления городской пассажирской транспортной системой и указывает на отсутствие эффективных механизмов распределения ресурсов как основного инструмента достижения целей в сложных многоуровневых организационных системах.

Статистические данные по балансу профицита и дефицита фондов финансирования городского пассажирского транспорта общественного пользования показывают, что только 5 городов из 4 регионов полностью покрывают эксплуатационные расходы и инвестиционные потребности своих

транспортных систем, а это только 3,8% от общего числа рассматриваемых городов. Наиболее тревожным является тот факт, что в девяноста одном городе из пятидесяти четырех регионов, представляющих 69 процентов от общего числа, не покрываются даже базовые эксплуатационные расходы на транспортное обслуживание населения. Такая ситуация создаёт угрозу устойчивому функционированию транспортных систем и требует незамедлительных мер по повышению эффективности использования имеющихся ресурсов.

Для ликвидации выявленных противоречий и структурной перестройки систем управления на транспорте разрабатываются концепции государственной транспортной политики, реализуемые в виде национальных проектов и стратегий развития транспортного комплекса Российской Федерации до 2030 и 2035 годов. Планируемые капитальные вложения в развитие транспортной инфраструктуры исчисляются триллионами рублей, что предъявляет высочайшие требования к обоснованности решений о распределении этих средств между различными направлениями развития, видами транспорта, регионами и конкретными проектами. Решение обозначенной проблемы усложняется большим разнообразием локальных задач и их разнородностью по технологическим и организационным признакам, сложными условиями функционирования с динамически изменяющимися показателями, наличием множества внутренних и внешних системных факторов, активно влияющих на показатели эффективности.

Установлено, что с научных позиций система управления транспортным комплексом Российской Федерации является сложной многоуровневой иерархической системой управления, ключевым звеном которой является модель получения транспортно-экономического баланса. Эффективное сочетание различных видов транспорта, включающее для городского пассажирского транспорта автобусное, троллейбусное, трамвайное сообщение, метрополитен, городские железные дороги и новые виды транспорта, такие как электробусы, является обязательным условием функционирования всей системы управления транспортным комплексом. Достижение такого баланса требует применения научно обоснованных методов распределения ресурсов с учётом технико-

экономических характеристик различных видов транспорта, структуры пассажиропотоков, особенностей городской застройки и множества других факторов.

На основании систематизации исследований отечественных и зарубежных авторов в области эффективности распределения ресурсов в сложных организационных системах установлено, что построение множества эффективных решений распределения ресурсов является результатом большого количества численных процедур с последующей многокритериальной оптимизацией. Разработка системы моделирования и распределения ресурсов как инструмента поиска множества эффективных решений имеет важнейшее прикладное значение для задач поиска оптимального баланса распределения ресурсов в транспортном комплексе. Важным обстоятельством, влияющим на разработку методологии распределения ресурсов в сложных системах городского пассажирского транспорта, является то, что поиск эффективных решений сопровождается информационной ситуацией с наибольшей степенью неопределённости при неизвестных функциях принадлежности факторов.

Анализ современных научных трудов и публикаций показал, что большинство исследований, посвященных принятию решений в информационных ситуациях с высокой степенью неопределённости, опираются на модели и алгоритмы поддержки принятия решений, в которых значимое место уделяется методам экспертного оценивания. Применение экспертных методов для определения весовых коэффициентов, оценки влияния факторов, установления приоритетов критериев и других ключевых параметров моделей нарушает требование объективности к решаемой задаче и делает невозможным достижение полностью автоматизированного формализованного получения оптимальных решений. В современных условиях активного развития цифровых технологий, создания цифровых двойников объектов и процессов, внедрения концепции индустрии четвертого поколения важно реализовать новые возможности через создание прикладного специализированного программного обеспечения,

обеспечивающего объективное принятие решений без субъективного вмешательства экспертов.

Преимущества специализированного программного обеспечения, построенного на формализованных методах, проявляются в сокращении времени на процедуры принятия решений, оптимизации количества элементов в системе планирования, обеспечении согласованности решений на различных уровнях управления, возможности обработки больших объёмов данных и анализа множества альтернативных вариантов, исключении субъективных ошибок и искажений, связанных с человеческим фактором. Это особенно важно для структур, отвечающих за процессы стратегического планирования развития транспортных комплексов, где принимаются решения о распределении значительных объёмов государственных инвестиций на длительную перспективу.

Вместе с тем, выявлены работы, в которых обосновывается возможность достижения эффективных результатов при принятии решений в сложных организационных системах без обращения к методам экспертного оценивания. В частности, методы векторной оптимизации, построенные на алгоритмах районирования, позволяют формализовать процесс принятия решений и исключить субъективность, присущую экспертным методам. Эти методы определяют области доминирования возможных эффективных решений на основе количественных оценок в рамках установленных критериев целеполагания и обеспечивают нахождение оптимального решения полностью формализованным способом.

Поэтому в настоящем исследовании в целях создания эффективной методологии распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах на основе теории принятия решений в условиях неопределённости будут разрабатываться специальные прикладные методы, исключая необходимость экспертного оценивания показателей, вероятностных характеристик и оценочных данных влияния внутреннего и внешнего факторного пространства исследуемых процессов. Данный подход должен обеспечить снижение субъективизма принимаемых решений, повышение их объективности и воспроизводимости, возможность полной автоматизации процесса принятия решений и, как следствие,

повышение эффективности городского пассажирского транспорта как важнейшей составляющей транспортного комплекса Российской Федерации.

## 2. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ СНЯТИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЦЕЛЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

### 2.1 Методологическое обеспечение проектирования сложных логистических транспортных систем

Накопление научных и методологических знаний в области организации сложных систем и связанное с этим расширение пространства возможных методов построения логистических пассажирских транспортных систем определяют необходимость его упорядочения. Один из способов рационально осуществлять этот проектирования систем распределения ресурсов в логистических пассажирских транспортных системах процесс, используя эвристические приемы проектирования. Под эвристическими приемами проектирования сложных систем будем рассматривать систему правил, определяющую модель поиска решения задачи, которая исключает или существенно ограничивает перебор элементов множества возможных решений в сформированном пространстве поиска их. При этом возникает проблема системного представления эвристического принципа. В методе проектирования, реализующем эвристический принцип, выделяются две взаимосвязанные стороны. Первая из них затрагивает описание аналога, прототипа, вторая - процедуры решения задачи. Данная взаимосвязь проявляется в том, что развитие одной стороны меняет правила выбора другой. Сложность исследуемой проблемы определяет постепенность её решения и необходимость, в первую очередь, разработки концепции выполнения этого процесса.

Определим задачу проектирования моделей распределения ресурсов ( $SM$ ) в сложных логистических транспортных систем как разновидность ситуационных задач принятия решений, результатов анализа общей модели процесса проектирования, и кратко рассмотрим концепции возможных направлений реализации эвристического принципа упорядочения знаний.

В основу концепции первого направления заложим потенциальную возможность ограничить содержание понятия «объект упорядочения, поиска, распознавания и заимствования» рамками описания только входа.

Общую модель данного процесса опишем общим выражением:

$$SM \xrightarrow{R} P \quad (2.1)$$

где  $SM$  - символьная модель информационной ситуации распределения ресурсов, описывающей информационные условия проектирования логистических транспортных систем;

$P$  - символьная модель результата решения задачи проектирования логистической транспортной системы;

$R$  - оператор преобразования, укрупнено характеризующий здесь алгоритм самого процесса проектирования с использованием модели распределения ресурсов.

Условия задачи (2.1) и выхода (результатов, решений ( $P$  в (2.1)) процесса проектирования логистических транспортных систем не затрагивают при этом самого процесса проектирования ( $R$  в (2.1)), оставляя его не принимаемым во внимание «чёрным ящиком».

Такое предполагаемое сужение описываемой задачи в определённой информационной ситуации предопределяет соответствующее упрощение модели, описывающей её так:

$$SM \rightarrow P \quad (2.2)$$

вместо общей  $SM \xrightarrow{R} P$  а, следовательно, и алгоритма решения.

Накопленное и упорядоченное определённым образом множество соответствий вида:

$$\{SM\}, i = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

образующее пространство поиска решений (ППР) вновь возникающих задач, становится «прозрачным» для последующего использования.

Поэтому оба компонента соответствия целесообразно употреблять уже с определением «унифицированные», « типовые » с внесением соответствующих коррективов в символы:

$$SM \supseteq TSM \text{ и } P \supseteq TP \quad (2.4)$$

для формального их отличия от уникальных аналогов, а все ППР можно назвать в таком случае «упорядоченным», «унифицированным»:

$$ППР \supseteq УППР \quad (2.5),$$

образованным уже кортежем соответствий вида:

$$(TSM_i \supseteq TP_i), \text{ где } i = 1, \dots, n \quad (2.6)$$

Сконцентрируем внимание на принципиальной особенности концепции первого направления, предусматривающей рассмотрение каждой составляющей ( $TSM_i$  и  $TP_i$ ) задачи как единого целого.

Тогда при практической реализации предлагаемой концепции алгоритм рассмотрения каждой вновь возникающей по практической потребности задачи проектирования будет включать:

- 1) описание  $SM$  (условия поставленной задачи проектирования, модели объекта поиска);

- 2) поиск в УППР среди накопленного набора ( $TSM_i$ ), где ( $i=1, \dots, n$ ) аналога  $SM$ , т.е. обнаружение при сопоставлении выполнения условия

$$SM \equiv TSM_j, \text{ где } j = 1, \dots, m \quad (2.7)$$

- 3) в случае выполнения условия – *заимствование* для  $SM$  соответствующего найденному аналогу  $TSM_j$  его типового решения  $TP_j$  из соответствия

$$TSM_j \rightarrow TP_j \quad (2.8)$$

в качестве решения  $P$  (т.е.  $P = TP_j$ ), полностью описывающего объект проектирования (ОБПР) для поставленной задачи, т.е.

$$\text{ОБПР} \equiv P = TP_j. \quad (2.9)$$

В противном случае, при отсутствии в УППР среди помещенных в него ( $TSM_i$ ) аналога  $SM$  выполняемой задачи проектирования, возникает необходимость установления причин такого факта для выработки стратегии дальнейшего рассмотрения проблемы.

Все многообразие возможных причин факта можно свести в две основные группы.

➤ Первая включает ошибки, допущенные проектантом при описании  $SM$ , поиске её аналога в УППР. Их можно обнаружить и исправить в таком случае путем повторного проведения упомянутых выше процедур решения задачи.

➤ Вторая же группа причин обусловлена фактом *уникальности*  $SM$ . Тогда более глубокий анализ предполагает поиск ответа на закономерно возникающий в таком случае вопрос о возможности и целесообразности использования концепции первого направления для описания с целью хранения и последующего

использования в качестве уже унифицированной этой конкретной задачи проектирования.

В случае положительного ответа рассматриваемая задача после её успешного решения ( $SM \rightarrow P$ ) лица, принимающего решение (ЛПР) по им субъективно выбранному алгоритму, переводится в разряд унифицированных ( $TSM_j \rightarrow TP_j$ ), и последняя модель заносится в накапливаемый таким образом набор возможных соответствий

$$\langle TSM_j \rightarrow TP_j \rangle, \text{ где } i = 1, \dots, n \quad (2.10)$$

с должной коррекцией  $i = n+1$  мощности упомянутого набора для последующего использования (УППР открыто для расширения).

Сказанное иллюстрирует упомянутый выше эволюционный путь развития базы знаний (БЗ). В случае отрицательного ответа на поставленный вопрос дальнейшее решение проблемы реализации принципа преемственности затрагивает уже концептуальную сторону проблемы, означая необходимость соответствующего развития концепций подхода.

Но прежде, чем перейти к разработке концепций других возможных направлений реализации эвристического принципа проектирования сложных логистических пассажирских транспортных систем, целесообразно рассмотреть сущностную сторону процедур поиска аналога модели распределения ресурсов и заимствования решения в структуре самого процесса проектирования, а также оценить достоинства и недостатки первого направления, чтобы подчеркнуть осознанную мотивацию необходимости последующих исследований для развития концепции решения проблемы проектирования до уровня создания формализованной теории.

На современном этапе развития теории технического проектирования принято, что упомянутые выше процедуры поиска аналога и заимствования

решения осуществляются соответственно методами распознавания образов и дедуктивного вывода.

Действительно, в эвристическом методе проектирования, обеспечивающем реализацию принципа преемственности, успех дела определяется возможностью корректно описать исходную ситуацию, умением организовать поиск и осуществить «распознавание её аналога» среди множества имеющихся в «арсенале пространства поиска ( $TSM_j$ ), и, соответственно, состоянием, упорядоченностью этого пространства, определяющими, в свою очередь, алгоритм поиска. Если оно невелико, то аналог может быть найден простым перебором входящих в него образов.

Однако, увеличение пространства поиска (с течением времени оно, естественно, расширяется) делает такой прием неэффективным даже с применением компьютера. Так, необходимость использования накопленных знаний порождает потребность упорядочения пространства поиска.

Осуществление этого процесса включает разработку чётких правил описания аналога и структуры размещения образов в формируемом пространстве поиска. Всё сказанное в последней фразе составляет содержание процесса классификации, одного из наиболее распространенных и фундаментальных процессов развития науки. Техническая область знаний не является в этом отношении исключением, более того – является правилом.

Так как рассматриваемые здесь при классификации объекты (предметы или элементы транспортной системы и инфраструктуры, процессы перевозки пассажиров, информационные ситуации) – сложные образования, описываемые определенным количеством характеристических свойств, связь между значениями которых осуществляется с помощью логических связей (операторов) «и», «или», «не», то поэтому все упорядоченное пространство (классификатор) будет смоделировано достаточно разветвленным (по вертикали и горизонтали) деревом.

Каждая ветвь дерева решений в классической структуре дерева задач и дерева решений характеризует определенное значение характеристического свойства.

Количество учитываемых свойств (признаков классификации) предопределяет число ветвлений и число вершин по вертикали, а количество разновидностей каждого свойства – число разветвлений по горизонтали. Так что каждая вертикальная ветвь (от корня до конечной вершины) моделирует полное описание объекта классификации. Число конечных вершин характеризует число описанных объектов. Точность описания определяется четкостью понятий «признак и его разновидности» и строгой последовательностью их использования. Только в таких условиях можно говорить о формальном описании объекта и возможности формального поиска его аналога в упорядоченном пространстве поиска уже готовых решений (УППР) – классификаторе.

В рассматриваемой области в качестве ППФ или исходных логических предложений выступают сведения, истинность которых утверждает техническая наука и подтверждает практика.

Конкретизируем описанные методы принятия решения для различных информационных ситуаций по первому направлению реализации эвристических приемов проектирования. Учитывая содержание описываемой ситуации ( $SM$ ), классификация должна охватить все её составляющие части (число и конкретное содержание которых определяются конкретной разновидностью задачи, а следовательно, и объекта проектирования).

Упорядочив пространство поиска созданием классификатора информационных ситуаций, сопровождающих функционирование логистических пассажирских транспортных систем, сводим решение вновь возникающей задачи построения модели распределения ресурсов, условие которой описывается информационной ситуацией  $SM$ , к поиску в классификаторе её аналога и заимствованию на основе метода дедуктивного вывода, соответствующего найденному аналогу типового решения (ТР) в качестве решения (Р) рассматриваемой задачи, принимая во внимание ОБПР (области принимаемых решений)  $\equiv P$ .

Формально постановка и алгоритм решения выглядит так.

Пусть  $TSM_i$  – посылка  $p_i$ , а  $TP_i$  – посылка  $q_i$ , объединяющее их логическое предложение  $TSM_i \rightarrow TP_i$  истинно при истинности посылок  $p_i$  и  $q_i$ .

Последнее выражение – фрагмент классификатора УППР и характерный пример упомянутого выше ППФ, логического предложения исходной посылки, входящей в состав доказываемой теоремы.

Если в результате поиска аналога установлено, что

$$SM \equiv TSM_i, \text{ где } i = 1, \dots, n \quad (2.11)$$

т.е. посылка  $p$  – истинна, значит и посылка  $q$  – тоже истинна и  $P \equiv TP_i$ .

А так как  $OBPP \equiv P$ , то решение рассматриваемой задачи, таким образом, найдено из готовых унифицированных решений и заимствовано, упомянутый в последней фразе факт нахождения и выбора таким образом готового решения рассматриваемой проблемы при использовании первого направления характеризует главное достоинство подхода. Список их можно расширить и естественным в этих условиях сокращением сроков, упрощением процедур решения и, возможно, уменьшением других видов затрат.

Все это и предопределяет целесообразность использования, где это возможно, такого подхода на практике. Примеры из сферы технической подготовки любого из современных производств подтверждают корректность последнего тезиса. Так, при необходимости создания машины, прибора требуется осуществить поиск информации о выпускаемых уже аналогичных изделиях в стране или за рубежом, способных выполнить предписываемые функции в определенных условиях эксплуатации и допустимых затрат на решение проблемы. В случае положительного результата поиска и обоснования целесообразности проблема решается применением потребителем (структурой, организующей перевозки) самой модели распределения ресурсов либо приобретением лицензии на её применение.

На уровне проблемы проектирования логистических пассажирских транспортных систем примером может служить поиск и заимствование из числа унифицированных элементов инфраструктуры или систем организации движения отдельных видов транспорта.

Уже беглый анализ существа метода позволяет как наглядно понять достоинства, о которых уже сказано выше, так и подойти к восприятию недостатков, заложенных уже потенциально в суть рассматриваемой концепции решения проблемы.

Так как в задачах проектирования РР-систем, как подсистемы (ТП) логистических пассажирских транспортных систем, важнейшей частью информационной ситуации (ранее в моделях  $SM$ ) является информация о процессах в каждом элементе транспортной инфраструктуры, поэтому классификация последних, суть которой раскрыта выше в общем виде, является основной стержневой идеей информационных ситуаций, сопровождающих функционирование исследуемой системы. Формируемый ниже классификатор информационных образований и есть пример создания фрагмента УППР, его ядра, в недрах которого описанной выше процедурой сопоставления  $SM$  и  $TSM_i$  осуществляется поиск аналога. Так как каждому конечному классификационному образованию (названному – «типом») введено в соответствие решение задачи – типовой ТП, поэтому положительный результат упомянутого поиска аналога служит основанием для заимствования в качестве решения рассматриваемой задачи проектирования ТП соответствующего аналогу типового ТП. Этот факт не проектирования вновь ТП, а его заимствования из числа унифицированных, и есть конкретизация отмеченных достоинств реализации концепции первого направления.

Приведённый конкретный пример позволяет наглядно понять и сущность недостатков, заложенных уже в основу концепции первого направления. Действительно, возможность широкого охвата описанным методом типизации практических задач определяется, прежде всего, возможностью корректно описать

и упорядочить пространство поиска и, в частности, классификации информационных ситуаций (ИС) с учётом всех определяющих признаков.

Подчеркнём, что всякая классификация - это ограничение, а оно имеет свои рамки возможного, допустимого и целесообразности соответствующей глубины упорядочения. Так, обилие характеристик, диапазон их изменений, а главное, многочисленность возможных вариантов структур связей элементов логистической пассажирской транспортной системы обуславливает громоздкость классификатора с учётом всех определяющих признаков, но не дает гарантии полного охвата им всего потенциально возможного многообразия информационных конструкций, а, следовательно, свидетельствует об упомянутой уже потенциальной ограниченности применения рассмотренного направления, представляя его как методологическую основу для построения всего лишь соответствующего раздела базы знаний модельного информационного проектирования и возвращает к высказанной ранее мысли о необходимости развития концепции подхода.

Прогнозируя другие возможные пути развития, будем исходить из потенциальной сложности задачи (проблемы) информационного проектирования, необходимости и возможности её структурирования на составляющие компоненты (подзадачи) с использованием системного подхода. А это уже затрагивает существо самого процесса проектирования, символично представленного в модели (1) оператором  $R$ , от рассмотрения которого мы намеренно уходили, предлагая и развивая первое направление реализации эвристического принципа информационного проектирования, пытаясь проще, если это возможно, решить стоящую задачу проектирования.

Примем в качестве исходного для рассмотрения гипотетически возможный вариант структурирования проблемы (задачи проектирования) на некоторое множество взаимосвязанных задач. Ассоциативно сказанное можно представить, как «разложение, декомпозиция здания проблемы» на составляющее её «множество кирпичей», точнее, упорядоченное множество (кортеж)

информационных ситуаций, систематизированное по порядку и целесообразной последовательности рассмотрения и решения выделенных подзадач.

Получаемая в ходе декомпозиции всей задачи проектирования структура может иметь и списковый, и древовидный вид, однако на суть развиваемой концепции подхода это не влияет, затрагивая лишь процедурную сторону проблемы, особенно на первом этапе процесса её решения.

Упомянутое структурирование проблемы полагает соответствующее разбиение всего условия задачи проектирования на компоненты, моделируемое на данном уровне познания проблемы выражением:

$$\bigcap_m^1 SM \leftrightarrow \bigcup_1^m LSM_i \quad (2.12)$$

где  $SM$  – символ условия общей (всей) задачи проектирования;

$LSM_i$  – символ условия « $i$ » из « $m$ » выделенных подзадач в структуре всей задачи проектирования;

$i=1, \dots, m \in N$  – индекс частной задачи (подзадачи).

Последующий этап рассмотрения предполагает последовательное решение каждой « $i$ » из « $m$ » выделенных при структурировании частных задач. Общую модель этапа опишем набором соответствий:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overset{R_1}{LSM_1} \overset{\cong}{\rightleftharpoons} LP_1 \\ \overset{R_2}{LSM_2} \overset{\cong}{\rightleftharpoons} LP_2 \\ \dots \\ \overset{R_m}{LSM_m} \overset{\cong}{\rightleftharpoons} LP_m \end{array} \right. \quad (2.13)$$

где  $LSM_j$  и  $LP_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  – соответственно символы условий и решений частных выделенных задач проектирования;

$R_j, j = 1, \dots, m$  – операторы преобразования, здесь – символы алгоритмов решения частных задач, подзадач общей.

Методы и алгоритмы решения каждой из « $m$ » выделенных задач на данном уровне познания проблемы выбираются ЛПП субъективно, пополняя знания проблемы, подлежащие в дальнейшем анализу, упорядочению и развитию, в случае выявленной необходимости.

Содержательную основу последующего этапа проектирования составляют процедуры синтеза (композиции) всего решения (Р) задачи проектирования из найденных ранее решений (ЧР <sub>$i$</sub> ) частных задач.

Модель этапа в упрощенной для понимания форме на данном этапе развития можно представить выражением:

$$P = \bigcup_1^m LP_j \quad (2.14)$$

где Р – символ общего решения всей задачи проектирования;

$LP_j$  - символ  $j = 1, \dots, m$  решения каждой составляющей частной задачи проектирования;

– символ алгоритма процесса синтеза решения.

Завершающий этап представляет описание объекта проектирования (ОБПР) как результата найденного решения Р задачи:

$$\text{ОБПР} \equiv P \quad (2.15)$$

на соответствующем уровне методологического обеспечения с учётом пользователя.

Произведенное описание в общем виде решения задачи информационного проектирования служит основой для построения концепции подхода с учётом такой необходимости.

Приведенное выше описание обладает диалектическим единством и подразумевает взаимосвязь процессов дифференциации задачи и интеграции её решения, о чем упоминалось ранее при описании эвристического принципа проектирования. Главный вопрос в этом случае – как в такой предлагаемой постановке обеспечить на практике его реализацию. Ответ на поставленный вопрос может быть только один: решение проблемы связано с накоплением и упорядочением знаний как в части содержания, так и в части процедур выполнения каждого из выделенных выше этапов решения задачи информационного проектирования. Для осмысления сути развиваемой концепции подхода дадим методологическое упрощенное описание решения проблемы.

Упорядочение накопленных знаний открывает возможность их использования на практике последующего проектирования при обеспечении «прозрачности пространств соответствующих разделов базы знаний». С учётом такого достижения будем все компоненты её считать и именовать «типовыми информационными ситуациями» и отражать этот уровень в символах при описании моделей на всех этапах процесса информационного проектирования.

Упорядоченное пространство базы знаний можно образно представить многослойной пирамидой, каждый слой которой представляет область описания отдельного класса задач. Внутри этой области и осуществлено описание решения этого класса задач. Со временем оно может и должно, в силу потребности развития информационной базы, меняться, затрагивая при этом, как содержательную, так и процедурную стороны понятия. Но при этом диалектика развития не затрагивает существа проблемы и гипотетически возможных путей её решения, а всего лишь развивает их и конкретизирует. Поэтому ниже опишем суть возможного пути решения проблемы, структурируя её в общем виде и не конкретизируя пока ни глубину, ни существо вида этого процесса.

Упорядоченное пространство, охватывающее содержание первого этапа информационного проектирования РР-систем, как подсистемы логистической пассажирской транспортной системы, можно смоделировать набором соответствий:

$$\begin{cases} TSM_1 = \bigcup_1^m TLSM_{1i} \\ TSM_2 = \bigcup_2^m TLSM_{2i} \\ \dots \\ TSM_n = \bigcup_1^m TLSM_{ni} \end{cases} \quad (2.16)$$

где  $TSM_n$  ( $i = 1, \dots, n$ ) – символ « $i$ » класса типовых задач информационного проектирования;

$TLSM_{ji}$  ( $j = 1, \dots, m$ ) – символ « $i$ » частной типовой подзадачи в структуре « $j$ » класса задач;

– символ процесса декомпозиции задачи.

Один слой унифицированного пространства (для одного « $j$ » класса задач) второго этапа решения можно описать трансформированным из (2.3) набором соответствий:

$$\begin{cases} TLSM_{j1} \xrightarrow{TR_{j1}} \bigcup_1^m TLP_{j1} \\ TLSM_{j2} \xrightarrow{TR_{j2}} \bigcup_2^m TLP_{j1} \\ \dots \\ TLSM_{jn} \xrightarrow{TR_{jn}} \bigcup_1^m TLP_{jn} \end{cases} \quad (2.17)$$

где  $TLSM_{ji}$  – соответственно символы условий выделенных типовых частных задач, подзадач общей « $j$ » типовой задачи;

$TLP_{jn}$  – соответственно символы решений выделенных типовых частных задач, подзадач общей « $j$ » типовой задачи;

$TR_{jn}$  – операторы преобразования, здесь символы типовых алгоритмов решения типовых частных подзадач « $j$ » типовой общей задачи.

Фрагмент области унифицированного пространства последующего этапа проектирования содержит модель, описываемую выражением:

$$TR_j = \bigcup_1^m TLP_{ji} \quad (2.18)$$

где  $TR_j$  – символ общего типового решения всей « $j$ » задачи проектирования;  
 $TLP_{ji}$  – символ частного типового решения каждой из « $m$ » частных задач проектирования;

- символ алгоритма синтеза решения.

Пространство базы знаний, описывающее завершающий этап проектирования, содержит модели типовых процессов описания объекта проектирования (ОБПР).

В условиях состояния проблемы, характеризуемого наличием описанного выше унифицированного пространства информационной базы, реализация принципа преемственности при постановке каждой новой задачи проектирования, исходное условие которой описывается моделью  $SM$ , можно описать укрупнённо процессом, структурируемым на следующие этапы.

1. Поиск среди набора  $TSM_j$  аналога  $SM_j$ .

2. В случае отыскания аналога – заимствование алгоритма декомпозиции задачи на её составляющие, осуществление этого процесса разбиения и установление области поиска аналогов последующих этапов решения задачи. Так,

$$SM_{ij} = \bigcup_{j=1}^m TSM_{ij} \quad (2.19)$$

где  $TSM_{ij}$  – символ каждой из « $m$ » выделенных подзадач рассматриваемой задачи проектирования.

3. Циклический процесс поиска в соответствующей области пространства для каждой из выделенных подзадач  $TSM_{ij}$  аналога из состава типовых  $TLSM_{ij}$ . В случае отыскания аналога, что описывается условием  $T TSM_{ij} \equiv TSM_{ij}$  (процедура распознавания образа аналога), осуществляется заимствование соответствующего аналогу  $TLP_k$  в качестве  $LP_{ji}$  – частного решения выделенной подзадачи.

4. Синтез (композиция) решения (P) всей задачи из найденных и заимствованных типовых решений частных задач

$$P = \bigcup_{j=1}^m TLP_{ij}. \quad (2.20)$$

5. Описание объекта проектирования как результата решения поставленной задачи с учётом  $ОБПР \equiv P$ .

Во всех случаях отрицательных результатов поиска аналогов на соответствующих, перечисленных выше, этапах проектирования решения принимаются субъективно ЛПР.

Такие факты служат мотивом для дальнейшего развития унифицированной базы знаний с целью расширения её применимости и возможностей. Полученные результаты либо сразу учитываются путем корректировки соответствующего раздела информационной базы данных (БД), либо помещаются в развивающийся во времени «архив» БД, содержание которого используется при появлении потребности совершенствования БД, соответствующей настоящему уровню развития логистической пассажирской транспортной системы. Такова диалектика её развития в условиях использования описываемой концепции реализации основополагающего принципа преемственности в проблеме информационного проектирования.

К итогам можно отнести выявление и постановку задач дальнейшего этапа исследования проблемы построения базы знаний, затрагивающих принципы преемственности и связанных с раскрытием содержания понятий.

1. Процесс унификации.
2. Объект унификации и выбор языка описания этих понятий (лингвистическая составляющая проблемы).

Другой характерный «срез» проблемы унификации охватывает класс задач, названных при описании концепции реализации признаков преемственности – ситуационными. Обобщая рассмотренные там три направления реализации,

скажем, что в роли объекта унификации в них выступают сами задачи принятия решений, потому они и получают названия «типовых» (разновидность унификаций). При этом унификации подвергаются не только сами решения, но и алгоритмы их поиска и выбора, включающие в себя процедуры описания условий (ситуаций). Другими словами, речь идет о формировании унифицированного пространства ПР (УППР), разработки и унификации алгоритмов поиска в нем аналога условиям ( $SM$ ) задачи проектирования и заимствования.

В зависимости от направления меняется процедурная составляющая алгоритмов и, соответственно, получаемый результат.

Таким образом, подчеркнём, что унификации подвергаются все составляющие процесса принятия решений.

Тогда при практической реализации предлагаемой концепции алгоритм рассмотрения каждой, вновь возникающей по практической потребности, задачи технического проектирования будет включать:

- 1) описание условия поставленной задачи проектирования, модели объекта поиска);
- 2) поиск в УППР среди накопленного набора аналога  $SM_{ij}$ , то есть обнаружение при сопоставлении выполнения условия их конгруэнтности

$$SM_{ij} \equiv TSM_{ij}, \quad (2.21)$$

- 3) в случае выполнения условия – заимствование для  $SM_{ij}$ , соответствующего найденному аналогу  $TSM_{ij}$  его типового решения, полностью описывающего объект проектирования (ОБПР) для поставленной задачи

Второе, диаметрально противоположное первому по своей структуре, направление предполагает дифференцирование всей сложной задачи на составляющие подзадачи, дальнейшее деление которых считается нецелесообразным в данной предметно-ориентированной области информационной базы данных и оговорённый при этом период времени.

Механизм упорядочения опыта решения всех выделенных составляющих подзадач идентичен упорядочению решения на соответствующих этапах структурирования задачи в первом направлении с естественным ограничением и корректировкой всех рассматриваемых при этом компонентов проблемы при организации РР-систем в сложных информационных пространствах.

Все нюансы, поиски и сомнения по формированию процедур реализации второго направления раскрыты ранее при описании принципа «преемственности», к которому желательно по необходимости обращаться,

Конкретизируем описанные методы принятия решения для первого направления реализации эвристических приемов проектирования. Учитывая содержание описываемой информационной ситуации ( $SM_{ij}$ ), классификация должна охватить все её составляющие части (число и конкретное содержание которых определяются конкретной разновидностью задачи, а, следовательно, и объекта проектирования). Упорядочив пространство поиска созданием классификатора информационных ситуаций, сводим решение вновь возникающей задачи, условие которой описывается информационной ситуацией  $SM_{ij}$ , к поиску в классификаторе её аналога и заимствованию на основе метода дедуктивного вывода соответствующего найденному аналогу типового решения в качестве решения рассматриваемой задачи, принимая ОБП  $\square$  Р.

Приведенное здесь подробное описание сущности процедур принятия решения при реализации эвристического принципа и их математической интерпретации призвано проиллюстрировать области корректного применения для построения подобных математических моделей метода математической индукции, основанного на учёте третьего свойства алгоритма (свойство его обязательной результативности). Упомянутый здесь метод призван реализовать известную в науке триаду этапов её развития: практика – наука – практика. А названное третье свойство позволяет при этом формально оценить корректность построенной модели, определить область её использования и отразить постоянную тенденцию развития мощности существующих УППР на той же методологической основе,

подтверждая тем самым спиралеобразный характер этого процесса. Резюмируя сказанное здесь, подчеркнём еще раз, что, помимо эволюционного характера влияния на развитие сложных систем, представленный подход несёт в себе описание принципов обеспечения прикладного характера исследования сложных систем и объективности при использовании.

## **2.2 Постановка задач и структура исследования систем управления ресурсами в сложных транспортных системах с учётом состояния неопределённости при оптимизации процессов**

Необходимость разработки специальных прикладных методов распределения ресурсов по объектам производственной инфраструктуры ГПТ, как сложной организационно-технической системы, в условиях неопределённого информационного состояния внешней среды определяется рядом следующих обстоятельств.

1. Многообразие целей, достигаемых с помощью развития инфраструктурных объектов ГПТОП в сочетании с ресурсными ограничениями, вызывает необходимость распределения ограниченных ресурсов между объектами инфраструктуры на основе оценок важности (значимости) целей и объёмов ресурсов, необходимых для их реализации. Под инфраструктурой ГПТОП следует понимать все элементы исследуемой системы, влияющие на эффективность функционала.

2. Необходимость соизмерения планируемых затрат на развитие отдельных инфраструктурных проектов в рамках единого комплекса целеполагания с учётом их вклада (значимости) в достижение установленных критериев целеполагания.

3. Постоянное возрастание числа альтернативных средств (различных видов транспорта) достижения целей в сочетании с неоднозначностью затрат на реализацию этих средств предполагает необходимость целиориентированного анализа и выбора оптимальных решений на множестве альтернатив.

4. Межотраслевой характер процессов создания инфраструктурных систем вызывает необходимость координации и взаимной увязки комплекса работ, обеспечивающих создание систем к установленному сроку, определяемом временными и количественными индикаторами.

5. Обеспечение принципиально нового уровня качества делает необходимость интеграции большого числа разнородных процессов производства и сбалансированности по ресурсам в межотраслевом масштабе.

6. Усиление факторов неопределённости на выбор способов и средств достижения поставленных целей требует формирования ряда альтернативных направлений развития инфраструктурных систем и их последовательного выбора по мере разрешения неопределённости.

Традиционно наиболее общий вид модели сложной организационно-технической системы представляется в виде выражения:

$$W = f(x, y, u, t) \quad (2.22)$$

где  $x$  - выходные параметры (функции), характеризующие состояние исследуемой системы распределения ресурсов (РР-системы) или её элементов;

$y$  – параметры (функции), характеризующие условия применения пассажирской транспортной системы в эксплуатации при воздействии факторов внешней среды;

$u$  – оптимизируемые (управляемые) параметры (качественные характеристики) элементов системы;

$S_t$  – время (интервал исследования системы).

Показатель целевой функции  $W$  должен задаваться в вероятностной постановке  $W(P)$  в виде системы алгебраических или дифференциальных уравнений.

$$P(\dot{x}, x, \dot{y}, u, S_t) = 0 \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} P'_1(S_t) &= f_{11}P_1(S_t) + f_{21}P_2(S_t) + \dots + f_{n1}P_n(S_t) \\ P'_2(S_t) &= f_{12}P_1(S_t) + f_{22}P_2(S_t) + \dots + f_{n2}P_n(S_t) \\ &\dots \\ P'_N(S_t) &= f_{1n}P_1(S_t) + f_{2n}P_2(S_t) + \dots + f_nP_n(S_t) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Далее при решении задачи оптимизации в исследуемой системе необходимо учитывать ограничения, которые могут накладываться на выделяемые ресурсы  $R R(x, u, S_t)$ , параметры  $(x, y)$  или оптимизируемые параметры  $u$ , в виде функциональных зависимостей:

$$R(x, u, S_t) \leq R_0 \quad (2.25)$$

или в виде неравенств:

$$u_1 \leq u \leq u_2 \quad (2.26)$$

Обычно для решения задач в сложных системах дискретными состояниями осуществляют переход от системы линейных уравнений с помощью преобразований Лапласа:

$$P(s) = \int_0^{\infty} e^{-st}(t)dt = L\{P(t)\} \quad (2.27)$$

и далее

$$sP(s) - P(0) = \int_0^{\infty} e^{-st}P'(t)dt = L\{PP'(t)\} \quad (2.28)$$

к системе алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} sP_1(s) - P_1(0) &= f_{11}P_1(s) + f_{21}P_2(s) + \dots + f_{n1}P_n(s) \\ sP_2(s) - P_2(0) &= f_{12}P_1(s) + f_{22}P_2(s) + \dots + f_{n2}P_n(s) \\ &\dots \\ sP_n(s) - P_n(0) &= f_{1n}P_1(s) + f_{2n}P_2(s) + \dots + f_nP_n(s) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Преобразовав полученную систему уравнений к виду:

$$\begin{aligned}
 P_1(0) &= (s - f_{11})P_1(s) - f_{21}P_2(s) - \dots - f_{n1}P_n(s) \\
 P_2(0) &= -f_{12}P_1(s) + (s - \alpha_{22})P_2(s) - \dots - f_{n2}P_n(s) \\
 &\quad \dots \\
 P_n(0) &= -f_{1n}P_1(s) - f_{2n}P_2(s) - \dots + (s - f_n)P_n(s)
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

Далее находят неизвестные значения  $P_1(s), P_2(s) \dots, P_n(s)$  и переходят к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned}
 f_{11}P_1(t) + f_{21}P_2(t) + \dots + f_{n1}P_n(t) &= 0 \\
 f_{12}P_1(t) + f_{22}P_2(t) + \dots + f_{n2}P_n(t) &= 0 \\
 &\quad \dots \\
 f_{1n}P_1(t) + f_{2n}P_2(t) + \dots + f_nP_n(t) &= 0 \\
 P_1 + P_2 + \dots + P_n &= 1
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

Для уменьшения размерности и порядка задачи производят декомпозицию, всей системы на более простые независимые подсистемы и строится модель иерархической структуры системы распределения ресурсов. Дальнейший порядок исследования для системы ГПТОП приведён на рисунке 2.1. При этом важно отметить, что применение описанного классического подхода для решения задач в сложных организационных транспортных системах затруднено в силу следующих обстоятельств: поведенческой неопределённости, природной неопределённости, нечёткого представления о целеполагании в системе,

Поэтому на начальном этапе необходимо определить общую схему исследования, позволяющую систематизировать процесс создания системы распределения ресурсов (РР-системы) пассажирского транспортного комплекса [94].

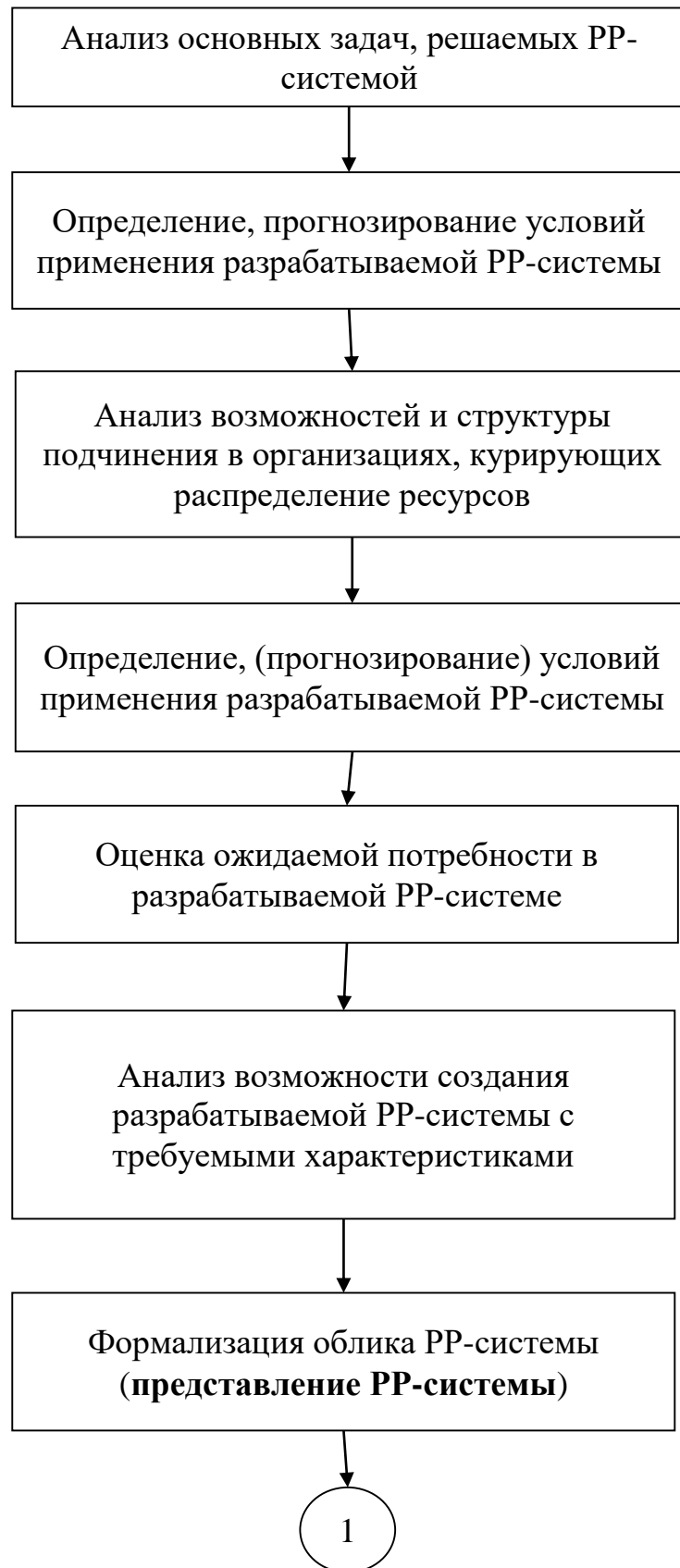


Рисунок 2.1 – Общая схема исследования РР-системы пассажирского транспортного комплекса (начало)

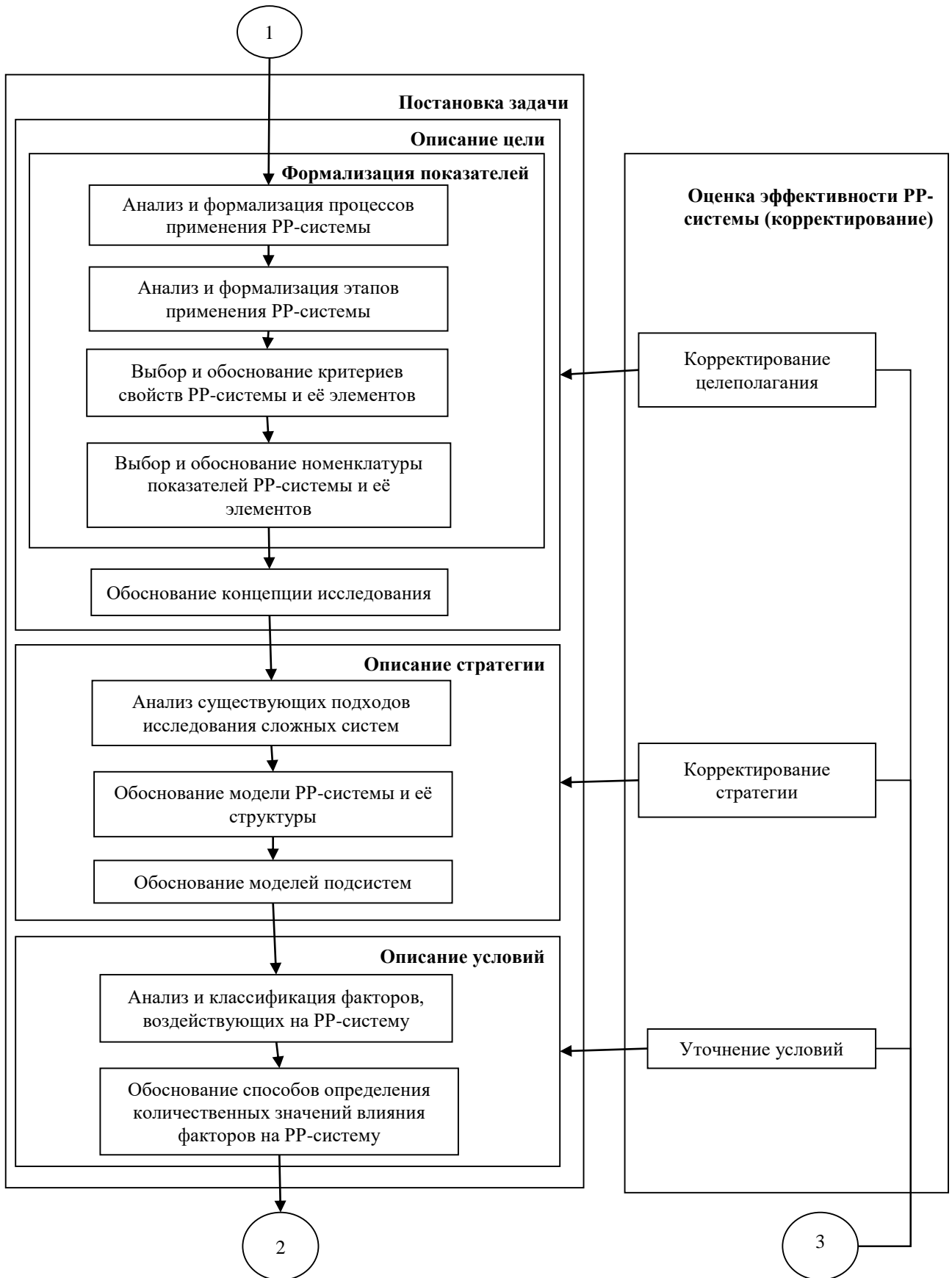


Рисунок 2.1 – Общая схема исследования РР-системы пассажирского транспортного комплекса (продолжение)

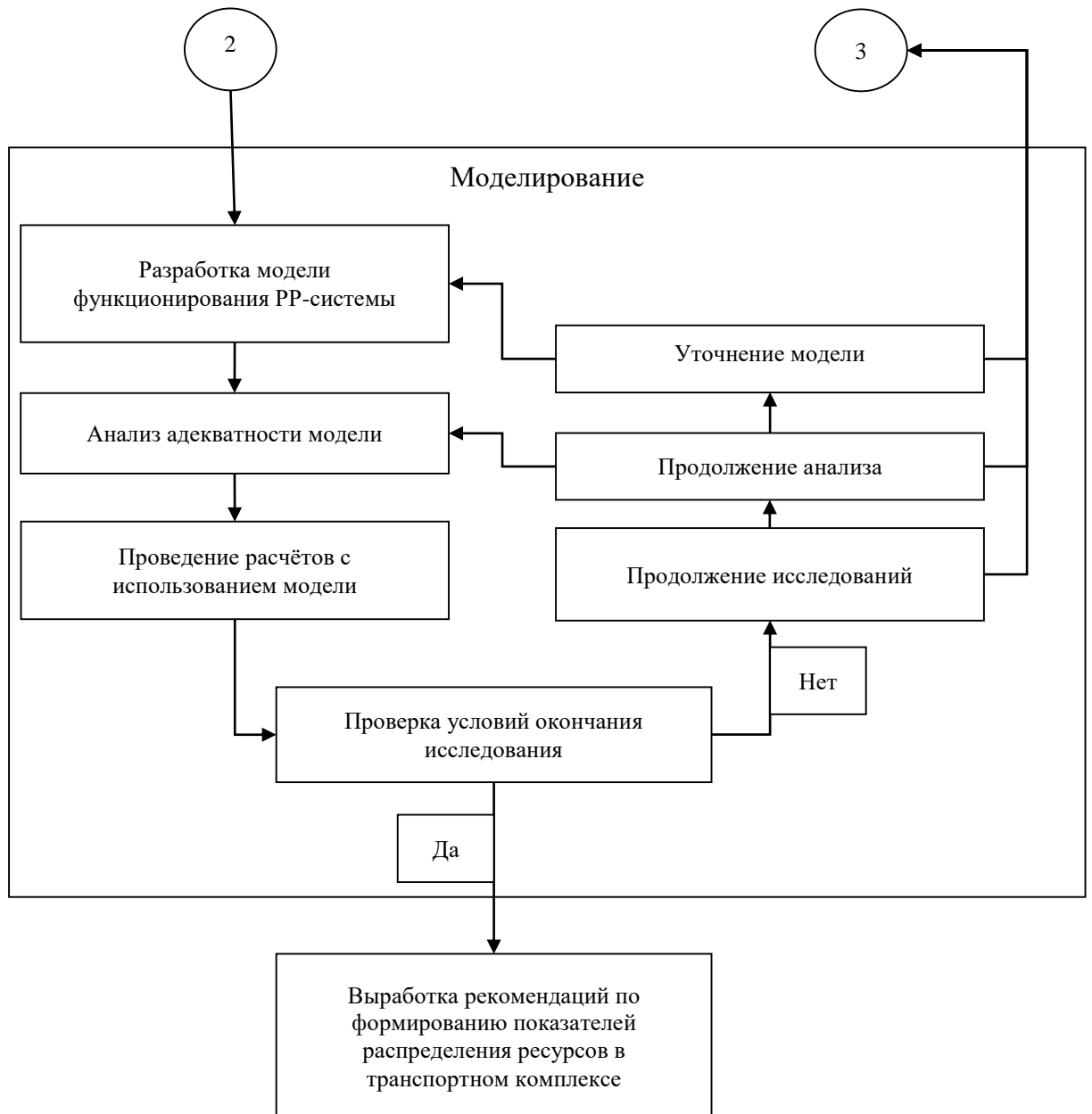


Рисунок 2.1 – Общая схема исследования РР-системы пассажирского транспортного комплекса (окончание)

В исследуемой системе присутствует активное проявление факторного пространства внешней среды, что требует применения объективных методов распределения ресурсов.

### **2.3 Исследование информационного состояния неопределенности при решении оптимизационных задач процессов управления**

Одной из ключевых проблем, возникающих при решении задач эффективного управления производственными процессами в системах распределения ресурсов городского пассажирского транспорта общественного пользования, является проблема неполноты и неточности исходной информации. Информация, которую удастся реально собрать и подготовить для принятия решений о развитии транспортных систем, как правило, оказывается в значительной степени неполной, содержит искажения и характеризуется высокой степенью неопределённости. Это обстоятельство не является случайным или временным недостатком системы сбора данных, а представляет собой объективное свойство, присущее процессу функционирования и развития сложных организационных систем.

В действительности неопределённость является не только условием, которое приходится учитывать при решении различного рода актуальных производственных задач в области городского пассажирского транспорта, но и обязательным состоянием, неизбежно присущим любому научному исследованию сложных систем. Абсолютно полная и точная информация о состоянии и параметрах функционирования транспортной системы принципиально недостижима в силу ряда объективных причин. К их числу относятся динамическая изменчивость характеристик системы во времени, стохастический характер многих процессов в транспортных системах, ограниченность возможностей измерения и контроля, высокая размерность пространства состояний системы, наличие неформализуемых факторов, влияющих на функционирование системы.

Неопределённость, с которой приходится сталкиваться при проведении исследований в области управления городским пассажирским транспортом, имеет самую разную природу и проявляется в различных аспектах функционирования системы [95; 96]. Можно выделить несколько основных источников неопределённости в транспортных системах. Параметрическая неопределённость

связана с невозможностью точного определения значений параметров системы, таких как интенсивность пассажиропотоков, скорости движения транспортных средств, времени ожидания и пересадок. Структурная неопределённость обусловлена неполным знанием структуры взаимосвязей между элементами системы и механизмов их взаимодействия. Поведенческая неопределённость связана с непредсказуемостью поведения пассажиров и участников транспортного процесса. Внешняя неопределённость определяется влиянием неконтролируемых факторов внешней среды, таких как погодные условия, изменения в социально-экономической ситуации, административные решения.

С точки зрения классической теории вероятностей предполагается, что всю информацию об объекте исследования содержит величина плотности распределения вероятностей случайных величин, характеризующих состояние системы [96]. Вероятностный подход позволяет формализовать стохастическую неопределённость и применить мощный математический аппарат теории вероятностей и математической статистики для анализа системы и принятия решений. Однако применение вероятностных методов требует наличия достаточного объёма статистических данных для оценки параметров распределений и проверки статистических гипотез о виде распределений. В реальных условиях управления транспортными системами такие данные часто отсутствуют или оказываются недостаточно надёжными, что ограничивает возможности применения классических вероятностных методов.

Наличие разнообразных ситуаций, обладающих той или иной степенью неопределённости, требует для своего адекватного описания привлечения специального математического аппарата, позволяющего формализовать различные типы неопределённости и разработать методы принятия решений в соответствующих условиях. Для создания эффективного аппарата принятия решений в условиях неопределённости необходимо прежде всего классифицировать информационные ситуации, возникающие при проведении исследований и решении практических задач управления транспортными системами. Такая классификация должна отражать степень полноты имеющейся

информации о системе и характер неопределённости, с которой приходится иметь дело.

Предлагается следующая классификация информационных состояний, которая представлена в Таблице 2.1. Первое информационное состояние характеризуется наличием установленного распределения априорных вероятностей на объектах множества состояний исследуемой системы в дискретной форме. Это состояние соответствует классической постановке задачи принятия решений в условиях риска, когда известны вероятности реализации различных состояний внешней среды или параметров системы. В этом случае может быть применен критерий ожидаемой полезности, позволяющий выбрать оптимальное решение на основе максимизации математического ожидания целевой функции.

Таблица 2.1 – Классификация информационных состояний

№	Формализация	Описание
$I_1$	$P_j = P\{\Theta = \Theta_j\}, \quad \sum_{j=1}^n P_j = 1$	Установленное распределение априорных вероятностей на объектах множества состояний исследуемой системы в дискретной форме
$I_2$	$P(x) = \{P_1(x), P_2(x) \dots, P_n(x)\},$ $0 \leq P_j(x) \leq 1$	Установленное распределением априорных вероятностей с неопределенными параметрами ( $x$ ) на объектах исследуемой системы
$I_3$	простое отношение $\Theta_1 > \Theta_2 > \dots > \Theta_n$ , при $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_n \geq 0$ .	Установленная система приоритетов на априорных вероятностях распределения объектов множества состояний исследуемой системы, предполагающее введения отношения $P = \{P_1, P_2 \dots, P_n\}$ , а также некоторых заданных величин $\alpha_j, \beta_j$
	частичное отношение порядка через задание неравенств $P_{j+1} + \dots + P_{j+\alpha_j} < P_j$ $\leq P_{j+1} + \dots + P_{j+(\alpha_j+1)}$	
	интервальное отношение через задание неравенств $\alpha_j \leq P_{j+1} \leq \beta_j = \alpha_j + \varepsilon_j$	
$I_4$	$P(\Theta) = \{P_1(\Theta), P_2(\Theta) \dots, P_n(\Theta)\},$ $0 \leq P_j(\Theta_i) \leq 1$	Неизвестное распределение вероятностей на объектах множества состояний исследуемой системы (при условии отсутствии активного противодействия среды)
$I_5$	$P(\Theta) = \{P_1(\Theta), P_2(\Theta) \dots, P_n(\Theta)\},$ $0 \leq P_j(\Theta_i) \leq 1$	Неизвестное распределение вероятностей на объектах множества состояний исследуемой системы (при условии наличия активного противодействия среды)

Для этого введём следующие обозначения:

- $\Theta = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n\}$  – исходная информация (количественные оценки), представленная в виде множества взаимоисключающих состояний среды  $S$ ;
- $I_i$  – информационная ситуация или степень деградации неопределенности выбора средой  $S$  из своих состояний из множества  $\Theta$ ;
- $P_j$  - распределение на элементах  $\Theta_i$  множества  $\Theta$

Второе информационное состояние соответствует ситуации, когда установлено распределение априорных вероятностей с неопределёнными параметрами на объектах исследуемой системы. В этом случае известен вид функции распределения вероятностей, например, известно, что некоторая случайная величина имеет нормальное распределение, однако параметры этого распределения, такие как математическое ожидание и дисперсия, известны неточно или заданы интервалами возможных значений. Это состояние требует использования методов интервального анализа или робастной оптимизации, которые обеспечивают получение решений, устойчивых к вариациям неопределённых параметров в заданных границах.

Третье информационное состояние характеризуется установленной системой приоритетов на априорных вероятностях распределения объектов множества состояний исследуемой системы.

Четвёртое информационное состояние соответствует ситуации с неизвестным распределением вероятностей на объектах множества состояний исследуемой системы при условии отсутствия активного противодействия среды. Для решения задач в этом информационном состоянии могут применяться различные критерии принятия решений, такие как критерий Лапласа или критерий Гурвица.

Пятое информационное состояние также характеризуется неизвестным распределением вероятностей на объектах множества состояний исследуемой системы, но с наличием активного противодействия среды. Это состояние соответствует игровой постановке задачи принятия решений, когда внешняя среда

рассматривается как разумный противник, стремящийся минимизировать эффективность функционирования системы. В этом случае применяются критерии, основанные на принципах теории игр, такие как критерий минимакса Вальда, гарантирующий достижение приемлемого результата в наихудших условиях, или критерий минимаксного сожаления Сэвиджа.

Для формализации различных информационных состояний введём следующую систему обозначений. Множество взаимоисключающих состояний среды обозначим через  $\Theta$ , содержащее конечное число элементов. Информационная ситуация или степень деградации неопределённости выбора средой одного из своих состояний из множества  $\Theta$  характеризуется набором вероятностей реализации этих состояний. Полное описание информационного состояния включает спецификацию того, какая информация имеется о вероятностях различных состояний среды, и какие предположения делаются относительно механизма выбора состояния средой.

Естественным результатом разработки математического аппарата принятия решений в условиях неопределённости является стремление свести более сложные информационные состояния с высокой степенью неопределённости к первому информационному состоянию, характеризуемому полностью известным распределением вероятностей. Для достижения этой цели был разработан ряд научных подходов и принципов, на основе которых может быть получено априорное распределение вероятностей состояний среды при недостаточности объективной информации [97]. К числу таких подходов относятся критерий Бернулли-Лапласа, основанный на принципе недостаточного основания и предполагающий равновероятность всех возможных состояний при отсутствии информации об их различиях; принцип потенциального распределения вероятностей, использующий дополнительные соображения для выбора наиболее правдоподобного распределения; принцип максимума неопределённости, известный как принцип Джейнса, основанный на рассмотрении энтропии Шеннона как меры неопределённости и выборе распределения с максимальной энтропией при заданных ограничениях.

Сущность экстремального подхода к учёту фактора неопределённости наиболее полно раскрывается при рассмотрении применения формализма принципа максимума энтропии. Этот принцип утверждает, что при наличии частичной информации о распределении вероятностей в виде ограничений на математические ожидания некоторых функций от случайной величины следует выбирать такое распределение вероятностей, которое имеет максимальную энтропию среди всех распределений, удовлетворяющих заданным ограничениям. Такой выбор обеспечивает минимальное внесение дополнительной информации сверх той, которая содержится в заданных ограничениях, и представляет собой наиболее осторожную или консервативную оценку распределения вероятностей.

Существенным отличием и преимуществом принципа максимума неопределённости является возможность получения оценок априорного распределения в различных информационных состояниях, для которых известны различные ограничения в виде вероятностной меры и отдельных количественных характеристик распределения. Это позволяет единообразно подходить к широкому классу задач принятия решений в условиях неопределённости и получать обоснованные оценки распределений вероятностей на основе имеющейся частичной информации. Однако прежде, чем описать применение предлагаемого подхода к задачам управления транспортными системами, необходимо подробнее остановиться на известном понятии меры неопределённости и её свойствах [98, 99].

Мера неопределённости представляет собой количественную характеристику степени неопределённости, присущей некоторому вероятностному распределению или информационной ситуации. Чем более неопределённой является ситуация, тем больше должно быть значение меры неопределённости. Напротив, полная определённость, когда одно из состояний реализуется с вероятностью единица, должна соответствовать нулевому значению меры неопределённости. Мера неопределённости должна удовлетворять ряду естественных требований, обеспечивающих её адекватность как характеристики информационной ситуации.

Чаще всего в качестве меры неопределённости случайного объекта в системе принимается функционал, известный как энтропия Шеннона [100, 101]. Для дискретной случайной величины, принимающей конечное число значений с вероятностями, энтропия Шеннона определяется как сумма произведений вероятностей на логарифмы вероятностей с обратным знаком. Коэффициент в определении энтропии зависит от выбора основания логарифма и определяет единицы измерения энтропии. При использовании натурального логарифма энтропия измеряется в натах, при использовании двоичного логарифма – в битах.

Энтропия Шеннона является естественной мерой неопределённости конечной схемы случайных событий и обладает рядом важных свойств, удовлетворяющих наиболее существенным требованиям, предъявляемым к мере неопределённости. Первое свойство утверждает, что энтропия достигает своего минимального значения, равного нулю, когда одна из вероятностей равна единице, а остальные естественно равны нулю. Это соответствует ситуации полной определённости, когда заранее известно, какое событие произойдет. Второе свойство состоит в том, что энтропия достигает своего максимального значения при равномерном распределении вероятностей, когда все события равновероятны. В данном случае ситуация максимальной неопределённости, невозможно предпочесть одно событие другому.

Третье важное свойство энтропии заключается в её аддитивности для независимых случайных объектов. В данном случае свойство отражает тот факт, что неопределённость, связанная с двумя независимыми событиями, складывается из неопределённостей каждого события. Четвёртое свойство утверждает, что знание состояния одного случайного объекта может только уменьшить неопределённость другого объекта и отражает интуитивное представление о том, что получение дополнительной информации не может увеличить неопределённость.

Для непрерывных случайных величин концепция энтропии требует модификации, поскольку непрерывные случайные объекты не допускают введения конечной абсолютной меры неопределённости аналогично дискретному случаю. В

качестве относительной количественной меры неопределённости для непрерывных распределений используется дифференциальная энтропия, определяемая как интеграл по области определения случайной величины от произведения плотности вероятности на её логарифм с обратным знаком. Дифференциальная энтропия обладает многими свойствами, аналогичными свойствам дискретной энтропии, однако может принимать как положительные, так и отрицательные значения, что связано с её относительным характером.

Помимо энтропии Шеннона в качестве меры неопределённости в различных приложениях используются другие функционалы, обладающие сходными свойствами. В частности, используется так называемая функция неопределённости второго рода, определяемая через сумму произведений вероятностей на их ранги в упорядоченной последовательности. Эта мера неопределённости обладает тем замечательным свойством, что её максимум достигается на так называемых оценках Фишберна [102, 103, 104, 105]. Оценки Фишберна представляют собой последовательность убывающих вероятностей, определяемых через обратные величины сумм последовательных натуральных чисел. Эти оценки находят применение в задачах, где имеется информация о простом соотношении порядка между вероятностями различных состояний, но отсутствуют точные численные значения вероятностей.

Существуют и другие известные меры неопределённости, удовлетворяющие общим требованиям к таким характеристикам и находящие применение в различных областях. К их числу относятся обобщённые энтропии, зависящие от параметра и переходящие в энтропию Шеннона при определённых значениях этого параметра. Выбор конкретной меры неопределённости определяется спецификой решаемой задачи и типом имеющейся информации о распределении вероятностей. В конце прошлого века профессор Аримото предложил ещё одну обобщённую меру неопределённости, которая для произвольного положительного числа, отличного от единицы, определяется через специальное выражение, включающее степенные функции вероятностей [106, 107, 108]. Эта мера обладает рядом

интересных свойств и при предельном переходе также переходит в классическую энтропию Шеннона.

Применение принципа максимума энтропии для получения априорных распределений вероятностей сводится к решению вариационной задачи максимизации выбранной меры неопределённости при заданных ограничениях. В случае выбора энтропии Шеннона в качестве меры неопределённости для непрерывных распределений задача формулируется как максимизация дифференциальной энтропии, представляющей собой интеграл от произведения плотности вероятности на её логарифм, при соблюдении условий нормировки плотности вероятности и заданных ограничений на математические ожидания некоторых функций от случайной величины.

Решение такой вариационной задачи с использованием метода множителей Лагранжа приводит к получению конкретного вида функции плотности вероятности, соответствующей максимуму энтропии при заданных ограничениях. Важным результатом теории максимальной энтропии является то, что различные классические распределения вероятностей могут быть получены как решения задачи максимизации энтропии при соответствующих ограничениях. С учётом этого подхода максимальной энтропией и, следовательно, максимальной неопределённостью или минимальным произволом при заданном ограничении на математическое ожидание случайной величины в интервале от нуля до бесконечности, обладает экспоненциальное распределение. Это означает, что если известно только среднее значение некоторой неотрицательной случайной величины, но нет никакой другой информации о её распределении, то наиболее обоснованным выбором является предположение об экспоненциальном распределении с соответствующим параметром.

Аналогично могут быть получены и другие распределения как решения задачи максимизации энтропии при различных ограничениях. Нормальное распределение соответствует максимуму энтропии при заданных ограничениях на математическое ожидание и дисперсию случайной величины, определённой на всей числовой прямой. Равномерное распределение на ограниченном интервале

получается при максимизации энтропии при отсутствии каких-либо ограничений, кроме требования, что случайная величина принимает значения в заданном интервале. Гамма-распределение возникает при максимизации энтропии с ограничениями на математическое ожидание логарифма случайной величины.

Принцип максимума энтропии обеспечивает теоретическое обоснование выбора распределений вероятностей в ситуациях неопределённости и позволяет единообразно подходить к задачам оценки распределений при различных типах частичной информации.

Применение мер неопределённости и принципа максимума энтропии в целях распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах позволяет обеспечить объективный выбор распределений вероятностей без обращения к субъективным экспертным оценкам. Это соответствует общей концепции разработки формализованных методов принятия решений, исключающих элемент субъективизма и обеспечивающих воспроизводимость и проверяемость получаемых результатов. Дальнейшее развитие этого подхода применительно к специфике транспортных систем требует разработки специализированных алгоритмов и вычислительных процедур, учитывающих особенности структуры данных и типичные ограничения, возникающие в задачах управления городским пассажирским транспортом.

#### **2.4 Исследование моделей определения весовых коэффициентов ранговых последовательностей на основе сценарного подхода в сложных системах распределения ресурсов**

Одной из центральных проблем при распределении ресурсов в пассажирских транспортных системах является определение весовых коэффициентов, характеризующих относительную значимость факторов, влияющих на эффективность функционирования системы. В условиях неопределённости, когда отсутствует полная информация о будущих состояниях внешней среды, задача определения адекватных весовых коэффициентов становится особенно

актуальной. Сценарный подход позволяет структурировать неопределённость путем выделения конечного числа возможных состояний системы и построения для каждого из них соответствующей модели поведения.

Рассмотрим систему распределения ресурсов в городском пассажирском транспорте общего пользования, функционирование которой зависит от множества факторов, образующих факторное пространство. Обозначим через  $F$  множество всех факторов, влияющих на систему, где каждый фактор может быть представлен вектором характеристик различной природы. К таким факторам относятся пассажиропотоки, техническое состояние подвижного состава, дорожно-транспортные условия, социально-экономические параметры обслуживаемой территории, климатические условия и другие параметры, определяющие спрос на транспортные услуги и возможности их предоставления.

В общем случае каждый фактор характеризуется набором качественных и количественных показателей, которые могут быть упорядочены по степени их влияния на целевой функционал системы. Такое упорядочивание формирует ранговую последовательность, где ранг определяет позицию соответствующего показателя в иерархии значимости. Однако определение самих рангов и последующее назначение весовых коэффициентов представляет собой сложную задачу, требующую учета множества взаимосвязанных аспектов функционирования транспортной системы.

Пусть имеется  $m$  факторов, каждый из которых характеризуется  $n$  показателями. Для каждого информационного состояния системы может быть сформирована своя ранговая последовательность, отражающая специфику влияния факторов в данных условиях. Информационное состояние определяется совокупностью известных на момент принятия решения данных о параметрах системы и внешней среды. В условиях неопределённости число возможных информационных состояний может быть весьма значительным, что приводит к необходимости их систематизации и классификации.

Для формализации задачи введём обозначение для информационного состояния  $P_j$ , где  $j$  принадлежит множеству индексов возможных состояний

системы. Каждому состоянию  $P_j$  соответствует определённая конфигурация факторного пространства, которая может быть представлена в виде морфологической матрицы расчётных случаев. Такая матрица содержит информацию о возможных сочетаниях уровней факторов и их характеристик, образуя таким образом пространство альтернативных сценариев развития системы [23].

Таблица 2.2 демонстрирует структуру морфологической матрицы для ранговых последовательностей, характеризующих определённый фактор. В строках данной матрицы располагаются различные показатели фактора, а в столбцах представлены возможные информационные состояния. Каждая ячейка матрицы содержит ранг соответствующего показателя для данного информационного состояния. Анализ такой матрицы позволяет выявить закономерности в изменении значимости различных показателей в зависимости от условий функционирования системы.

Таблица 2.2 – Морфологическая матрица расчётных случаев для ранговых последовательностей, характеризующих определённый фактор

$R$		$R_j$					$\mathcal{E}_i^r$
		$R_1$	...	$R_j$	...	$R_n$	
$P_{ci}$	$P_{c1}$	$r_{11}$	...	$r_{1j}$	...	$r_{1n}$	$\mathcal{E}_{c1}^r$
	...	...	...	...	...	...	...
	$P_{ci}$	$r_{i1}$	...	$r_{ij}$	...	$r_{mj}$	$\mathcal{E}_{ci}^r$
	...	...	...	...	...	...	...
	$P_{cm}$	$r_{m1}$	...	$r_{in}$	...	$r_{mn}$	$\mathcal{E}_{cm}^r$

Таким образом каждому информационному состоянию  $P_j$  будет соответствовать некий набор в виде ранговой  $\{r_{11}, r_{i1}, r_{m1}, \dots, r_{1n}, r_{mj}, r_{mn}\}$  последовательности.

Следует отметить, что ранговая последовательность, формируемая для каждого информационного состояния, отражает субъективное или объективное представление о степени влияния соответствующих факторов на целевые показатели системы. В случае субъективного подхода ранги назначаются экспертами на основе их профессионального опыта и знаний о предметной области. При объективном подходе ранжирование осуществляется на основе статистического анализа данных о функционировании системы в прошлом, однако такой подход требует наличия репрезентативной выборки наблюдений для различных состояний среды [111].

Ключевой проблемой при использовании ранговых последовательностей является переход от рангов к числовым весовым коэффициентам, которые могли бы быть использованы в количественных моделях принятия решений. Существует множество методов такого преобразования, каждый из которых основан на определённых предположениях о характере связи между рангом и весом. Наиболее распространёнными являются линейные, логарифмические и экспоненциальные схемы преобразования, а также подходы, основанные на теории нечётких множеств и методах многокритериальной оптимизации.

В контексте сценарного подхода особый интерес представляет ситуация, когда для различных информационных состояний формируются различные ранговые последовательности. Это означает, что структура весовых коэффициентов не является постоянной, а изменяется в зависимости от реализовавшегося сценария развития системы. Такая вариабельность весов отражает объективную реальность функционирования сложных транспортных систем, где относительная важность различных факторов существенно зависит от конкретных условий эксплуатации.

Рассмотрим математическую постановку задачи определения весовых коэффициентов в рамках сценарного подхода. Пусть имеется конечное множество сценариев, каждый из которых характеризуется вектором весовых коэффициентов. Обозначим через  $w_{ij}$  весовой коэффициент  $i$ -го фактора в  $j$ -м сценарии.

Необходимо определить значения весовых коэффициентов, которые обеспечат оптимальное распределение ресурсов при заданном критерии эффективности.

В таблице 2.3 представлена морфологическая матрица расчётных случаев, которые характеризуют конкретное информационное состояние. В отличие от таблицы 2.2, в данном случае представляем альтернативные варианты решений и соответствующие им значения показателей эффективности при фиксированном информационном состоянии, что позволяет проанализировать чувствительность решений к изменению структуры весовых коэффициентов и выявить наиболее устойчивые варианты распределения ресурсов.

В классической теории принятия решений предполагается, что распределение вероятностей по сценариям известно априори, что позволяет использовать критерий Байеса для выбора оптимального решения. Однако в практических задачах управления пассажирскими транспортными системами такая информация часто отсутствует или носит весьма приближенный характер [112].

Таблица 2.3 – Морфологическая матрица расчётных случаев, характеризующих конкретное информационное состояние

$R$		$P_j$					$\mathcal{E}_i^p$
		$P_1$	...	$P_j$	...	$P_n$	
$P_{ci}$	$P_{c1}$	$p_{11}$	...	$p_{1j}$	...	$p_{1n}$	$\mathcal{E}_{c1}^p$
	...	...	...	...	...	...	...
	$P_{ci}$	$p_{i1}$	...	$p_{ij}$	...	$p_{mj}$	$\mathcal{E}_{ci}^p$
	...	...	...	...	...	...	...
	$P_{cm}$	$p_{m1}$	...	$p_{in}$	...	$p_{mn}$	$\mathcal{E}_{cm}^p$

Критерий Байеса предполагает максимизацию математического ожидания целевого функционала по всем возможным состояниям среды с учётом их вероятностей. Формально это может быть записано следующим образом: среди всех допустимых стратегий распределения ресурсов выбирается та, которая обеспечивает максимальное среднее значение показателя эффективности. При этом

предполагается, что вероятности состояний среды известны и не зависят от принимаемых решений, что соответствует модели принятия решений в условиях риска [6].

В случае, когда вероятности состояний среды неизвестны, возникает задача их оценки или определения такого решения, которое было бы эффективным при различных возможных распределениях вероятностей. Один из подходов к решению этой задачи основан на принципе максимальной неопределённости, согласно которому при отсутствии дополнительной информации следует принять распределение вероятностей, максимизирующее энтропию системы. Такой подход приводит к равномерному распределению вероятностей по всем возможным состояниям, что отражает ситуацию полной информационной неопределённости.

Однако равномерное распределение вероятностей не всегда адекватно отражает реальную ситуацию, поскольку зачастую имеется некоторая априорная информация о большей или меньшей вероятности тех или иных сценариев. В таких случаях целесообразно использовать подходы, позволяющие учесть имеющуюся информацию при формировании распределения вероятностей. К числу таких подходов относятся методы, основанные на ранжировании сценариев по степени их правдоподобия и последующем назначении вероятностей в соответствии с определёнными правилами.

Одним из наиболее распространённых правил такого типа являются оценки Фишберна, которые предполагают, что вероятности сценариев убывают линейно в соответствии с их рангами. При наличии  $n$  сценариев, упорядоченных по степени убывания их правдоподобия, вероятность  $j$ -го сценария определяется как отношение разности между количеством сценариев и рангом данного сценария плюс один к сумме рангов всех сценариев. Такое распределение обеспечивает учёт имеющейся информации о предпочтительности различных сценариев при сохранении определённой степени неопределённости [7].

Таблица 2.4 иллюстрирует морфологическую матрицу выбора сценариев с учётом показателя эффективности или оценочного функционала. В таблице представлена информация о возможных стратегиях распределения ресурсов,

альтернативных сценариях развития системы и соответствующих значениях критерия эффективности.

Таблица 2.4 – Морфологическая матрица выбора сценариев с учётом показателя эффективности или оценочного функционала

$R$		$P_j$					$\mathcal{E}_i^p$
		$P_1$	...	$P_j$	...	$P_n$	
$P_{ci}$	$P_{c1}$	$p_{11}$	...	$p_{1j}$	...	$p_{1n}$	$\mathcal{E}_{c1}^p$
	...	...	...	...	...	...	...
	$P_{ci}$	$p_{i1}$	...	$p_{ij}$	...	$p_{mj}$	$\mathcal{E}_{ci}^p$
	...	...	...	...	...	...	...
	$P_{cm}$	$p_{m1}$	...	$p_{in}$	...	$p_{mn}$	$\mathcal{E}_{cm}^p$

Обозначим следующую процедуру при применении критерия Байеса. Для каждого варианта распределения ресурсов и каждого информационного состояния вычисляется значение целевого функционала, а после определяется математическое ожидание целевого функционала путем суммирования его значений по всем состояниям с весами, равными вероятностям этих состояний. Оптимальным признается вариант, обеспечивающий максимальное значение математического ожидания целевого функционала.

Важным элементом предложенного подхода является учёт возможной вариабельности структуры весовых коэффициентов при различных сценариях. Это означает, что оптимальное решение должно определяться не для фиксированного набора весов, а для всего множества возможных их комбинаций, соответствующих различным информационным состояниям. Такой подход требует решения задачи многокритериальной оптимизации, в которой каждому сценарию соответствует свой частный критерий, а общий критерий формируется как их взвешенная комбинация.

Геометрическая интерпретация задачи выбора распределения вероятностей по сценариям может быть представлена в виде симплекса в многомерном пространстве. Каждая точка внутри симплекса соответствует некоторому распределению вероятностей, удовлетворяющему условиям неотрицательности и нормировки. Вершины симплекса соответствуют вырожденным распределениям, при которых вся вероятностная масса сосредоточена в одном состоянии. Для случая трёх сценариев симплекс представляет собой треугольник на плоскости, что позволяет наглядно представить все возможные распределения вероятностей.

Рисунок 2.2 демонстрирует поле распределений коэффициентов в декартовой системе координат для случая трех сценариев. Треугольная область представляет собой множество всех допустимых распределений вероятностей, удовлетворяющих ограничениям на их сумму и неотрицательность. Медианы треугольника, проведенные из вершин к серединам противоположных сторон, разбивают область на шесть секторов, каждый из которых соответствует определённому порядку ранжирования сценариев по их вероятностям [113].

Такое разбиение пространства решений на геометрические поля имеет важное практическое значение, поскольку позволяет систематизировать все возможные варианты распределения вероятностей и сопоставить каждому из них соответствующее оптимальное решение. В каждом секторе имеется определённый порядок убывания вероятностей сценариев, что определяет применимость соответствующих оценок Фишберна для данной области пространства решений. Переход из одного сектора в другой соответствует изменению структуры предпочтений между сценариями и, как следствие, может приводить к изменению оптимальной стратегии распределения ресурсов.

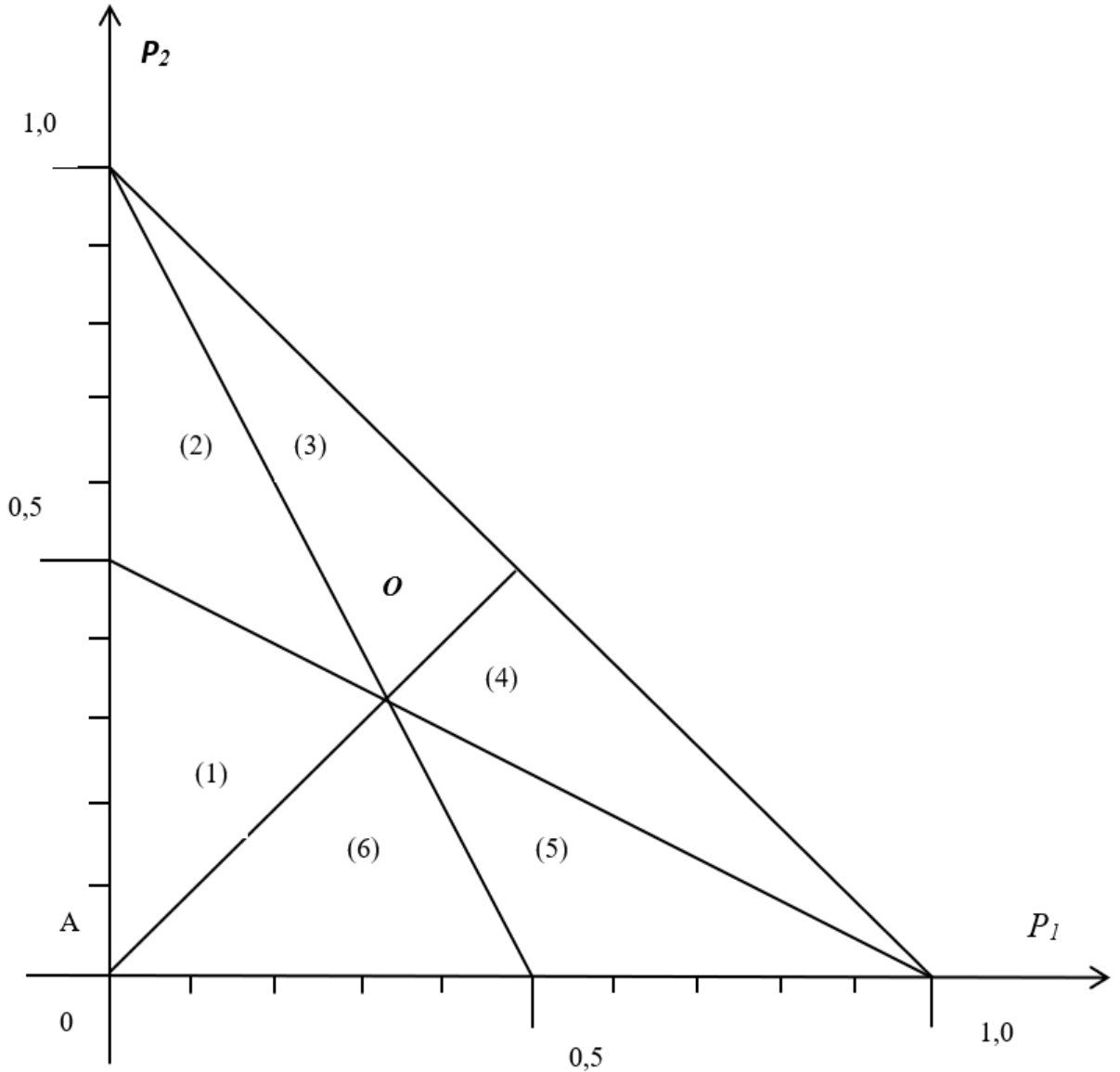


Рисунок 2.2 – Поле распределений коэффициентов  $\hat{P}_j$ ,  $P_3 = 3! = 6$  в декартовой системе координат. Источник: [разработано автором]

Таблица 2.5 систематизирует информацию о разделении пространства возможных решений на геометрические поля распределения априорных вероятностей. Для каждого сектора указывается соответствующий порядок ранжирования сценариев и формулы для вычисления оценок Фишберна.

Таблица 2.5 – Разделение пространства возможных решений на геометрические поля распределения априорных вероятностей  $\hat{P}_j$

Подмножество	Соотношение априорных вероятностей $\hat{P}_j$ .
(1)	$\hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_3}$
(2)	$\hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_3} < \hat{P}_{j_2}$
(3)	$\hat{P}_{j_3} < \hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_2}$
(4)	$\hat{P}_{j_3} < \hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_1}$
(5)	$\hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_3} < \hat{P}_{j_1}$
(6)	$\hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_3}$

Стоит отметить, что предложенный подход к определению весовых коэффициентов ранговых последовательностей на основе сценарного подхода обладает рядом преимуществ. Во-первых, он позволяет явным образом учесть неопределённость относительно будущих состояний системы путём рассмотрения множества альтернативных сценариев. Во-вторых, использование геометрической интерпретации задачи обеспечивает наглядность представления множества возможных решений и облегчает анализ их свойств. В-третьих, применение оценок Фишберна в сочетании с критерием Байеса позволяет получить компромиссное решение, учитывающее как имеющуюся информацию о предпочтительности сценариев, так и остаточную неопределённость относительно их

Практическое применение разработанного подхода в задачах распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах требует выполнения ряда этапов. На первом этапе осуществляется идентификация основных факторов, влияющих на эффективность функционирования системы, и формирование для каждого фактора набора характеризующих его показателей. На втором этапе определяются возможные сценарии развития системы, каждый из которых характеризуется определённой конфигурацией факторного пространства. На третьем этапе для

каждого сценария формируется ранговая последовательность, отражающая относительную значимость различных факторов в данных условиях.

На четвёртом этапе осуществляется преобразование ранговых последовательностей в численные весовые коэффициенты с использованием выбранного метода, например оценок Фишберна. На пятом этапе определяется распределение вероятностей по сценариям на основе имеющейся априорной информации и принципа максимальной неопределённости. На шестом этапе формулируется задача оптимизации распределения ресурсов с использованием критерия Байеса и полученных весовых коэффициентов. На заключительном, седьмом этапе осуществляется решение задачи оптимизации и анализ полученных результатов с точки зрения их устойчивости к изменению исходных предположений.

Опыт практического применения сценарного подхода в различных областях показывает, что оптимальное число сценариев обычно находится в диапазоне от трёх до десяти в зависимости от специфики решаемой задачи и доступности информации, для пассажирских транспортных систем целесообразно рассматривать три-пять базовых сценариев [9].

Далее рассмотрим в каких направлениях может осуществляться предложенный подход. Во-первых, представляет интерес разработка методов адаптивной корректировки весовых коэффициентов по мере поступления новой информации о фактическом состоянии системы, что позволит повысить точность прогнозирования и оперативно реагировать на изменения внешних условий. Во-вторых, необходимо исследовать возможности объединения предложенного подхода с методами имитационного моделирования, чтобы более детально проанализировать динамику функционирования пассажирской транспортной системы при различных сценариях распределения ресурсов.

В-третьих, актуальной задачей является разработка программного обеспечения, реализующего предложенные модели и алгоритмы определения весовых коэффициентов ранговых последовательностей. Такое программное обеспечение должно обеспечивать возможность интерактивного задания исходных

данных, визуализации пространства решений в виде, аналогичном представленному на рисунке 2.2, автоматического выполнения расчётов по различным методам и сравнительного анализа полученных результатов. Создание подобного инструментария существенно расширит возможности практического применения разработанных моделей в задачах управления пассажирскими транспортными системами.

Таким образом, исследование моделей определения весовых коэффициентов ранговых последовательностей на основе сценарного подхода составляет важную часть методологии распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах в условиях неопределённости. Предложенные в данном разделе модели и методы позволяют структурировать неопределённость путем выделения конечного числа сценариев, формализовать процедуру преобразования качественной информации о значимости факторов в количественные весовые коэффициенты и обеспечить обоснованный выбор стратегии распределения ресурсов с учётом возможных вариантов развития системы. Дальнейшее совершенствование этих подходов и их адаптация к специфике конкретных транспортных систем открывают широкие перспективы повышения эффективности управления ресурсами в условиях нестабильной и трудно прогнозируемой внешней среды.

### **Выводы по второй главе**

При формировании методологии распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах ключевое значение имеет адекватный учёт информационных условий функционирования системы. Проведённый анализ показал, что в практике управления транспортными системами принято различать три базовые информационные ситуации: детерминированные условия с полностью известными параметрами системы и внешней среды; стохастические условия с известными вероятностными характеристиками случайных параметров; условия

глубокой неопределённости с отсутствием достоверной информации о вероятностном описании неопределённых величин.

Специфика систем городского пассажирского транспорта общего пользования определяется комплексным характером информационной неопределённости. Такая неопределённость порождается дефицитом достоверных данных вследствие динамичности социально-экономических процессов, непредсказуемостью изменений параметров внешней среды и сложностью внутренней структуры транспортной системы с множественными взаимосвязями между управляемыми объектами. Указанные факторы создают ситуацию принципиальной неопределённости, при которой традиционные методы оптимизации оказываются недостаточно эффективными.

Для преодоления данной проблемы в исследовании применён подход, основанный на использовании принципа максимальной энтропии в качестве инструмента трансформации неопределённости в формализованное вероятностное описание. Энтропийный критерий Шеннона позволяет получить наименее предвзятую оценку распределения вероятностей при ограниченной исходной информации путём решения соответствующей оптимизационной задачи. Данный подход обеспечивает математически корректный переход от качественных представлений о неопределённости к количественным моделям принятия решений.

Критическим моментом применения энтропийного подхода является неединственность получаемых распределений вероятностей при заданных информационных ограничениях. Возникает задача обоснованного выбора конкретного варианта распределения для последующего использования в моделях оптимизации ресурсов транспортной системы. В работе рассмотрены два альтернативных метода решения данной задачи с анализом их достоинств и ограничений.

Метод потенциального распределения вероятностей опирается на предположение о том, что природа выбирает те состояния системы, которые вносят наибольший вклад в итоговое значение целевого функционала при всех возможных стратегиях управления. Соответственно формируется распределение,

присваивающее большие вероятности именно таким состояниям. Основной проблемой данного метода выступает высокая степень субъективности при количественном определении потенциальных вероятностей, что снижает воспроизводимость результатов и затрудняет их интерпретацию.

Альтернативный метод базируется на использовании формул Фишберна для назначения весовых коэффициентов на основе ранжирования состояний по степени их правдоподобности. Оценки Фишберна обеспечивают максимизацию энтропии при заданном порядке убывания вероятностей и гарантируют воспроизводимость результатов. Вместе с тем применение данного метода приводит к получению формальных значений целевого функционала, не всегда адекватно отражающих реальные предпочтения в конкретной практической ситуации.

В ходе исследования разработана модифицированная модель определения весовых коэффициентов ранговых последовательностей, устраняющая указанные недостатки классического подхода Фишберна. Ключевая идея модификации состоит в расширении области поиска оптимального решения на все множество допустимых распределений вероятностей состояний системы. Предложена геометрическая интерпретация задачи в виде симплекса вероятностей с разбиением его внутренней области на зоны, соответствующие различным вариантам упорядочения состояний.

Для каждой выделенной зоны определяются соответствующие весовые коэффициенты по модифицированным формулам Фишберна, после чего производится сравнительная оценка альтернативных стратегий распределения ресурсов на основе обобщенного байесовского критерия. Оптимальной признается стратегия, обеспечивающая наилучшее значение критерия при наиболее благоприятном распределении вероятностей из всего допустимого множества. Такой подход снижает влияние субъективного фактора и повышает обоснованность принимаемых решений.

Разработанная модель расширяет методический инструментарий теории принятия решений применительно к задачам управления ресурсами транспортных систем в условиях неопределённости. Практическое применение модели требует

построения структурированного описания альтернативных сценариев функционирования системы в форме морфологических матриц, связывающих варианты управленческих решений с возможными состояниями внешней среды и соответствующими значениями показателей эффективности. Предложенный математический аппарат обеспечивает выбор устойчивых решений по распределению ресурсов, сохраняющих эффективность при различных реализациях неопределённых факторов внешней среды.

### 3. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ МНОГООБРАЗИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ПАССАЖИРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

#### **3.1 Разработка концепции структуры многоуровневой иерархической пассажирской транспортной системы**

Современные пассажирские транспортные системы крупных городов представляют собой сложные организационно-технические комплексы, характеризующиеся множественностью уровней управления, разнообразием типов подвижного состава, территориальной распределенностью объектов инфраструктуры и необходимостью координации большого числа взаимосвязанных элементов. Эффективное распределение ресурсов в таких системах требует разработки адекватной концептуальной модели, отражающей иерархическую структуру системы и учитывающей специфику взаимодействия элементов на различных уровнях управления. Применение теории многоуровневых иерархических систем позволяет формализовать структуру транспортного комплекса и создать методологическую основу для решения задач оптимального распределения ресурсов в условиях неопределённости.

Базовым элементом предлагаемой концепции выступает логический оператор, представляющий собой единицу принятия решения на низшем уровне иерархии системы. В контексте пассажирской транспортной системы логический оператор соответствует отдельному виду транспорта, функционирующему на определенной территории обслуживания. Каждый логический оператор характеризуется набором показателей эффективности, значения которых зависят от реализовавшегося информационного состояния внешней среды. Совокупность логических операторов образует множество альтернативных вариантов организации транспортного обслуживания населения, из которого должен быть осуществлен выбор оптимальной структуры распределения ресурсов.

Для формализации задачи выбора эффективной структуры распределения ресурсов целесообразно использовать матричное представление, позволяющее

систематизировать информацию о показателях эффективности различных видов транспорта при различных информационных состояниях. Таблица 3.1 демонстрирует элементарную логическую матрицу оценочного функционала для отдельных видов транспорта [114]. В данной матрице строки соответствуют различным видам транспорта, образующим множество альтернативных стратегий, а столбцы представляют возможные информационные состояния системы, характеризующиеся различными сочетаниями значений неопределённых параметров внешней среды [11].

Таблица 3.1 – Элементарная логическая матрица оценочного функционала для отдельных видов транспорта

$R_1$		$Q$ – множество ИС, взаимоисключаемых для различных видов транспорта					$\mathcal{E}_i^p$ - эффективность по Байесу
		ИС <sub>1</sub> – $Q_1P_1$	...	ИС <sub>2</sub> – $Q_jP_j$	...	ИС <sub>n</sub> – $Q_nP_n$	
$\Phi$ – различные виды транспорта	$\varphi_{c1}$	$f_{11}$	...	$f_{1j}$	...	$f_{1n}$	$\mathcal{E}_{c1}^p = \sum_{j=1}^n P_j f_{j1}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$\varphi_c$	$f_{i1}$	...	$f_{ij}$	...	$f_{mj}$	$\mathcal{E}_{ci}^p = \sum_{j=1}^n P_j f_{jc}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$\varphi_{cm}$	$f_{m1}$	...	$f_{in}$	...	$f_{mn}$	$\mathcal{E}_{cm}^p = \sum_{j=1}^n P_j f_{jm}$

Элементы матрицы представляют собой значения оценочного функционала, отражающего эффективность эксплуатации соответствующего вида транспорта при заданном информационном состоянии. Важной особенностью рассматриваемой постановки задачи является взаимоисключающий характер информационных состояний, означающий, что в каждый момент времени система

находится ровно в одном из возможных состояний. Такое представление соответствует концепции сценарного планирования и позволяет применить аппарат теории принятия решений в условиях неопределённости для выбора оптимальной стратегии распределения ресурсов.

В качестве обобщенного критерия эффективности в таблице 3.1 используется показатель эффективности по Байесу, представляющий собой математическое ожидание оценочного функционала по всем возможным информационным состояниям с учётом их вероятностей. Применение байесовского подхода предполагает наличие информации о распределении вероятностей по множеству информационных состояний, которое может быть получено либо на основе статистического анализа данных о функционировании системы в прошлом, либо путём экспертного оценивания относительной правдоподобности различных сценариев. В случае отсутствия достоверной информации о вероятностях используются методы, рассмотренные во второй главе настоящей работы, основанные на принципе максимальной энтропии и оценках Фишберна.

Представленная в таблице 3.1 логическая матрица формирует единый логический оператор до разработки эффективной структуры распределения ресурсов в пассажирской транспортной системе. Элементарным показателем выступает величина, характеризующая эффективность эксплуатации отдельных видов транспорта для отдельных взаимоисключающих информационных ситуаций. К таким видам транспорта относятся автобус, трамвай, троллейбус, метрополитен и другие средства перевозки пассажиров, каждое из которых обладает специфическими эксплуатационными характеристиками и требует различных объёмов ресурсного обеспечения.

Концептуальное представление пассажирской транспортной системы как сложной многоуровневой структуры, требует обращения к понятийному аппарату теории многоуровневых иерархических систем. Согласно данной теории любая сложная система может быть представлена в виде иерархии взаимосвязанных элементов, организованных по уровням в соответствии с характером выполняемых

ими функций и степенью агрегирования информации [13]. Рисунок 3.1 демонстрирует общую форму представления сложной системы, включающую выделение уровней управления и объектов управления, а также установление связей между элементами различных уровней.

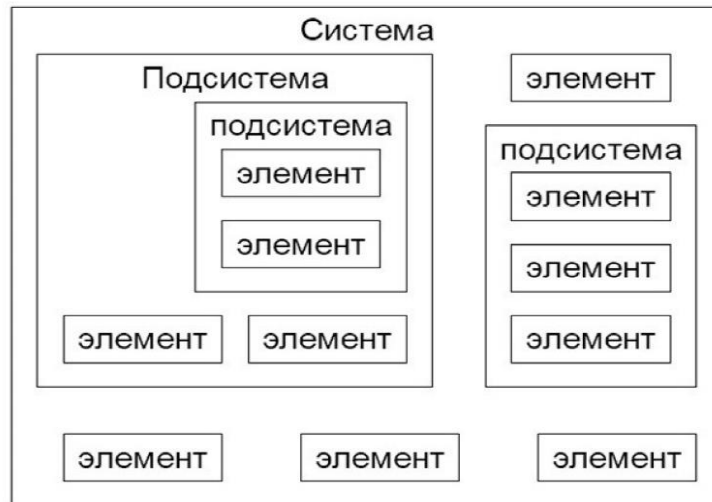


Рисунок 3.1 – Общая форма представления сложной системы. Источник: [115]

Рассмотрим понятийный аппарат теории многоуровневых иерархических систем [115], с точки зрения адаптации его к задачам исследования. Согласно классической теории многоуровневых иерархических систем [115] представление системы производится с применением подхода, согласно которому выделяются отдельные «страты» (рисунок 3.2).

Ключевым понятием теории многоуровневых иерархических систем является понятие страты, под которой понимается горизонтальный срез системы, объединяющий элементы с одинаковой степенью сложности или одинаковым уровнем абстракции описания. Рисунок 3.2 иллюстрирует представление иерархической системы с применением понятия страта. Элементы, принадлежащие одной страте, могут взаимодействовать между собой горизонтально, обмениваясь информацией и координируя свою деятельность. Одновременно элементы нижележащих страт подчиняются управляющим воздействиям, поступающим от элементов вышележащих страт, и передают им информацию о состоянии управляемых объектов [14].

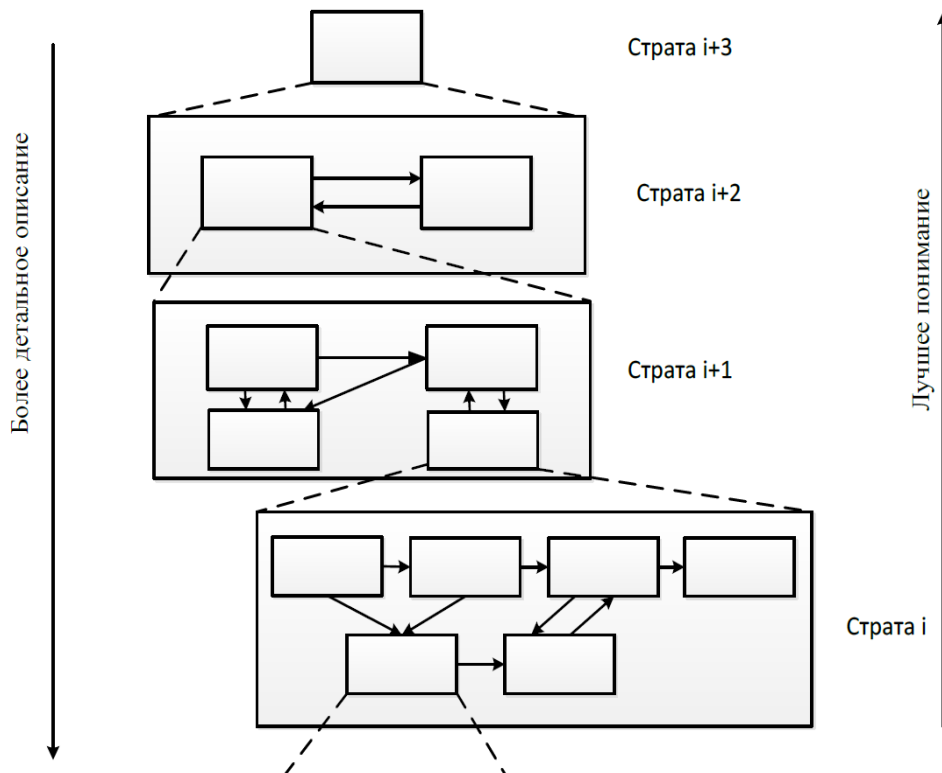


Рисунок 3.2 – Представление иерархической системы с применением понятия «страта». Источник: [115]

Наряду с понятием страты в теории многоуровневых систем используется понятие эшелона, обозначающее вертикальный уровень принятия решений в иерархии управления. Элементы, расположенные на одном эшелоне, обладают сопоставимыми полномочиями по принятию управленческих решений и функционируют на основе информации одинаковой степени агрегирования. Логические операторы согласно теории многоуровневых систем располагаются на нижнем иерархическом уровне или эшелоне и являются объектами управления. Рисунок 3.3 представляет многоэшелонную иерархическую систему принятия решений, где чётко прослеживается разделение функций между управляющими элементами различных эшелонов и объектами управления нижнего уровня [116].



Рисунок 3.3 – Много-эшелонная иерархическая система принятия решений.

Источник [115]

В классической теории многоуровневых систем вопрос соотношения понятий страта и эшелон решается следующим образом: в сложной многослойной системе страты могут находиться в зависимости от характера взаимодействия как на одном уровне, так и на различных уровнях описания системы. Расположенные на одном уровне страты принято называть эшелоном. В случае многоуровневой транспортной системы целесообразно при необходимости адаптировать данную терминологию в целях наиболее полного соответствия проектируемой системы распределения ресурсов с учётом конкретных особенностей функционирования объектов транспортного комплекса.

Применительно к задаче распределения ресурсов в пассажирской транспортной системе предлагается следующая концепция структуризации системы по уровням иерархии. На нижнем уровне располагаются логические операторы, соответствующие отдельным единицам подвижного состава или маршрутам движения транспортных средств. Данный уровень характеризуется

наибольшей детализацией описания и оперирует информацией о конкретных параметрах эксплуатации транспорта. На следующем уровне иерархии располагаются агрегированные объекты, объединяющие несколько логических операторов по территориальному признаку или по типу транспорта.

Следующим шагом при проектировании модели структуры распределения ресурсов будет исследование нескольких вариантов, сформированных на едином базовом уровне, но отличающихся по структуре связей между предшествующим и последующим уровнем.

Рисунок 3.4 демонстрирует структуру первого управляемого уровня в системе пассажирского транспорта. Обязательным условием создания модели структуры распределения ресурсов является возможность исследования неограниченного или достаточно большого количества показателей, агрегированных в отдельные районы, которые, в свою очередь, представляют совокупность логических операторов. В этом случае каждый район является отдельной подсистемой, обладающей определённой степенью автономности в части принятия оперативных решений по распределению выделенных ей ресурсов между составляющими её элементами.



Рисунок 3.4 – Структура первого управляемого уровня в системе пассажирского транспорта. Источник: [разработано автором]

Территориальное структурирование транспортной системы на районы обслуживания обусловлено необходимостью учёта пространственной неоднородности пассажиропотоков и различий в условиях эксплуатации транспорта на различных участках городской территории. Каждый район характеризуется специфическими параметрами транспортного спроса, определяемыми плотностью и структурой населения, размещением мест приложения труда и объектов культурно-бытового обслуживания, особенностями планировочной структуры территории. Соответственно оптимальная структура распределения ресурсов должна учитывать эти территориальные различия путём дифференциации объёмов ресурсного обеспечения отдельных районов пропорционально объёмам генерируемого ими пассажиропотока [15].

Формирование районов обслуживания как самостоятельных подсистем в структуре многоуровневой транспортной системы позволяет реализовать принцип децентрализации управления, предполагающий делегирование части полномочий по принятию решений на нижние уровни иерархии. При этом управляющий орган верхнего уровня устанавливает общие правила функционирования системы и распределяет ресурсы между районами на основе критериев справедливости и эффективности, а районные подсистемы самостоятельно определяют детальную структуру использования выделенных им ресурсов с учётом локальных особенностей транспортного спроса.

Важным аспектом разработки концепции структуры многоуровневой системы является определение принципов взаимодействия между элементами различных уровней иерархии. В рамках предлагаемого подхода предусматривается двусторонний обмен информацией между уровнями: от верхнего уровня к нижнему передаются управляющие воздействия в виде директивных заданий по объёмам транспортной работы и лимитов на потребление ресурсов, а от нижнего уровня к верхнему поступает информация о фактических результатах деятельности и потребностях в дополнительных ресурсах. Такая организация информационных потоков обеспечивает

возможность оперативной корректировки управленческих решений в ответ на изменения внешних условий и внутреннего состояния системы.

Следующим шагом при проектировании модели структуры распределения ресурсов является исследование нескольких вариантов структур, сформированных на едином базовом уровне, но отличающихся по характеру связей между предшествующим и последующим уровнями. Различные варианты структур могут предполагать различную степень централизации управления, различные механизмы координации деятельности подсистем одного уровня, различные процедуры агрегирования информации при передаче её на вышележащие уровни. Сравнительный анализ альтернативных структурных вариантов позволяет выявить наиболее эффективную конфигурацию системы управления применительно к конкретным условиям функционирования транспортного комплекса [16].

Одним из возможных вариантов организации структуры является жёсткая централизованная схема, при которой все решения по распределению ресурсов принимаются на верхнем уровне управления на основе полной информации о состоянии всех элементов системы. Преимуществом такой схемы является возможность глобальной оптимизации распределения ресурсов с учётом взаимосвязей между всеми подсистемами. Недостатком выступает высокая информационная нагрузка на управляющий орган верхнего уровня и низкая оперативность реагирования на локальные изменения условий функционирования отдельных элементов системы.

Альтернативным вариантом является децентрализованная схема, при которой управляющий орган верхнего уровня ограничивается установлением общих правил функционирования и распределением ресурсов между крупными подсистемами, а детальные решения по использованию ресурсов принимаются на нижних уровнях иерархии автономно. Преимуществом данной схемы является снижение информационной нагрузки на верхний уровень управления и повышение оперативности принятия решений на местах. Недостатком может быть потеря глобальной оптимальности

вследствие несогласованности действий отдельных подсистем, преследующих собственные локальные цели.

Компромиссным вариантом является иерархическая схема с координацией, при которой управляющий орган верхнего уровня выполняет функции координатора, обеспечивающего согласование планов деятельности подсистем нижнего уровня путём установления соответствующих координирующих параметров. Подсистемы нижнего уровня формируют свои планы автономно с учётом полученных от координатора параметров, после чего передают информацию о своих планах на верхний уровень для проверки их согласованности. В случае выявления несогласованности координатор корректирует значения координирующих параметров и цикл планирования повторяется до достижения согласованного решения [17].

Выбор конкретного варианта структуры системы управления распределением ресурсов должен осуществляться с учётом специфики функционирования транспортного комплекса и характера неопределённости внешней среды. В условиях высокой динамичности изменений транспортного спроса и частых возмущений со стороны внешней среды предпочтительными являются децентрализованные или координационные схемы, обеспечивающие высокую адаптивность системы. В условиях относительной стабильности внешней среды и наличия развитых информационных систем целесообразно применение более централизованных схем управления, позволяющих реализовать потенциал глобальной оптимизации.

Важным элементом концепции многоуровневой структуры является механизм вертикальной интеграции решений, обеспечивающий согласование целей и действий элементов различных уровней иерархии. Такой механизм предполагает декомпозицию глобальной задачи оптимизации распределения ресурсов на совокупность локальных задач, решаемых на различных уровнях иерархии, и последующую координацию полученных локальных решений для достижения глобального оптимума. Процедура декомпозиции может

осуществляться различными способами в зависимости от характера связей между подсистемами и структуры целевой функции глобальной задачи.

Наиболее распространённым подходом к декомпозиции является метод, основанный на введении координирующих переменных, характеризующих взаимодействие между подсистемами. Координатор верхнего уровня устанавливает значения этих переменных и передает их подсистемам нижнего уровня в качестве параметров. Подсистемы решают свои локальные задачи оптимизации при фиксированных значениях координирующих переменных и сообщают координатору характеристики полученных решений. На основе этой информации координатор корректирует значения координирующих переменных в направлении улучшения глобального критерия и передаёт новые значения подсистемам. Процесс продолжается итеративно до достижения сходимости к глобально оптимальному или приемлемому решению [18].

Альтернативным подходом к вертикальной интеграции решений является метод целевой координации, при котором координатор воздействует на подсистемы путём установления локальных целевых функций, оптимизация которых подсистемами приводит к достижению глобального оптимума. Координатор формирует локальные целевые функции как линейные комбинации глобальной целевой функции и штрафных членов, учитывающих ограничения на взаимодействие между подсистемами. Подсистемы максимизируют свои локальные целевые функции и сообщают координатору полученные решения. Координатор анализирует согласованность этих решений и при необходимости корректирует веса в линейных комбинациях, формирующих локальные целевые функции.

Применение принципов иерархического управления к задаче распределения ресурсов в пассажирской транспортной системе позволяет существенно снизить вычислительную сложность решения задачи оптимизации по сравнению с централизованным подходом. Декомпозиция глобальной задачи большой размерности на совокупность локальных задач

меньшей размерности делает возможным применение эффективных методов оптимизации и получение решений в приемлемые сроки. При этом координационные механизмы обеспечивают учёт взаимосвязей между подсистемами и приближение к глобальному оптимуму, недостижимому при полностью автономном функционировании подсистем.

Разработанная концепция структуры многоуровневой иерархической пассажирской транспортной системы создаёт методологическую основу для построения конкретных моделей и алгоритмов распределения ресурсов с учётом специфики различных уровней управления. Данная концепция предполагает гибкую адаптацию общих принципов теории многоуровневых систем к особенностям функционирования городского пассажирского транспорта и позволяет учесть, как технологические ограничения транспортного производства, так и требования эффективного использования ресурсов в условиях их дефицитности. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с детализацией структуры отдельных уровней иерархии, разработкой конкретных механизмов координации и формализацией процедур принятия решений на каждом уровне управления системой.

### **3.2 Разработка модели структуры системы распределения ресурсов в транспортном комплексе, основанной на технологическом принципе представления показателей**

Практическая реализация концепции многоуровневой иерархической структуры пассажирской транспортной системы требует разработки конкретных моделей, определяющих способы формирования логических операторов на различных уровнях управления и механизмы агрегирования информации при переходе от нижележащих уровней к вышележащим. Технологический принцип представления показателей предполагает построение модели структуры системы на основе анализа технологических особенностей функционирования различных видов транспорта и

закономерностей формирования интегральных показателей эффективности из частных характеристик работы отдельных элементов системы. Такой подход позволяет обеспечить непротиворечивость модели реальным процессам транспортного производства и создать основу для разработки практически реализуемых алгоритмов распределения ресурсов.

Базовой идеей технологического принципа является формирование логических операторов последующего иерархического уровня из наилучших показателей эффективности логических операторов предшествующего уровня. Такой подход отражает естественную логику процесса принятия решений в многоуровневой системе управления, при которой управляющий орган каждого уровня осуществляет выбор оптимальных вариантов из множества альтернатив, предоставленных нижележащим уровнем, и передает результаты своего выбора на вышележащий уровень для дальнейшего агрегирования. При этом критерии оптимальности на различных уровнях могут различаться, отражая специфику задач, решаемых на соответствующих уровнях иерархии.

Рассмотрим вариант 1 модели структуры системы распределения ресурсов, основанный на последовательном агрегировании показателей эффективности при переходе от первого управляемого уровня ко второму управляющему уровню. На первом уровне располагаются логические операторы, представляющие отдельные виды транспорта в конкретных районах обслуживания. Каждый такой логический оператор характеризуется матрицей показателей эффективности, строки которой соответствуют различным видам транспорта, а столбцы представляют возможные информационные состояния системы. Элементы матрицы содержат количественные оценки эффективности эксплуатации соответствующего вида транспорта при заданном информационном состоянии.

При формировании логических операторов второго уровня принципиальное значение имеет интерпретация понятия информационного состояния и способ его определения для элементов вышележащего уровня

иерархии. В рассматриваемой модели могут реализовываться различные информационные ситуации, определяющие специфику процедуры агрегирования показателей. Первая информационная ситуация характеризуется тем, что точно известно конкретное информационное состояние из множества возможных состояний системы. В этом случае формирование логического оператора второго уровня осуществляется путем выбора для каждого вида транспорта наилучшего показателя эффективности, соответствующего известному информационному состоянию.

Вторая информационная ситуация характеризуется системой предпочтений элементов на множестве возможных состояний, когда вместо точного знания реализовавшегося состояния имеется информация об относительной правдоподобности различных состояний. В такой ситуации формирование логического оператора второго уровня требует применения процедур свертки показателей эффективности с учётом заданной системы предпочтений. Наиболее распространённым подходом является использование взвешенной суммы показателей по всем информационным состояниям, где веса отражают степень предпочтительности соответствующих состояний согласно имеющейся информации [19].

Третья информационная ситуация соответствует полной неопределённости, когда информационное состояние из множества возможных состояний системы совершенно неизвестно и отсутствует какая-либо информация о предпочтительности тех или иных состояний. В данном случае формирование логического оператора второго уровня должно основываться на применении критериев принятия решений в условиях неопределённости, рассмотренных во второй главе настоящей работы. Выбор конкретного критерия зависит от степени осторожности лица, принимающего решение, и его отношения к риску возможных неблагоприятных исходов.

Аналогичным образом формируются все логические матрицы второго уровня или эшелона в терминологии теории многоуровневых систем. На данном этапе построения модели количество логических операторов второго

уровня определяется количеством районов обслуживания, выделенных на предшествующем первом уровне. Каждому району соответствует свой логический оператор второго уровня, агрегирующий информацию о показателях эффективности всех видов транспорта, функционирующих в данном районе при различных возможных сочетаниях локальных условий эксплуатации.

В каждом логическом операторе второго уровня количество возможных решений, представленных в виде строк матрицы показателей, соответствует количеству видов транспорта, рассматриваемых на первом уровне. Это означает, что на втором уровне сохраняется детализация по видам транспорта, но изменяется интерпретация информационных состояний, представленных столбцами матрицы. Если на первом уровне информационные состояния характеризовали возможные сочетания внешних условий функционирования транспортной системы, то на втором уровне они представляют различные варианты реализации показателей эффективности первого уровня [20].

Количество столбцов в логическом операторе или страте на втором уровне определяется количеством логических операторов или страт в каждом отдельном районе на первом предшествующем уровне. Фактически это означает, что на втором уровне управления в качестве информационных ситуаций рассматриваются количественные оценки эффективности функционирования локальной транспортной микросистемы с соответствующим ей набором частных показателей по отдельным видам транспорта. Таблица 3.2 иллюстрирует структуру элементарной логической матрицы для первого района на втором эшелоне системы управления.

Представленная в таблице 3.2 логическая матрица отражает результаты агрегирования показателей эффективности при переходе от первого уровня ко второму для конкретного территориального района обслуживания. Строки матрицы по-прежнему соответствуют различным видам транспорта, что обеспечивает возможность сравнительного анализа их эффективности на уровне района в целом. Столбцы матрицы представляют различные сценарии

реализации показателей эффективности отдельных логических операторов первого уровня, функционирующих в данном районе. Последний столбец содержит интегральную оценку эффективности каждого вида транспорта, вычисленную по критерию Байеса с учётом распределения вероятностей по сценариям.

Таблица 3.2 – Элементарная логическая матрица (ЛО) 1-го района 2-го (уровня) эшелона

$R_2$		$Q$ – множество ИС, взаимноисключаемых для различных видов транспорта					$\mathfrak{E}_i^p$ - эффективность по Байесу
		$ИС_1^{11}$	...	$ИС_2^{s1}$	...	$ИС_n^{k1}$	
Ф– различные виды транспорта	$\varphi_1$	$\mathfrak{E}_{1max}^{11}$	...	$\mathfrak{E}_{1max}^{s1}$	...	$\mathfrak{E}_{1max}^{k1}$	$\mathfrak{E}_{c1}^1$ $= \sum_{s=1}^k P_j \mathfrak{E}_{1max}^{s1}$
	$\varphi_2$	$\mathfrak{E}_{2max}^{11}$	...	$\mathfrak{E}_{2max}^{s1}$	...	$\mathfrak{E}_{2max}^{k1}$	$\mathfrak{E}_{c1}^1$ $= \sum_{s=1}^k P_j \mathfrak{E}_{2max}^{s1}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$\varphi_m$	$\mathfrak{E}_{mmax}^{11}$	...	$\mathfrak{E}_{mmax}^{s1}$	...	$\mathfrak{E}_{mmax}^{k1}$	$\mathfrak{E}_{c1}^1$ $= \sum_{s=1}^k P_j \mathfrak{E}_{mmax}^{s1}$

Принципиальная логическая матрица решения задачи оптимизации на втором эшелоне представлена в таблице 3.3.

Данная матрица объединяет информацию по всем районам обслуживания и формирует основу для принятия решений на уровне управления транспортной системой города в целом.

Строки матрицы соответствуют различным видам транспорта, столбцы представляют возможные информационные ситуации, характеризующиеся различными сочетаниями показателей эффективности по отдельным районам. Элементы матрицы содержат агрегированные показатели эффективности функционирования соответствующего вида транспорта в масштабе всего города при заданной информационной ситуации.

Таблица 3.3 – Принципиальная логическая матрица решения задачи оптимизации на 2-ом эшелоне

$R_2$		Множество ИС, взаимоисключаемых для различных видов транспорта					$\mathcal{E}_i^p$ - эффективность по Байесу
		$ИС_1^{1r}$	...	$ИС_2^{sr}$	...	$ИС_{n=k_1}^{kp}$	
Ф – различные виды транспорта	$\varphi_{c1}$	$\mathcal{E}_{1max}^{11}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{sr}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{kp}$	$\mathcal{E}_{c1}^r$ $= \sum_{s=1}^k P_j \mathcal{E}_{1max}^{s1}$
	$\varphi_{c2}$	$\mathcal{E}_{2max}^{11}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{sr}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{kp}$	$\mathcal{E}_{c1}^r$ $= \sum_{s=1}^k P_j \mathcal{E}_{2max}^{s1}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$\varphi_{cm}$	$\mathcal{E}_{mmax}^{11}$	...	$\mathcal{E}_{mmax}^{sr}$	...	$\mathcal{E}_{mmax}^{kp}$	$\mathcal{E}_{c1}^r$ $= \sum_{s=1}^k P_j \mathcal{E}_{mmax}^{s1}$

Формирование агрегированных показателей на втором уровне может осуществляться различными способами в зависимости от принятых критериев оценки эффективности транспортной системы. Наиболее простым подходом является суммирование показателей эффективности по всем районам, что соответствует аддитивной модели агрегирования. Такой подход применим в случаях, когда показатели эффективности имеют характер экстенсивных величин, например объёмов перевезенных пассажиров или выполненной транспортной работы. Применение процедур взвешенного усреднения с весами, пропорциональными значимости соответствующих районов лучше подходит для интенсивных показателей.

На рисунке 3.5 продемонстрирована структура системы показателей качества транспортного обслуживания населения. Данная структура отражает многомерность понятия качества транспортного обслуживания и необходимость комплексного учета множества факторов при оценке эффективности использования ресурсов [21].

Структура представленная на рисунке 3.5 включает показатели различных уровней агрегирования.

На нижнем уровне располагаются первичные технико-эксплуатационные показатели, непосредственно измеряемые в процессе функционирования транспортной системы. К таким показателям относятся интервалы движения транспортных средств, наполнение салонов, скорости сообщения, протяжённость маршрутной сети и другие характеристики, определяющие условия поездок пассажиров.

На промежуточном уровне располагаются обобщённые показатели, получаемые путем агрегирования первичных показателей по определённым правилам и отражающие отдельные аспекты качества обслуживания. На верхнем уровне находится интегральный показатель качества, синтезирующий информацию обо всех частных аспектах в единую комплексную оценку.



Рисунок 3.5 - Структура системы показателей качества транспортного обслуживания населения. Источник: [12]

Структура второго управляющего уровня в исследуемой системе пассажирского транспорта для первого варианта модели представлена на рисунке 3.6. Данная структура отражает организацию процесса принятия решений по распределению ресурсов между районами обслуживания и видами транспорта с учётом результатов анализа показателей эффективности на первом управляемом уровне. Центральным элементом структуры выступает координирующий орган второго уровня, получающий агрегированную информацию от логических операторов всех районов и формирующий управляющие воздействия для обеспечения согласованного функционирования районных подсистем.

Взаимодействие между первым и вторым уровнями осуществляется посредством восходящих информационных потоков, передающих данные о

показателях эффективности от районов к координирующему органу, и нисходящих потоков управляющих воздействий, определяющих лимиты ресурсов и целевые показатели для районных подсистем. Такая организация информационного обмена соответствует классической схеме иерархического управления с двусторонней связью между уровнями и обеспечивает возможность итеративного уточнения решений по мере поступления дополнительной информации о состоянии управляемых объектов [22].

Дальнейшее развитие многоуровневой структуры системы распределения ресурсов предполагает формирование третьего управляющего уровня, на котором осуществляется стратегическое планирование развития транспортной системы и распределение ресурсов между крупными функциональными подсистемами. Таблица 3.6 представляет логический оператор на третьем управляющем уровне в системе распределения ресурсов пассажирского транспорта. Структура данного логического оператора отражает более высокую степень агрегирования информации по сравнению со вторым уровнем и ориентирована на решение задач долгосрочного планирования.

В логическом операторе третьего уровня информационные состояния характеризуют возможные сценарии развития транспортной системы в долгосрочной перспективе с учётом изменений демографической ситуации, градостроительных преобразований, экономических условий и других факторов стратегического характера. Показатели эффективности на данном уровне отражают не только текущие результаты функционирования транспортной системы, но и перспективы их изменения при различных вариантах инвестиционной политики и организационных решений. Принятие решений на третьем уровне осуществляется с учётом долгосрочных последствий и требует применения методов динамической оптимизации и сценарного анализа.



Рисунок 3.6 – Структура второго управляющего уровня в исследуемой системе пассажирского транспорта (вариант 1).

Источник: [разработано автором]

Таблица 3.6 – ЛО на 3-ем управляющем уровне в системе распределения ресурсов пассажирского транспорта

ЛО (R3, s=1, r=1)								
$R_3$	$ИС_1^{11}$	$ИС_2^{11}$	...	$ИС_j^{s1}$	...	$ИС_{n=k_r}^{kp}$	$ИС_{n=k_r}^{kp}$	$\mathcal{E}_m^r$
$\varphi_1$	$\mathcal{E}_{1max}^{11}$	$\mathcal{E}_{1max}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{k1}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^k$	$\mathcal{E}_{1max}^{1p+1}$	$\mathcal{E}_1^{11}$
$\varphi_2$	$\mathcal{E}_{2max}^{11}$	$\mathcal{E}_{2max}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{k1}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^k$	$\mathcal{E}_{2max}^{1p+1}$	$\mathcal{E}_2^{11}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$\varphi_m$	$\mathcal{E}_{mmax}^{11}$	$\mathcal{E}_{mmax}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{mmax}^{kp}$	...	$\mathcal{E}_{mmax}^{kp}$	$\mathcal{E}_{mmax}^{1p+1}$	$\mathcal{E}_m^{11}$

Можно утверждать, что модель структуры в рассматриваемом представлении является наиболее эффективной при сравнении различных сценариев распределения видов транспорта, когда определённому количеству видов транспорта соответствует некоторый набор значений отдельных информационных состояний, определяющих выбор наиболее эффективного варианта сочетаний видов транспорта. Каждый из рассматриваемых сценариев, представляющий собой определённый набор видов транспорта с заданными объёмами ресурсного обеспечения, имеет набор ранговых характеристик, влияющих на эффективность отдельного сценария в системе.

Ранговые характеристики сценариев формируются на основе сравнительного анализа показателей эффективности при различных информационных состояниях системы. Для каждого информационного состояния определяется упорядочивание сценариев по убыванию показателя эффективности, что позволяет идентифицировать сценарии, обеспечивающие наилучшие результаты в конкретных условиях [117].

Важным преимуществом предложенной модели структуры является возможность учёта технологических особенностей различных видов транспорта при формировании агрегированных показателей эффективности.

Технологический принцип представления показателей предполагает также учёт взаимосвязей между различными видами транспорта в рамках единой транспортной системы города. Функционирование различных видов транспорта не является полностью независимым, поскольку они обслуживают частично перекрывающиеся пассажиропотоки и конкурируют за ограниченные ресурсы дорожного пространства и финансирования. Пассажиры осуществляют выбор между альтернативными видами транспорта на основе сравнения времени поездки, стоимости проезда, комфортности и других характеристик качества обслуживания. Изменение параметров функционирования одного вида транспорта приводит к перераспределению пассажиропотоков и влияет на загрузку других видов транспорта [118].

Учет взаимосвязей между видами транспорта в модели структуры системы распределения ресурсов может осуществляться путём включения в показатели эффективности характеристик, отражающих синергетические эффекты от совместного функционирования различных видов транспорта. К таким характеристикам относятся показатели связности транспортной сети, обеспечивающие удобство пересадок между видами транспорта, показатели комплементарности маршрутных систем, характеризующие степень взаимного дополнения сетей различных видов транспорта, показатели устойчивости транспортной системы к сбоям в работе отдельных элементов благодаря наличию альтернативных вариантов передвижения.

Практическая реализация предложенной модели структуры системы распределения ресурсов требует разработки процедур сбора и обработки информации о показателях эффективности на различных уровнях иерархии. На первом управляемом уровне необходима организация системы мониторинга текущих параметров работы транспортной системы, включающей автоматизированные средства учёта пассажиропотоков, контроля движения транспортных средств, фиксации отклонений от расписаний и других характеристик качества обслуживания. Собираемая информация должна обеспечивать возможность оперативного расчёта показателей эффективности для

различных видов транспорта и районов обслуживания с требуемой степенью детализации.

На втором управляющем уровне осуществляется агрегирование первичной информации и формирование сводных показателей эффективности для принятия тактических решений по распределению ресурсов. Информационная система данного уровня должна обеспечивать возможность сравнительного анализа показателей эффективности различных видов транспорта и районов обслуживания, выявления узких мест в функционировании транспортной системы и формирования предложений по корректировке распределения ресурсов. На третьем управляющем уровне используется наиболее агрегированная информация стратегического характера, отражающая долгосрочные тенденции развития транспортной системы и эффекты от реализации инвестиционных программ.

Важным аспектом функционирования многоуровневой системы распределения ресурсов является обеспечение согласованности решений, принимаемых на различных уровнях иерархии. Несогласованность решений может приводить к неэффективному использованию ресурсов вследствие дублирования функций различных видов транспорта, нерационального распределения инвестиций между конкурирующими проектами, противоречивости управляющих воздействий, направляемых на один и тот же объект управления с различных уровней иерархии. Для предотвращения таких ситуаций в модель структуры системы должны быть включены механизмы координации решений между уровнями [119].

Одним из эффективных механизмов координации является использование системы приоритетов при распределении ресурсов, когда на верхнем уровне устанавливаются общие принципы и ограничения, в рамках которых нижележащие уровни осуществляют детализацию решений. Такой подход обеспечивает единство стратегии развития транспортной системы при сохранении необходимой гибкости в адаптации решений к локальным условиям. Другим механизмом координации выступает итеративное согласование решений, при котором нижележащие уровни формируют предварительные варианты решений и направляют их на верхний

уровень для оценки согласованности, после чего на основе полученных замечаний осуществляется корректировка решений до достижения приемлемого результата.

Разработанная модель структуры системы распределения ресурсов, основанная на технологическом принципе представления показателей, создаёт методологическую основу для построения конкретных алгоритмов оптимизации распределения ресурсов между видами транспорта и территориальными зонами обслуживания. Данная модель обеспечивает возможность учёта иерархической природы процесса принятия решений в сложных транспортных системах и позволяет согласовать различные временные горизонты планирования от оперативного управления до стратегического развития. Дальнейшее совершенствование модели может осуществляться в направлении детализации процедур агрегирования показателей, уточнения критериев эффективности для различных уровней иерархии и разработки механизмов адаптивной корректировки структуры системы в ответ на изменения внешних условий функционирования.

### **3.3 Разработка модели структуры системы распределения ресурсов, основанной на организационно-технологическом принципе представления показателей на различных уровнях**

Вариант 2. Выше уже отмечалось, что вариант 1 представления структуры распределения ресурсов является оценочной моделью функционирования микро(макро) систем, как совокупности отдельных видов транспорта в привязке к отдельным геолокациям.

Данный подход полностью соответствует модели оценки эффективности функционирования систем, состоящих из некоторого набора сценариев. Но если речь идет об оптимальной структуре распределения ресурсов, тогда необходимо в исследуемой системе обозначить структуры управления и характер их влияния на общую эффективность системы распределения ресурсов. Рассмотрим представленные модели структуры исследуемой системы в данном контексте.

В [120] со ссылкой на доклад «Национальная концепция устойчивых городских транспортных систем» № 73228-RU [121] констатируется наличие проблем управления городским общественным транспортом в РФ, характерных для всех субъектов РФ:

1. Практически во всех муниципальных образованиях РФ ГПТОП не является единым транспортным комплексом: ГПТОП не является однородным по характеру управления, ГПТОП не является однородным по функциональному признаку, а также ГПТОП не является единым целым в пространственной составляющей.

2. Законодательно в ГПТОП производится разделение полномочий по управлению системой, соответственно и полномочия в системе распределения ресурсов между различными уровнями муниципальной власти, то есть ГПТОП – **не однородно по функционалу управления.**

В данной сфере действует ряд нормативных документов. Согласно ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» от 6 октября 2003 г. № 131-ФЗ, организация транспортного обслуживания населения всеми видами городского транспорта возложена на муниципальные власти, а ряд функций передан на региональный уровень. Федеральным законом от 13 июля 2015 г. № 220-ФЗ «Об организации регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом в Российской Федерации», подтверждаются компетенции муниципальных органов в субъектах РФ, с учётом предполагаемых изменений (рисунок 3.7).

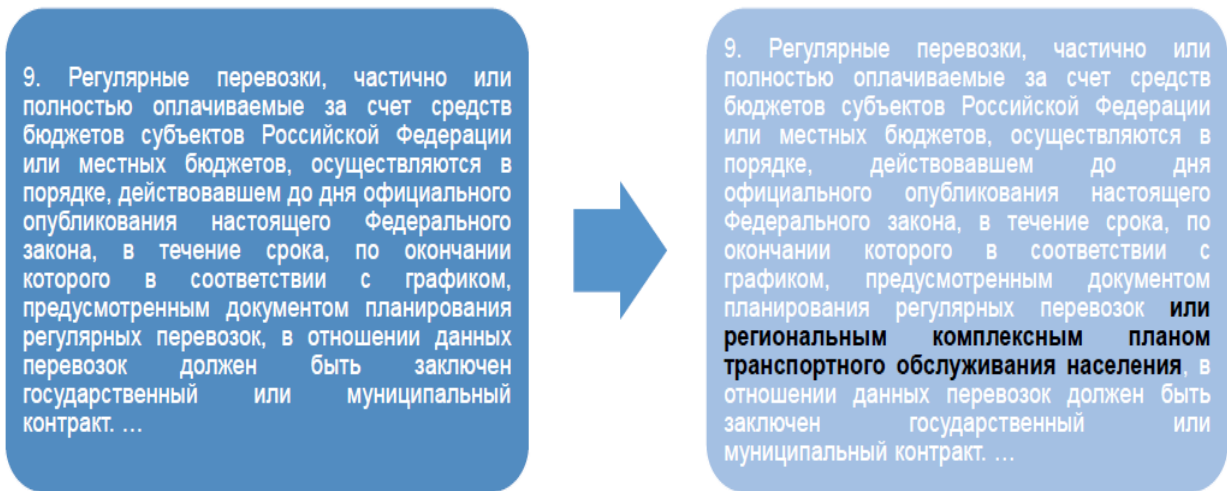


Рисунок 3.7 – Изменения в ФЗ №220 в части 9, статьи 38

Неоднородность субъектов управления в исследуемой системе приводит к тому, что финансовые ресурсы, выделяемые из бюджетных источников на развитие систем ГПТОП в целях повышения качества транспортного обслуживания населения в городах, во-первых, недостаточны по объёму; во-вторых, носят непредсказуемый и неупорядоченный характер, в-третьих, их распределение не систематизировано в целях стратегического планирования [120]. Фактически подтверждается тезис о значительной степени неопределённости в исследуемой системе.

В настоящее время системы управления ГПТОП для всех регионов РФ можно условно разделить на три основные организационные структуры.

1) Административная, когда субъектом и объектом в системе управления являются муниципальные структуры, что характерно для ряда населённых пунктов с крупными градообразующими предприятиями.

2) Смешанный рынок, когда субъектом являются муниципальные образования, а объектом – и муниципальные предприятия, и коммерческие агенты - перевозчики (такая структура распределения управления характерна для крупных городов и мегаполисов).

3) Свободный рынок, когда и субъектом, и объектом в системе управления являются коммерческие агенты - перевозчики.

Наиболее распространённой формой для большинства городов РФ является система, в которой незначительное количество перевозчиков (около 5 %) являются муниципальными структурами, а остальной сегмент перевозок пассажиров выполняют открытые акционерные общества (ОАО), общества с ограниченной ответственностью (ООО) и индивидуальные предприниматели (ИП). Приведём характерный пример распределения сфер ответственности в системе ГПТОП в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Структура автотранспортных предприятия в системе ГПТОП в г. Омске. Источник: [122, 123]

Организационная форма	Количество предприятий, ед.	Структура, %
Муниципальные предприятия	3	4,0
Юридические лица (ООО)	10	13,5
Юридические лица (ОАО)	1	1,4
Индивидуальные предприниматели	60	81,1
Итого	74	100,0

В идеальных условиях участников системы ГПТОП системы должны объединить между собой устойчивые связи, формирующие целостность системы управления, а взаимоотношения между структурами управления транспортным процессом должны быть гармонизированы с учётом их потенциала (места и роли в системе). При этом существующее законодательство, регламентирующее деятельность субъектов управления транспортным процессом, в рамках правового поля предполагает возможность нескольких альтернативных моделей организации транспортного процесса ГПТОП, а базовые элементы, формирующие их производственный потенциал, имеют собственное целеполагание, что уже вносит элемент нестабильности выбора, то есть неопределённости [124, 125, 126] (рисунок 3.6).

Из рисунка 3.8 видно, что коммерческие структуры преследуют цель, заключающуюся в получении прибыли, а муниципальные организации преследуют цель – осуществление перевозок с минимальными финансовыми издержками.

В такой ситуации коммерческие структуры заинтересованы выполнять требования качества пассажирских перевозок, но лишь в той степени, чтобы быть допущенными к оказанию транспортных услуг, но в недостаточной для полного удовлетворения качества обслуживания пассажиров.



Рисунок 3.8 – Модель структуры взаимодействия в системе ГПТ крупного города.

Источник: [127]

Проблема обостряется ещё и тем, что муниципальные АТП могут покрывать собственные издержки за счёт дотаций из бюджета муниципальных образований (например, на обновление парка подвижного состава), то есть имеют льготные возможности управлять тарифами в целях повышения конкурентоспособности. Достижение баланса интересов эксплуатантов системы ГПТОП предполагалось введением в действие в ФЗ № 220-ФЗ «Об организации регулярных перевозок пассажиров» [128], но системообразующих принципов сбалансированности ГПТОП между субъектами управления до сих пор не выработано.

Поэтому 2-ой вариант представления модели структуры распределения ресурсов должен предполагать формирование инструментов для создания сбалансированной системы распределения функционала управления между субъектами системы ГПТОП. Актуальность данной постановки задачи подтверждается рядом научных публикаций [129,130,131,132,133,134]

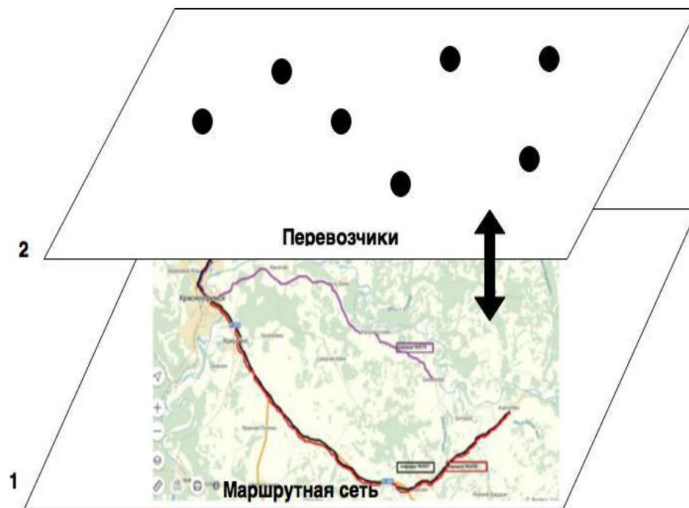


Рисунок 3.9 – Распределение функциональных плоскостей взаимодействия АТП и субъектов РФ [129]

В [129] представлена схема, предполагающая разделение функционала субъектов ГПТ, основанное на «взаимовыгодном сотрудничестве», на два иерархических уровня (рисунок 3.9).

1. Первый иерархический уровень – это сфера деятельности муниципальных организаций, отвечающих за эффективное функционирование маршрутной сети ГПТ региона, на основании заключённых договоров об оказании транспортных услуг населению.

2. Второй иерархический уровень – это уровень, «представляющий интересы перевозчиков» и определяющий связи между различными предприятиями, которые оказывают услуги транспортного обслуживания населения на основании заключённых договоров.

Представленный в [129] вариант многоуровневой системы имеет ряд недостатков, основным из которых является отсутствие базового технологического уровня оценки показателей транспортного обслуживания.

Учитывая результаты, приведённого анализа сложившейся прикладной ситуации, регулируемой существующим законодательством, и выявленными характерными особенностями распределения и источников финансирования транспортной системы можно сформировать 2-ой вариант представления модели структуры распределения ресурсов в транспортной системе ГПТ, при этом базовый уровень остаётся без изменения. Базовые принципы формирования 2-го варианта исследуемой системы предполагают:

1. Обязательное наличие на 1-ом эшелоне базового блока первого управляемого уровня, поскольку именно в нём формируются реальные показатели текущего состояния системы, которые являются объектами управления.

2. Второй и последующие иерархические уровни в системе должны отражать сложившуюся информационно ситуацию, соответствующую принципам организации действующей системы, то есть должно учитываться наличие физических субъектов управления, отвечающих за распределение ресурсов. При этом важно выявить функциональные связи между качественными показателями 1-го и 2-го уровня.

Поэтому разработка модели структуры системы распределения ресурсов, основанной на организационно-технологическом принципе распределения показателей на различных уровнях, предполагает выстраивание иной структуры взаимодействия показателей, нежели, чем в 1-ом варианте.

Отличие проявляется в ряде структурных преобразований, заключающихся в следующем. **В первом варианте** мы рассматривали формирование логической матрицы второго уровня, как совокупность наилучших показателей эффективности по отдельным видам транспорта, что позволяло спроектировать систему распределения ресурсов с учётом конкретных особенностей функционирования отдельных видов транспорта и соответствующей им инфраструктуре.

При этом выполнялось условие:

$$\|F_1\| = \begin{bmatrix} f_{11}^{sr} & \dots & f_{1n}^{sr} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1}^{sr} & \dots & f_{mn}^{sr} \end{bmatrix} \equiv \|F_2\| = \begin{bmatrix} f_{11}^{sr} & \dots & f_{1n}^{sr} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1}^{sr} & \dots & f_{mn}^{sr} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Тогда в наборе подмножеств ИС полного информационного пространства решений (рисунок 3.10 на примере 3-х видов транспорта) в результате расчёта ЛО 1-го уровня (поиск оптимального решения) формировалась структура ЛО 2-го (последующего) уровня как вектор-срока возможных эффективных состояний функционирования отдельных видов транспорта.

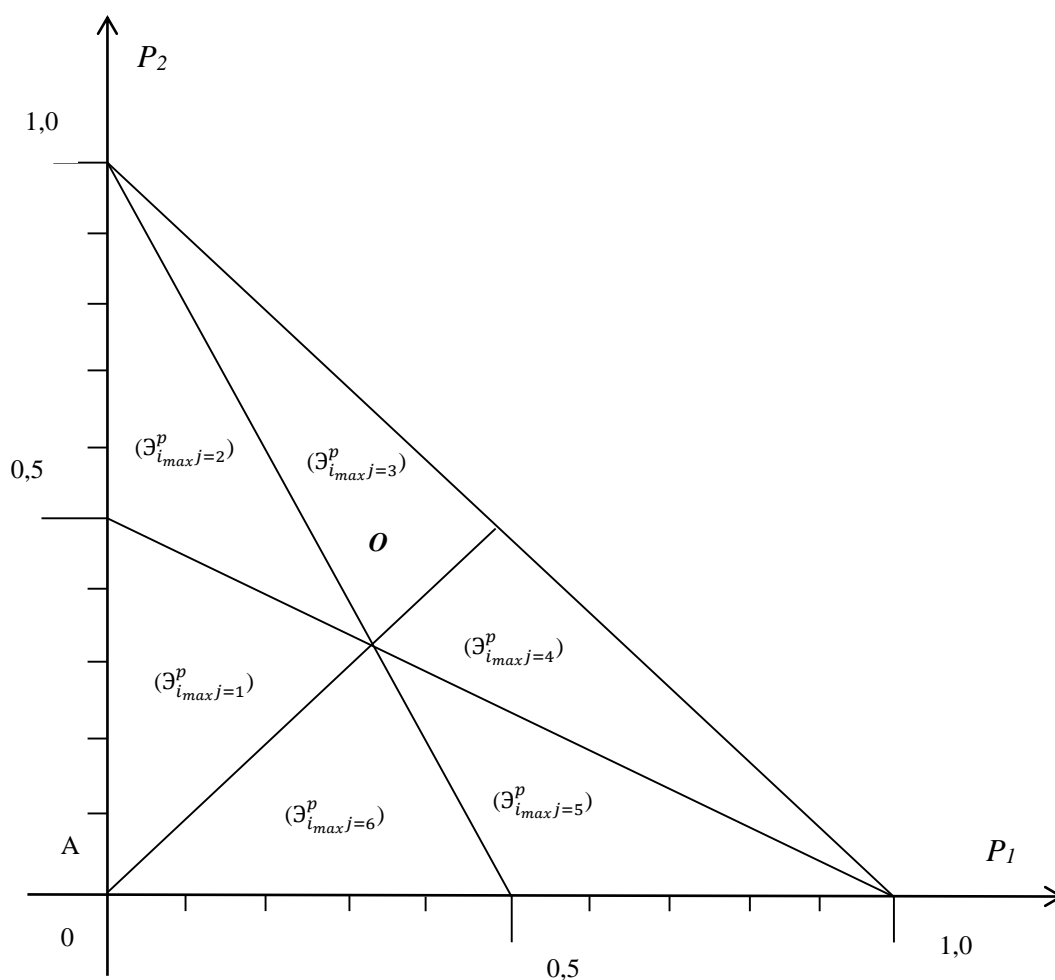


Рисунок 3.10 – Поле распределений ИС второго уровня для 3-х расчётных случаев (1 вариант представления модели). Источник: [разработано автором]

**Во втором варианте** представления модели структуры системы распределения ресурсов ГПТ реализуется принцип формирования матрицы ЛО второго уровня в виде набора подмножеств ИС полного информационного пространства решений (рисунок 3.11 на примере 3-х видов транспорта),

полученного в результате расчёта ЛО 1-го уровня. Но при этом структура ЛО 2-го (последующего) уровня, определяется как результат поиска оптимальных (максимальных значений) решений из условия:

$$\mathcal{E}_{ij=\max, j_s=1 \dots n!} \quad (3.5)$$

Тогда поле распределений ИС второго уровня для 3-х расчётных случаев (2 вариант представления модели) можно представить в следующем виде (рисунок 3.11)

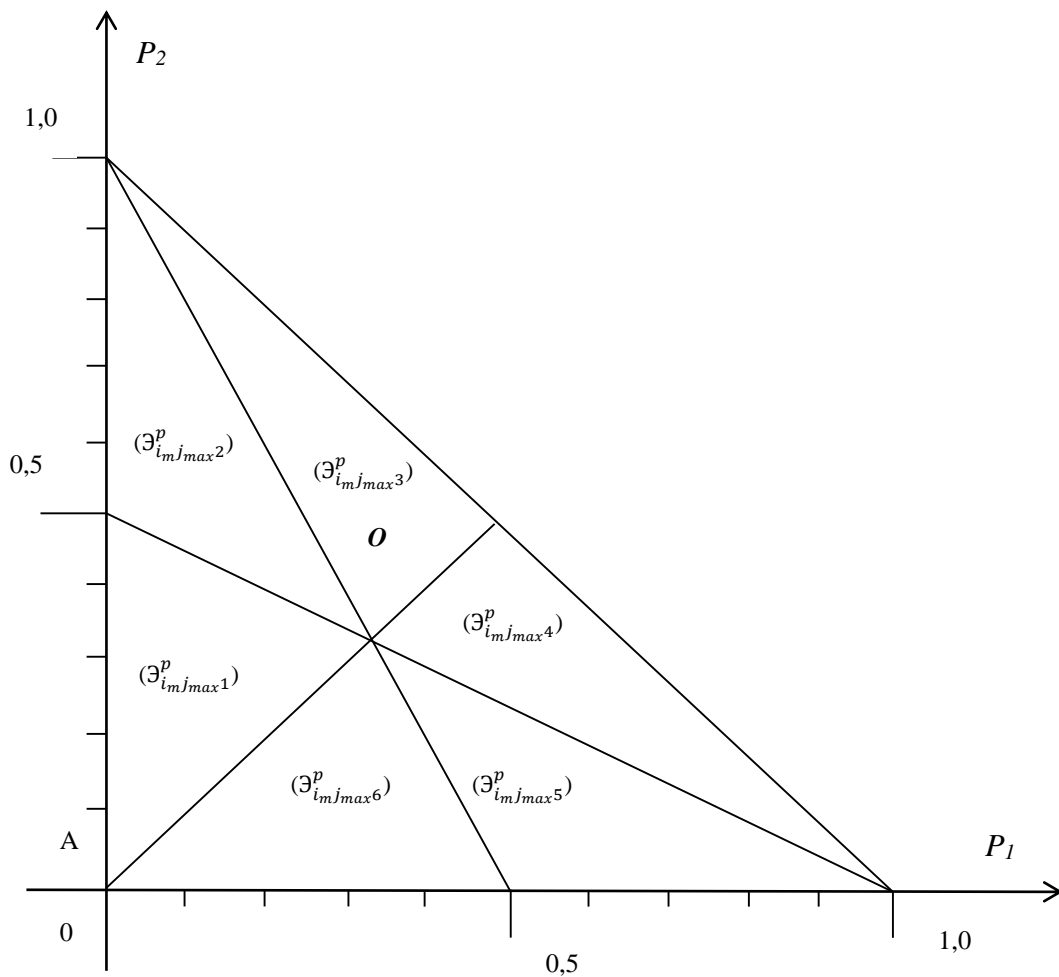


Рисунок 3.11 – Поле распределений ИС второго уровня для 3-х расчётных случаев (2-ой вариант представления модели). Источник: [разработано автором]

Поясним принципиальные отличия данного подхода. В таблице 3.8 изменятся структура расчётных случаев, их количество определяется количеством областей распределения возможных решений на ряде взаимоисключающих предпочтений  $m_n$  (2-го уровня) =  $n$  (1-го уровня). На физическом уровне

представления системы – это (если принимать во внимание единство структуры входных данных) количественная оценка эффективности функционирования отдельного субъекта управления на отдельном виде транспорта, то есть, некоей совокупности АТП, объединённых по технологическому признаку (трамвай, троллейбус, автобус, метрополитен и т.д.).

Таблица 3.8 – Логическая матрица решения 2-го эшелона для 2-го варианта представления модели структуры исследуемой системы

$R_2$		Множество ИС, соответствующих отдельным ЛО (стратам) 1-го уровня					$\mathcal{E}_i^p$ - эффективность по Байесу
		$ИС_1^{1r}$	...	$ИС_2^{sr}$	...	$ИС_{n=k_1}^{kp}$	
Ф – различные АТП, выполняющие перевозки одним видом транспорта	$\varphi_{c1}$	$\mathcal{E}_{1max}^{11}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{sr}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{kp}$	$\mathcal{E}_{c1}^r = \sum_{s=1}^k P_j \mathcal{E}_{1max}^{s1}$
	$\varphi_{c2}$	$\mathcal{E}_{2max}^{11}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{sr}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{kp}$	$\mathcal{E}_{c1}^r = \sum_{s=1}^k P_j \mathcal{E}_{2max}^{s1}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$\varphi_{cm_n}$	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{11}$	...	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{sr}$	...	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{kp}$	$\mathcal{E}_{c1}^r = \sum_{s=1}^k P_j \mathcal{E}_{m_nmax}^{s1}$

Важно понимать, что в данном случае на 2-ом эшелоне системы мы исследуем не отдельное АТП по характеру его показателей, а некую общность АТП по следующим показателям:  $f_{ij}^{sr}$  – оценочный функционал АТП, оказывающих транспортные услуги на  $i$ -ом вида транспорта ( $i = 1 \dots m$ ) для  $j$ -го информационного состояния, тождественному измерителю соответствующему ( $j = 1 \dots n$ )  $s$ -му логического оператору ( $s = 1 \dots k$ ) первого уровня в  $r$ -ом «районе» или подсистеме транспортного производства ( $r = 1 \dots p$ ).

Тогда на третьем иерархическом уровне выполняется задача оптимизации в модели структуры системы, направленная на управление совокупностью АТП,

выполняющих перевозки отдельными видами транспорта (таблица 3.9) и рисунок 3.12.

Таблица 3.9 – ЛО на 3-ем управляющем уровне в системе распределения ресурсов

ЛО ( $R_3, s=1, r=1$ )							
$R_3$	$ИС_1^{11}$	$ИС_2^{11}$	...	$ИС_j^{s1}$	...	$ИС_{n=k_p}^{kp}$	$\mathcal{E}_m^r$
$\varphi_1$	$\mathcal{E}_{1max}^{11}$	$\mathcal{E}_{1max}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{k1}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{k_p}$	$\mathcal{E}_1^{r1}$
$\varphi_2$	$\mathcal{E}_{2max}^{11}$	$\mathcal{E}_{2max}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{k1}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{k_p}$	$\mathcal{E}_2^{r1}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$\varphi_{m_n}$	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{11}$	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{kp}$	...	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{kp}$	$\mathcal{E}_{m_n}^{r1}$

**Высший управляющий уровень в системе распределения ресурсов пассажирского транспорта (таблица 3.9)**

Второй управляющий уровень в системе распределения ресурсов пассажирского транспорта

ЛО (R2, s=1, r=1)					
2	$ИС_1^{11}$	$ИС_2^{11}$	...	$ИС_{n=k_1}^{11}$	$\mathcal{E}_m^{sr}$
$\varphi_1$	$\mathcal{E}_{1max}^{11}$	$\mathcal{E}_{1max}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{k1}$	$\mathcal{E}_1^{11}$
$\varphi_2$	$\mathcal{E}_{2max}^{11}$	$\mathcal{E}_{2max}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{k1}$	$\mathcal{E}_2^{11}$
...	...	...	...	...	...
$\varphi_{m_n}$	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{11}$	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{k1}$	$\mathcal{E}_{m_n}^{11}$
...					
ЛО (R2, s=2, r=2)					
2	$ИС_1^{21}$	$ИС_2^{21}$	...	$ИС_{n=k_2}^{21}$	$\mathcal{E}_m^{sr}$
$\varphi_1$	$\mathcal{E}_{1max}^{12}$	$\mathcal{E}_{1max}^{22}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{k2}$	$\mathcal{E}_1^{21}$
$\varphi_2$	$\mathcal{E}_{2max}^{12}$	$\mathcal{E}_{2max}^{22}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{k2}$	$\mathcal{E}_2^{21}$
...	...	...	...	...	...
$\varphi_{m_n}$	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{12}$	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{22}$	...	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{k2}$	$\mathcal{E}_{m_n}^{21}$
...					
ЛО (s=k, r=p)					
2	$ИС_1^{k1}$	$ИС_2^{k1}$	...	$ИС_{n=k_p}^{k1}$	$\mathcal{E}_m^{sr}$
$\varphi_1$	$\mathcal{E}_{1max}^{kp}$	$\mathcal{E}_{1max}^{kp}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{kp}$	$\mathcal{E}_1^{k1}$
$\varphi_2$	$\mathcal{E}_{2max}^{kp}$	$\mathcal{E}_{2max}^{kp}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{kp}$	$\mathcal{E}_2^{k1}$
...	...	...	...	...	...
$\varphi_{m_n}$	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{kp}$	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{kp}$	...	$\mathcal{E}_{m_nmax}^{kp}$	$\mathcal{E}_{m_n}^{k1}$

Первый управляемый уровень в системе распределения ресурсов пассажирского транспорта

Рисунок 3.12 – Структура второго управляющего уровня во 2-ой модели представления структуры распределения ресурсов. Источник: [разработано автором]

### **3.4 Разработка модели структуры системы распределения ресурсов, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей**

Анализ значительного количества научных публикаций, в которых исследуются закономерности развития транспортных систем городского пассажирского транспорта общего пользования в мегаполисах и крупных городах, показывает, что в последние десятилетия и особенно в последние годы актуализировалась проблема эффективности взаимодействия различных видов транспорта. В научных исследованиях и практико-ориентированных публикациях декларируется необходимость интеграции различных видов транспорта общего пользования в крупных городах в единую транспортную систему, то есть в систему с едиными показателями использования и результативными показателями эффективности [135, 136, 137, 138, 139, 140]. Такая интеграция предполагает переход от раздельного управления отдельными видами транспорта к комплексному управлению всей транспортной системой как единым целым с учётом синергетических эффектов от координации их функционирования [25].

Сложность решения данной задачи, относящейся к задачам управления сложными организационно-техническими системами, заключается в том, что различные виды транспорта находятся в различном отраслевом или административном подчинении. Автобусные перевозки могут осуществляться как муниципальными предприятиями, так и частными перевозчиками, трамвайное и троллейбусное хозяйство традиционно находится в ведении муниципальных унитарных предприятий, метрополитен представляет собой самостоятельное крупное предприятие с особым статусом. Такая организационная разобщённость создаёт объективные препятствия для координации деятельности различных видов транспорта и требует разработки специальных механизмов межведомственного взаимодействия.

Поэтому не только на уровне управления, но и на технологическом уровне формирования структуры показателей возникают сложности из-за

несопоставимости измерителей, оценивающих одни и те же физические процессы. Различные виды транспорта используют различные системы учёта и отчетности, различные методики расчёта показателей эффективности, различные критерии оценки качества обслуживания пассажиров. Например, показатели использования подвижного состава на автобусном транспорте рассчитываются иначе, чем на рельсовых видах транспорта, что затрудняет сравнительный анализ их эффективности. Показатели себестоимости перевозок формируются по различным методикам с включением различного набора статей затрат, что делает невозможным прямое сопоставление экономической эффективности различных видов транспорта [26].

Функционально-сетевой принцип представления показателей ориентирован на преодоление указанных проблем путем построения модели структуры системы распределения ресурсов, основанной на функциональном представлении транспортной системы как совокупности взаимодействующих сетевых структур. Под сетевой структурой в данном контексте понимается маршрутная сеть определённого вида транспорта или группы перевозчиков, обслуживающая определённую территорию и обеспечивающая реализацию определённой совокупности транспортных связей между пунктами отправления и назначения пассажиров. Функциональное представление предполагает описание транспортной системы не через технологические характеристики отдельных видов транспорта, а через выполняемые ими функции по обеспечению транспортной доступности территории и удовлетворению транспортных потребностей населения.

Ключевой идеей функционально- сетевого принципа является признание того факта, что с точки зрения пассажира не имеет принципиального значения, каким конкретно видом транспорта осуществляется его перевозка, если обеспечиваются требуемые параметры качества обслуживания. Пассажир оценивает транспортную систему по совокупности характеристик поездки, включающих общее время передвижения от места отправления до места назначения, затраты на проезд, комфортность поездки, надёжность соблюдения расписания и другие параметры, определяющие потребительскую ценность транспортной услуги. С этой точки

зрения различные виды транспорта выступают как альтернативные способы реализации единой функции по обеспечению мобильности населения и должны рассматриваться не изолированно, а как элементы единой системы.

Рисунок 3.13 демонстрирует общую схему распределения компетенций в интеллектуальной транспортной системе, отражающую многоуровневый характер функций управления и необходимость координации деятельности различных участников транспортного процесса.

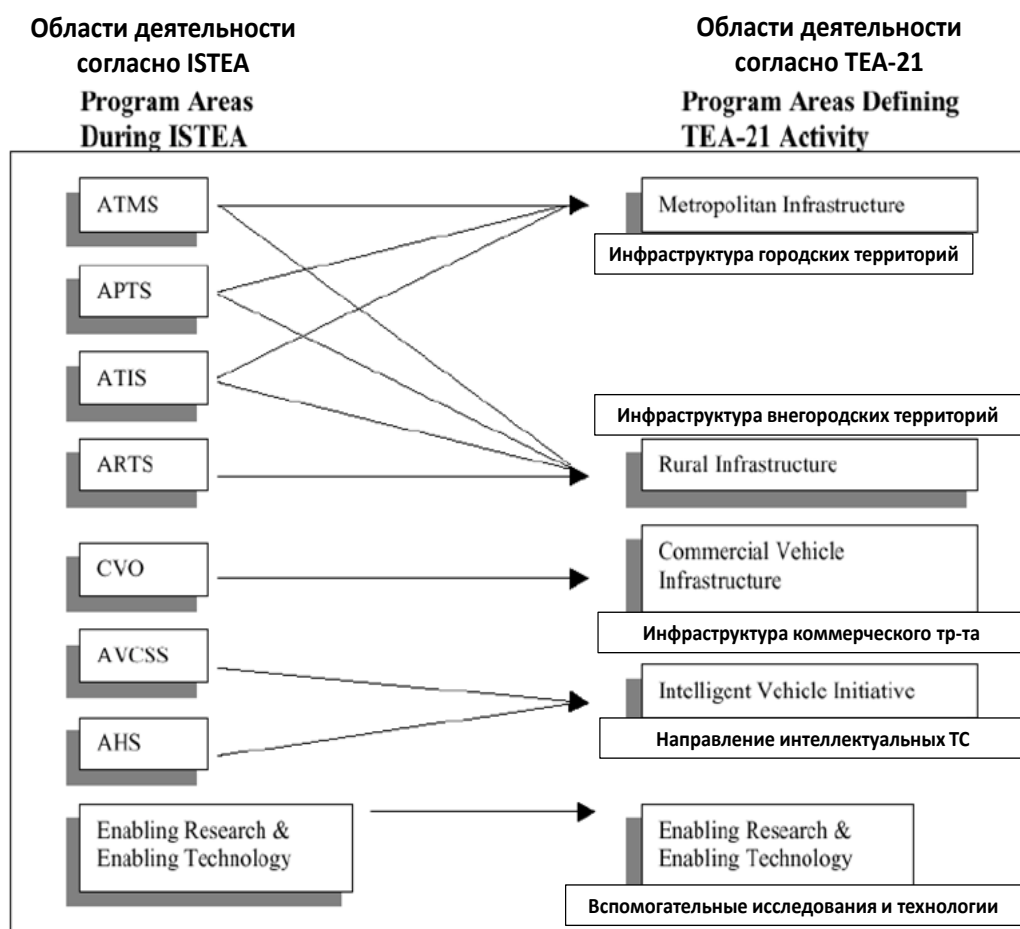


Рисунок 3.13 – Общая схему распределения компетенций ИТС. Источник: [141]

На рисунке 3.14 продемонстрирована концепция пространственного распределения функциональных плоскостей взаимодействия в системе управления городским пассажирским транспортом, согласно которой взаимодействие между различными видами транспорта и перевозчиками осуществляется в нескольких функциональных плоскостях. Горизонтальная плоскость отражает взаимодействие элементов одного уровня иерархии, например координацию расписаний движения

различных видов транспорта для обеспечения удобства пересадок. Вертикальная плоскость представляет иерархические связи между уровнями управления от стратегического до оперативного [27]. Данная концепция является важным элементом функционально-сетевго принципа.

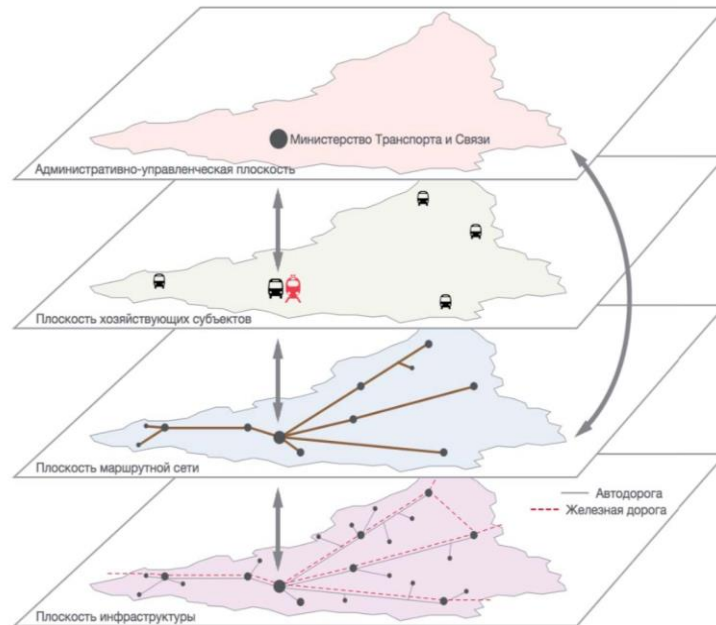


Рисунок 3.14 – Пространственное распределение функциональных плоскостей взаимодействия в системе управления ГПТ. Источник: [142, 143]

Обратимся к понятию элементарной вертикальной трубки взаимодействия пассажирских перевозчиков. На рисунке 3.15 представлена структура вертикальной трубки взаимодействия пассажирских перевозчиков для первой маршрутной сети, включающей совокупность маршрутов определенного вида транспорта или группы перевозчиков, обслуживающих определенную территорию. Эта трубка представляет собой описание информационных и управленческих связей между различными уровнями управления маршрутной сетью, включая потоки данных о фактических показателях работы, потоки управляющих воздействий и механизмы обратной связи для корректировки решений.

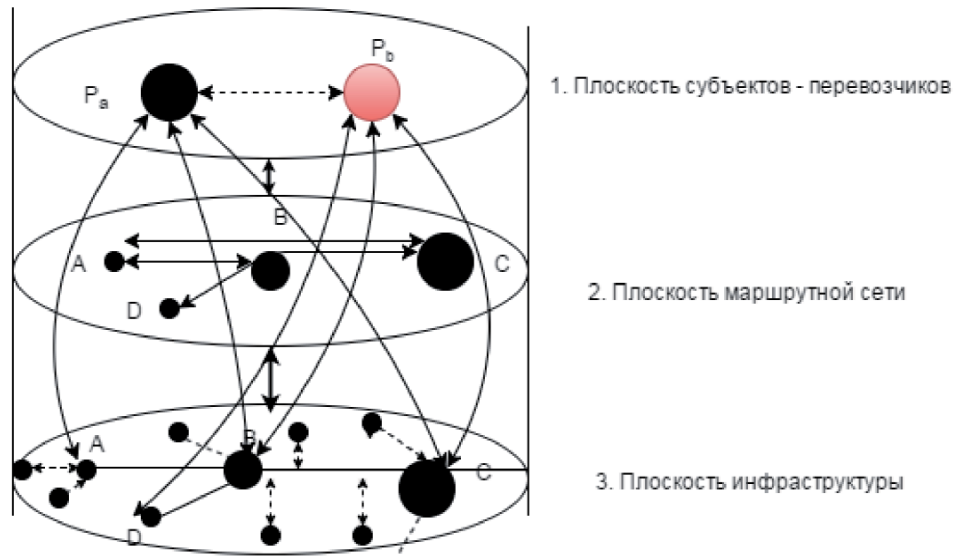


Рисунок 3.15 – Элементарная вертикальная трубка взаимодействия пассажирских перевозчиков (маршрутная сеть №1). Источник: [142, 143]

Рисунок 3.16 показывает аналогичную структуру элементарной вертикальной трубки взаимодействия для второй маршрутной сети, которая может представлять другой вид транспорта или другую группу перевозчиков. Наличие множества таких вертикальных трубок, соответствующих различным маршрутным сетям, создаёт основу для построения комплексной модели системы управления городским пассажирским транспортом, учитывающей как внутреннюю структуру управления каждой маршрутной сетью, так и взаимодействие между различными сетями в рамках единой транспортной системы города [144].

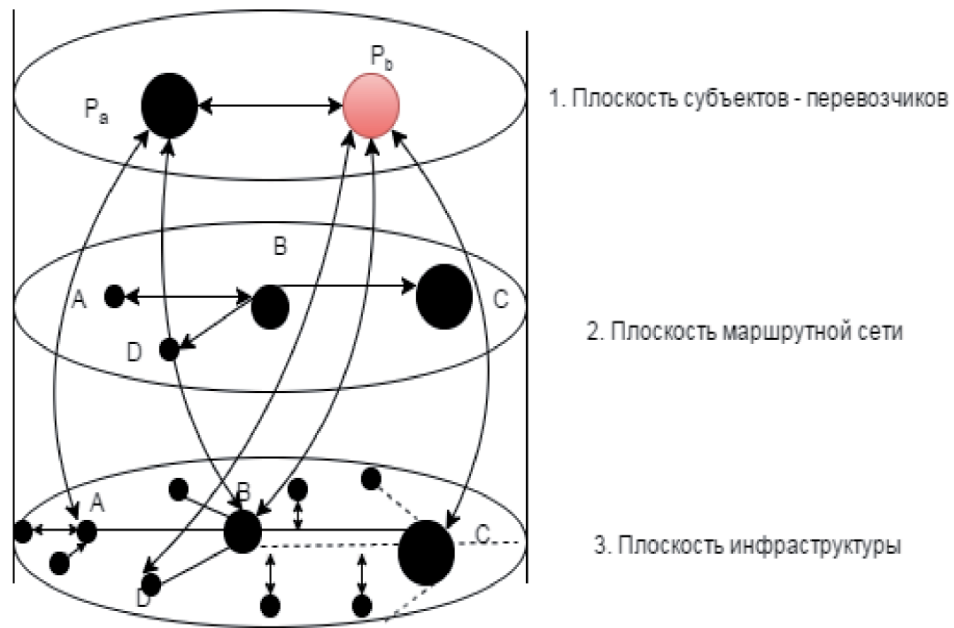


Рисунок 3.16 – Элементарная вертикальная трубка взаимодействия пассажирских перевозчиков (маршрутная сеть №2). Источник: [143]

Принципиальное отличие функционально- сетевого представления от рассмотренных ранее технологического и территориального принципов заключается в способе агрегирования показателей при переходе от нижних уровней иерархии к верхним. В технологическом представлении агрегирование осуществляется по видам транспорта с сохранением их технологической специфики на всех уровнях. В территориальном представлении агрегирование производится по районам обслуживания с выделением территориальных подсистем. В функционально-сетевом представлении агрегирование основывается на выделении функциональных подсистем, каждая из которых обеспечивает реализацию определённой совокупности транспортных связей независимо от конкретных видов транспорта, используемых для этой цели [145].

На первом иерархическом уровне в рамках функционально- сетевого принципа оценочный функционал отдельного вида транспорта определяется для каждого критерия, тождественного измерителю, соответствующему логическому оператору первого уровня в определённой подсистеме транспортного

производства. Формально это может быть записано следующим образом: оценочный функционал характеризует эффективность функционирования конкретного вида транспорта по конкретному функциональному критерию в конкретной территориальной зоне при конкретном информационном состоянии системы. Такая многомерная структура показателей позволяет детально описать все аспекты функционирования транспортной системы и создать основу для комплексной оптимизации распределения ресурсов.

Функциональные критерии, используемые для оценки эффективности на первом уровне, отражают различные аспекты качества транспортного обслуживания населения. К таким критериям относятся показатели транспортной доступности, характеризующие возможность достижения различных пунктов назначения в приемлемое время, показатели регулярности движения, определяющие надёжность соблюдения расписаний, показатели комфортности поездок, включающие уровень наполнения салонов и техническое состояние подвижного состава, показатели безопасности перевозок, отражающие риск возникновения дорожно-транспортных происшествий и других инцидентов. Комплексный учёт всех этих критериев обеспечивает объективную оценку качества функционирования транспортной системы с позиций потребителей транспортных услуг.

На втором иерархическом уровне оценочный функционал формируется для совокупности видов транспорта, функционирующих в определенной подсистеме при определенном информационном состоянии. Агрегирование показателей отдельных видов транспорта в интегральный показатель эффективности функциональной подсистемы осуществляется с учётом взаимодополняемости различных видов транспорта и синергетических эффектов от их координированного функционирования. Например, при наличии в подсистеме как скоростного рельсового транспорта, обеспечивающего магистральные перевозки, так и автобусного транспорта, осуществляющего подвозку пассажиров к станциям рельсового транспорта, интегральный показатель эффективности должен учитывать не просто сумму показателей отдельных видов транспорта, а качество

их взаимодействия и степень реализации потенциала мультимодальных перевозок [28].

Таблица 3.10 представляет логическую матрицу решения второго эшелона для третьего варианта представления модели структуры исследуемой системы по функционально-сетевому принципу. Данная матрица отражает структуру задачи выбора оптимальной конфигурации функциональных подсистем с учётом возможных информационных состояний и альтернативных вариантов организации взаимодействия между видами транспорта. Строки матрицы соответствуют различным вариантам структуры функциональных подсистем, отличающимся составом включенных в них видов транспорта и характером распределения функций между ними. Столбцы представляют возможные информационные состояния, определяемые параметрами транспортного спроса и условиями функционирования системы.

Эффективность структур управления совокупным потенциалом различных видов транспорта в рамках функционально- сетевого принципа определяется показателями трех уровней иерархии. На первом уровне показатели характеризуют эффективность отдельных видов транспорта по отдельным функциональным критериям в отдельных территориальных подсистемах. На втором уровне показатели отражают эффективность функциональных подсистем в целом с учётом взаимодействия входящих в них видов транспорта. На третьем уровне показатели представляют интегральную эффективность всей транспортной системы города при различных вариантах распределения ресурсов между функциональными подсистемами и видами транспорта.

На третьем иерархическом уровне модели распределения ресурсов по функционально-сетевому принципу выполняется задача оптимизации, направленная на определение комплексного оценочного функционала для совокупности видов транспорта, осуществляющих перевозки в установленных исследованием границах.

Таблица 3.10 – Логическая матрица решения 2-го эшелона для 3-го варианта представления модели структуры исследуемой системы по функционально-сетевому принципу

$R_2$		множество ИС, соответствующих отдельным ЛО (стратам) 2-го уровня					$\mathcal{E}_i^p$ - эффективность по Байесу
		$ИС_1^{1r}$	...	$ИС_2^{sr}$	...	$ИС_{n=k_1}^{kp}$	
Ф – различные структуры, курирующие перевозки несколькими видами транспорта	$\varphi_{c1}$	$\sum_{j=1}^{m_n} \mathcal{E}_{11j}^{sr}$	...	$\sum_{j=1}^{m_n} \mathcal{E}_{1k_j}^{2r}$	...	$\sum_{j=1}^{m_n} \mathcal{E}_{1k_j}^{kr}$	$\mathcal{E}_{c1}^r$ $= \sum_{s=1}^k P_j \mathcal{E}_{1k_j}^{s1}$
	$\varphi_{c2}$	$\sum_{j=1}^{m_n} \mathcal{E}_{21j}^{sr}$	...	$\sum_{j=1}^{m_n} \mathcal{E}_{2k_j}^{2r}$	...	$\sum_{j=1}^{m_n} \mathcal{E}_{2k_j}^{kr}$	$\mathcal{E}_{c1}^r$ $= \sum_{s=1}^k P_j \mathcal{E}_{2k_j}^{s1}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$\varphi_{cm_n}$	$\sum_{j=1}^{m_n} \mathcal{E}_{n1j}^{sr}$	...	$\sum_{j=1}^{m_n} \mathcal{E}_{nk_j}^{2r}$	...	$\sum_{j=1}^{m_n} \mathcal{E}_{nk_j}^{kr}$	$\mathcal{E}_{c1}^r$ $= \sum_{s=1}^k P_j \mathcal{E}_{nk_j}^{s1}$
целеполагание		min/max	...	min/max	...	min/max	

Таблица 3.11 демонстрирует структуру логического оператора на третьем уровне в системе распределения ресурсов по функционально-сетевому принципу. Данный ЛО обобщает информацию со всех нижних уровней и обеспечивает принятие стратегических решений по развитию пассажирской транспортной системы города с учётом изменений транспортного спроса и технологических возможностей различных видов транспорта.

Важным преимуществом функционально- сетевого принципа представления показателей является возможность учёта эффектов от интеграции различных видов транспорта в единую мультимодальную систему. Традиционные подходы к управлению городским пассажирским транспортом ориентированы на

оптимизацию функционирования каждого вида транспорта в отдельности, что приводит к недоиспользованию потенциала их совместного функционирования. Пассажиры часто вынуждены совершать поездки с пересадками между различными видами транспорта, и качество таких мультимодальных поездок существенно зависит от степени координации работы различных видов транспорта [29].

Таблица 3.11 – ЛО на 3-ем управляющем уровне в системе распределения ресурсов по функционально-сетевому принципу

ЛО (R3, s=1, r=1)							
$R_3$	$ИС_1^{11}$	$ИС_2^{11}$	...	$ИС_j^{s1}$	...	$ИС_{n=k_p}^{kp}$	$\mathcal{E}_n^r$
$\varphi_1$	$\mathcal{E}_{1max}^{11}$	$\mathcal{E}_{1max}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{s1}$	...	$\mathcal{E}_{1max}^{kr}$	$\mathcal{E}_1^r$
$\varphi_2$	$\mathcal{E}_{2max}^{11}$	$\mathcal{E}_{2max}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{s1}$	...	$\mathcal{E}_{2max}^{kr}$	$\mathcal{E}_2^r$
...	...	...	...	...	...	...	...
$\varphi_{m_n}$	$\mathcal{E}_{nmax}^{11}$	$\mathcal{E}_{nmax}^{21}$	...	$\mathcal{E}_{nmax}^{sp}$	...	$\mathcal{E}_{nmax}^{kr}$	$\mathcal{E}_n^r$
Целеполагание	min/max	min/max	...	min/max	...	min/max	

Функционально-сетевое представление позволяет явным образом учесть качество пересадочных узлов, согласованность расписаний движения различных видов транспорта, интегрированность тарифной системы и другие факторы, определяющие удобство мультимодальных поездок. В модель могут быть включены показатели, характеризующие среднее время ожидания при пересадках, долю поездок, осуществляемых без пересадок, покрытие территории интегрированной маршрутной сетью различных видов транспорта. Оптимизация распределения ресурсов с учётом этих показателей позволяет повысить общую эффективность транспортной системы за счёт лучшей координации работы её элементов.

Другим важным аспектом функционально- сетевого принципа является учёт пространственной структуры транспортных связей и их эволюцию во времени.

Структура транспортного спроса в крупных городах характеризуется значительной неравномерностью как в пространственном, так и во временном аспектах. Имеются ярко выраженные центры генерации и притяжения пассажиропотоков, связанные с размещением мест приложения труда, объектов обслуживания, зон рекреации. Пассажиропотоки между различными парами пунктов существенно различаются по мощности, причём эти различия могут изменяться в зависимости от времени суток, дня недели, сезона года.

Функционально-сетевое представление позволяет структурировать транспортные связи по их характеристикам и сопоставить каждой группе связей наиболее эффективные виды транспорта и способы организации перевозок. Мощные стабильные пассажиропотоки между крупными центрами генерации целесообразно обслуживать высокопроизводительными видами транспорта большой вместимости, такими как метрополитен или скоростной трамвай. Умеренные пассажиропотоки с относительно равномерным распределением по территории могут эффективно обслуживаться традиционным автобусным или троллейбусным транспортом. Слабые нестабильные пассажиропотоки в периферийных зонах рационально обслуживать гибкими формами транспортного обслуживания с возможностью оперативной адаптации маршрутной сети к изменениям спроса [30].

Практическая реализация функционально- сетевого принципа требует создания информационной системы, обеспечивающей сбор и обработку данных о пассажиропотоках на всей территории города с достаточной степенью детализации. Традиционные методы обследования пассажиропотоков путём натуральных наблюдений и опросов являются трудоёмкими и не позволяют получить полную картину перемещений населения в режиме реального времени. Современные технологии автоматизированного сбора данных на основе систем автоматизированной оплаты проезда, систем мониторинга транспорта с использованием спутниковой навигации, анализа обезличенных данных операторов сотовой связи открывают новые возможности для получения детальной информации о транспортном поведении населения.

Использование больших данных о перемещениях населения позволяет выявить реальную структуру транспортных связей, идентифицировать основные корреспонденции пассажиропотоков, оценить долю мультимодальных поездок и характеристики пересадочных процессов. На основе этой информации может быть построена детальная матрица корреспонденций, отражающая объёмы перемещений между различными транспортными районами города в различные периоды времени. Такая матрица служит основой для формирования функциональных подсистем и оптимизации распределения ресурсов между видами транспорта с учётом реальной структуры транспортного спроса.

Важным элементом модели структуры системы распределения ресурсов по функционально-сетевому принципу является механизм адаптации конфигурации функциональных подсистем к изменениям условий функционирования транспортной системы. Структура транспортного спроса не является статичной и претерпевает изменения под влиянием градостроительных преобразований, изменений социально-экономической ситуации, развития новых форм занятости и образа жизни населения. Соответственно оптимальная конфигурация функциональных подсистем также должна эволюционировать для поддержания соответствия между предложением транспортных услуг и структурой спроса на них [31].

Механизм адаптации предполагает регулярный мониторинг показателей функционирования транспортной системы, выявление несоответствий между фактическими и плановыми значениями показателей, анализ причин этих несоответствий и разработку корректирующих мероприятий. В зависимости от характера и масштаба выявленных проблем корректирующие мероприятия могут включать оперативные изменения параметров функционирования существующих маршрутов, тактические решения по открытию новых маршрутов или закрытию неэффективных, стратегические решения по развитию инфраструктуры и модернизации подвижного состава.

Для обеспечения эффективной адаптации необходима разработка системы индикаторов, позволяющих своевременно выявлять потребность в изменениях

конфигурации функциональных подсистем. К таким индикаторам относятся показатели загрузки подвижного состава, отражающие соответствие провозных возможностей объёмам пассажиропотоков, показатели регулярности движения, характеризующие устойчивость работы маршрутной сети, показатели удовлетворённости пассажиров качеством обслуживания, получаемые путём опросов и анализа обращений. Систематический анализ динамики этих индикаторов позволяет выявить формирующиеся проблемы на ранней стадии и принять превентивные меры до того, как они приведут к существенному ухудшению качества транспортного обслуживания.

Сравнительный анализ трех рассмотренных принципов представления структуры системы распределения ресурсов показывает, что каждый из них обладает определёнными преимуществами и ограничениями, определяющими область его рационального применения. Технологический принцип наиболее адекватен для решения задач оптимизации использования ресурсов в рамках отдельных видов транспорта при заданной структуре маршрутной сети и известных характеристиках транспортного спроса. Территориальный принцип эффективен для задач распределения ресурсов между районами города с учётом территориальных различий в параметрах транспортного спроса и условиях эксплуатации транспорта.

Функционально-сетевой принцип ориентирован на решение задач комплексной оптимизации транспортной системы города с учётом взаимодействия различных видов транспорта и формирования интегрированной мультимодальной системы. Данный принцип наиболее соответствует современным тенденциям развития городского пассажирского транспорта, связанным с усилением интеграции различных видов транспорта, развитием цифровых технологий управления и возрастанием требований к качеству транспортного обслуживания. Вместе с тем практическая реализация функционально- сетевого принципа требует наличия развитой информационной инфраструктуры и высокого уровня координации между различными участниками транспортного процесса, что может представлять значительные организационные и технические сложности.

Подводя итоги моделирования структуры системы распределения ресурсов при управлении городским пассажирским транспортом, можно сделать следующие выводы. Определено, что представление системы в любом случае основано на принципе формирования для отдельных блоков морфологических матриц выбора сценариев распределения ресурсов. Такие матрицы обеспечивают систематизацию информации о возможных вариантах решений и условиях их реализации, создавая формальную основу для применения математических методов оптимизации. Сформированы три возможных модели представления структуры исследуемой системы управления, каждая из которых базируется на определенном принципе агрегирования показателей и учитывает специфические аспекты функционирования транспортной системы.

Установлена необходимость разработки модели расчёта весовых коэффициентов, позволяющей получать отклик на всем возможном пространстве предполагаемых решений. Такая модель должна обеспечить возможность учёта неопределённости относительно будущих условий функционирования системы и выбора робастных решений, сохраняющих эффективность при различных реализациях неопределённых параметров. Рисунок 3.17 представляет обобщённую схему структуры системы распределения ресурсов городского пассажирского транспорта, интегрирующую элементы всех трёх рассмотренных принципов представления и демонстрирующую их взаимосвязи в рамках единой методологии управления транспортной системой.



Рисунок 3.17 – Схема структуры системы распределения ресурсов ГПТ

### Выводы по третьей главе

В третьей главе диссертационного исследования разработана концепция структурной систематизации системы распределения ресурсов городского пассажирского транспорта общего пользования как совокупности альтернативных моделей представления структуры в сложных многоуровневых системах управления. Представление системы является определяющим этапом объективного описания системы, облегчающим формулировку и решение задач её расчёта, анализа и синтеза. Разработаны три варианта модели представления исследуемой системы распределения ресурсов, построенные на едином принципе формирования для отдельных структурных блоков морфологических матриц выбора сценариев с учётом показателя эффективности или оценочного функционала.

Первый вариант представляет собой модель структуры системы распределения ресурсов в транспортном комплексе, основанную на технологическом принципе представления показателей. Сущность данного подхода заключается в том, что логический оператор последующего второго иерархического уровня формируется из наилучших показателей эффективности логических операторов первого уровня. Применение технологического принципа позволяет проследить эффективность каждого вида транспорта при переходе от уровня к уровню иерархии управления, что обеспечивает возможность исследования и сравнительного анализа эффективности транспортной системы и отдельных видов транспорта при любом масштабировании системы.

Технологический принцип обеспечивает возможность сопоставления качества реализации функциональных задач для территориальных образований различного масштаба, включая отдельные районы крупных городов, области и регионы. Благодаря данному принципу, становится возможным исследование состояния эффективности отдельных пассажирских транспортных систем, состоящих из совокупности различных видов транспорта.

Использование данной модели позволяет определить эффективное сочетание различных видов транспорта или инфраструктурных объектов с целью

оптимального распределения ресурсов. Модель адекватно отражает представление исследуемой системы при прямом управленческом воздействии на отдельные транспортные системы различной территориальной локации, проявляет наибольшую эффективность в условиях устойчивых транспортных систем и при сформированных однородных по организационным принципам структурах управления.

Вместе с тем практика исследования открытых транспортных систем показывает, что совокупная оценка эффективности отдельных расчётных случаев не всегда тождественна значению эффективности системы в целом, если учитывать принципы управления и структуру субъектности, на которых организована система. Это ограничение технологического принципа обуславливает необходимость разработки альтернативных моделей представления структуры системы, учитывающих организационные и функциональные аспекты управления.

Второй вариант представляет собой модель структуры системы распределения ресурсов, основанную на организационно-технологическом принципе представления показателей на различных иерархических уровнях. В данном варианте реализуется принцип формирования матрицы логического оператора второго уровня в виде набора подмножеств информационных состояний полного информационного пространства решений, полученного в результате расчёта логических операторов первого уровня. Принципиальным отличием организационно-технологического принципа от технологического является учёт реальной организационной структуры управления транспортным комплексом.

При использовании организационно-технологического принципа базовое пространство решений формируется на первом уровне путём исследования структуры технико-эксплуатационных и экономических показателей, аналогично технологическому принципу. Границы исследуемой системы и входные параметры остаются неизменными, однако происходит трансформация моделей расчёта, заключающаяся в приближении абстрактной структуры системы распределения к реальной физической системе финансирования транспортного комплекса общественного транспорта, сложившейся на практике. На физическом уровне

представления это соответствует количественной оценке эффективности функционирования отдельного субъекта управления на отдельном виде транспорта, представляющего собой совокупность автотранспортных предприятий, объединенных по технологическому признаку.

Организационно-технологический принцип позволяет учесть специфику существующей системы организации и финансирования транспортного комплекса, когда различные виды транспорта находятся в ведении различных организационных структур с различными механизмами финансирования и различными критериями оценки эффективности. Такой подход обеспечивает большую реалистичность модели и повышает практическую применимость результатов оптимизации распределения ресурсов, поскольку рекомендации формируются с учётом реальных организационных возможностей и ограничений существующей системы управления.

Третий вариант представляет собой модель структуры системы распределения ресурсов, основанную на функционально-сетевом принципе представления показателей. Принципиальной основой данной модели является исследование полной совокупности взаимоисключающих информационных состояний в пределах одного логического оператора, сформированной с учётом многомерного целеполагания. Отличительной особенностью третьего варианта модели является изменение параметров системы уравнений, определяющих условия решения задачи на втором и последующих уровнях, соответствующих коэффициенту относительной важности при отдельном показателе эффективности для каждого информационного состояния как совокупности различных видов транспорта в элементарном логическом операторе.

На физическом уровне представления системы распределения ресурсов функционально-сетевой принцип соответствует количественной оценке эффективности функционирования отдельного субъекта управления совокупностью видов транспорта, представляющего собой структуру управления результативными показателями нескольких видов транспорта одновременно. В качестве таких структур управления целесообразно рассматривать организации,

курирующие формирование информационно-аналитических платформ интеллектуальных транспортных систем, которые обеспечивают координацию функционирования различных видов транспорта и интеграцию их в единую мультимодальную систему.

Функционально-сетевой принцип в наибольшей степени соответствует современным тенденциям развития городских транспортных систем, связанным с формированием интегрированных транспортных комплексов, обеспечивающих бесшовную мобильность населения за счёт координации работы различных видов транспорта. Данный принцип позволяет учесть синергетические эффекты от совместного функционирования различных видов транспорта и оптимизировать структуру распределения ресурсов с позиций эффективности транспортной системы города в целом, а не отдельных её элементов.

Сравнительный анализ разработанных моделей показывает, что каждая из них обладает специфическими преимуществами и областью рационального применения. Технологический принцип наиболее эффективен для решения задач оптимизации использования ресурсов в рамках отдельных видов транспорта при сложившейся структуре управления. Организационно-технологический принцип обеспечивает учёт реальной организационной структуры и механизмов финансирования, что повышает практическую применимость результатов оптимизации. Функционально-сетевой принцип ориентирован на комплексную оптимизацию транспортной системы с учётом взаимодействия различных видов транспорта и формирования интегрированной системы обслуживания населения.

Общим для всех трёх разработанных моделей является использование морфологических матриц выбора сценариев как инструмента систематизации информации о возможных вариантах решений и условиях их реализации. Такой подход обеспечивает единство методологической основы при различии конкретных принципов представления структуры системы и создаёт возможность для сопоставления результатов оптимизации, полученных на основе различных моделей. Разработанные модели образуют методологический инструментарий, позволяющий адаптировать процедуры оптимизации распределения ресурсов к

специфике конкретных практических ситуаций путём выбора наиболее адекватного принципа представления структуры системы.

Результаты третьей главы создают концептуальную основу для практической реализации методологии распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах в условиях неопределённости. Разработанные модели структуры системы обеспечивают возможность формализованного описания процессов принятия решений на различных уровнях иерархии управления и создают предпосылки для разработки конкретных алгоритмов оптимизации и процедур выбора эффективных стратегий распределения ресурсов с учётом множественности возможных сценариев развития внешней среды.

#### 4. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ РР-СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

##### **4.1 Обоснование метода решения многокритериальных оптимизационных задач в условиях неопределенности в целях исследования**

Распределение ресурсов в пассажирских транспортных системах представляет собой сложную многокритериальную задачу, решение которой осложняется наличием множественных факторов неопределённости. Эти факторы проявляются в изменчивости пассажиропотоков, непредсказуемости внешних условий эксплуатации, вариативности технического состояния транспортных средств и инфраструктуры, а также в динамике социально-экономических процессов, влияющих на транспортный спрос. В связи с этим обоснование метода решения подобных задач требует комплексного анализа существующих подходов и выявления их применимости к специфике городского пассажирского транспорта общего пользования.

Традиционные методы оптимизации, основанные на классических математических подходах, как правило, предполагают полноту и точность исходных данных, что в реальных условиях функционирования транспортных систем достижимо лишь условно. Детерминированные модели, широко применяемые в инженерной практике, не учитывают стохастическую природу транспортных процессов и могут приводить к решениям, оптимальным лишь при строго определённых условиях. Однако реальная эксплуатация пассажирских транспортных систем характеризуется постоянной изменчивостью параметров, что делает необходимым применение методов, способных работать в условиях неполной информации и неопределённости.

Развитие теории принятия решений привело к формированию целого класса методов, ориентированных на работу в условиях многокритериальности и неопределённости. Среди них особое место занимают методы, основанные на экспертных оценках и структурировании предпочтений лица, принимающего

решение. Такие подходы позволяют формализовать субъективные суждения о важности различных критериев и преобразовать их в количественные оценки, пригодные для математического анализа. Это особенно важно при решении задач распределения ресурсов, где необходимо учитывать не только технические и экономические показатели, но и социальные, экологические, градостроительные аспекты функционирования транспортных систем.

Развитием методов в направлении повышения объективности принимаемых решений стала разработка методов, основанных на назначении различного вида предпочтений посредством парных сравнений или комплексных оценок. Моделирование исследуемых процессов с помощью подхода, основанного на принципе бинарных отношений, нашло широкое применение в разработке методов решения многокритериальных задач [23]. В частности, на основе принципа бинарных отношений сформулирован метод анализа иерархий, применимый для решения задач, связанных с необходимостью поиска оптимальных процедур распределения ресурсов в многоуровневых системах [18]. Данный метод позволяет декомпозировать сложную задачу на иерархию более простых подзадач, каждая из которых может быть проанализирована отдельно с последующей агрегацией результатов.

Важным аспектом применения метода анализа иерархий является оценка согласованности суждений эксперта. Для этого используется специальный показатель согласованности, позволяющий выявить внутренние противоречия в системе предпочтений. При недопустимо высоком уровне несогласованности требуется пересмотр и корректировка парных сравнений, что обеспечивает повышение надёжности получаемых результатов и снижает влияние случайных ошибок в экспертных оценках.

Однако основным недостатком или характерной особенностью алгоритма бинарных отношений является допущение о том, что результат сопоставления по предпочтению двух объектов не зависит от состава всего множества выбора. Для ресурсораспределяющих систем городского пассажирского транспорта общего пользования наличие такого допущения является критическим. Это связано с тем,

что в реальных условиях функционирования транспортных систем изменение состава рассматриваемых альтернатив может существенно влиять на оценку предпочтительности каждой из них. Например, при добавлении в рассмотрение нового вида транспорта или нового маршрута относительная привлекательность уже существующих вариантов может измениться не только за счёт прямого сравнения с новым вариантом, но и за счёт перераспределения пассажиропотоков, изменения загрузки инфраструктуры и других системных эффектов.

Для иллюстрации данного утверждения целесообразно рассмотреть один из показателей первого уровня исследуемой системы на примере дифференцированного распределения по стратам технических показателей эксплуатации транспортного комплекса. Анализ данных, представленных в таблице (страта, содержащая данные по объёмным техническим показателям эксплуатации маршрутной сети), позволяет увидеть существенную неоднородность системы городского пассажирского транспорта. Различные виды транспорта характеризуются принципиально разными масштабами функционирования: протяжённость сети варьируется от нескольких километров для троллейбуса до тысяч километров для автобусной сети, количество маршрутов различается на порядки, численность подвижного состава также распределена крайне неравномерно.

Аналогичная картина наблюдается при анализе показателей инфраструктуры обслуживания подвижного состава, представленных в соответствующей таблице. Количество объектов для хранения, маршрутных объектов и объектов технического обслуживания и ремонта существенно различается для разных видов транспорта. Эти различия отражают не только исторически сложившуюся структуру транспортной системы, но и объективные различия в технологии эксплуатации различных видов транспорта, их роли в обслуживании пассажиропотоков и специфике взаимодействия с городской инфраструктурой.

При использовании метода парных сравнений для оценки предпочтительности различных вариантов распределения ресурсов между видами транспорта возникает проблема контекстной зависимости оценок. Если мы

сравниваем, например, автобус и трамвай, эксперт формирует своё суждение исходя из конкретных характеристик этих видов транспорта, но если в рассмотрение добавляется метрополитен, имеющий существенно иные масштабы функционирования, первоначальная оценка предпочтительности трамвая относительно автобуса может потерять свою актуальность [30].

Городская пассажирская транспортная система представляет собой сложную сеть взаимосвязанных компонентов и решения о распределении ресурсов в пользу одного вида транспорта неизбежно влияют на условия функционирования других видов. Таким образом, предпочтительность распределения ресурсов между видами городского транспорта зависит от множества рассматриваемых вариантов и их взаимного влияния.

Кроме того, специфика задач распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах связана с необходимостью учёта множественных критериев часто находящихся в противоречии друг с другом, например, экономических с экологическими или социальных с техническими.

Неопределённость в задачах распределения ресурсов проявляется в нескольких формах. Параметрическая неопределённость связана с невозможностью точного определения значений многих параметров системы, таких как будущие объёмы пассажиропотоков, темпы роста подвижности населения, изменения в структуре городской застройки и расселения. Структурная неопределённость обусловлена недостаточным пониманием всех причинно-следственных связей в сложной транспортной системе и возможностью появления новых факторов влияния. Стратегическая неопределённость возникает вследствие неопределённости в действиях других участников транспортного рынка и изменений в государственной политике регулирования транспортной отрасли [146].

Для решения многокритериальных задач в условиях неопределённости разработаны различные подходы, каждый из которых имеет свои достоинства и ограничения. Методы теории полезности основаны на построении функции полезности, агрегирующей множественные критерии в единый показатель. Однако

построение адекватной функции полезности для сложных систем представляет собой нетривиальную задачу, требующую глубокого понимания предпочтений лица, принимающего решение, и их формализации в математическом виде. Методы достижения целей ориентированы на минимизацию отклонений от заданных целевых значений по различным критериям, но требуют априорного определения этих целевых значений, что не всегда возможно в условиях неопределённости.

Методы Парето-оптимизации позволяют выявить множество недоминируемых решений, не требуя полной информации о предпочтениях. Решение является Парето-оптимальным, если не существует другого решения, которое было бы лучше по всем критериям одновременно или лучше хотя бы по одному критерию при сохранении значений остальных критериев. Множество Парето-оптимальных решений образует границу эффективности, предоставляющую лицу, принимающему решение, набор альтернатив для окончательного выбора. Однако даже после выделения множества Парето-оптимальных решений остаётся задача выбора наилучшего варианта из этого множества, что возвращает к необходимости применения дополнительных методов структурирования предпочтений [147].

Альтернативный подход связан с использованием методов нечёткой логики и теории нечётких множеств, позволяющих формализовать качественные суждения и работать с неточными, неполными данными.

Стохастические методы оптимизации учитывают вероятностный характер неопределённости, представляя случайные параметры в виде случайных величин с известными распределениями вероятностей. Такой подход позволяет использовать богатый математический аппарат теории вероятностей и математической статистики для анализа и оптимизации систем, но применение стохастических методов требует наличия достаточного объёма статистических данных для оценки параметров распределений, что не всегда доступно на практике.

Для городских пассажирских транспортных систем характерна многоуровневая структура управления и распределения ресурсов. Решения принимаются на стратегическом уровне, определяющем долгосрочные

направления развития системы, на тактическом уровне, связанном с планированием на среднесрочную перспективу, и на оперативном уровне, обеспечивающем текущее функционирование системы. Каждый уровень характеризуется своим горизонтом планирования, степенью детализации принимаемых решений и типом учитываемой неопределённости. Это требует применения иерархических методов принятия решений, способных обеспечить согласованность решений на различных уровнях управления [46].

Интеграция различных методов в рамках единой методологии распределения ресурсов позволяет использовать преимущества каждого подхода и компенсировать их недостатки. Например, использование метода анализа иерархий для структурирования задачи и определения весовых коэффициентов критериев может быть дополнено применением методов нечёткой логики для учёта неопределённости в исходных данных и стохастической оптимизации для анализа устойчивости полученных решений к вариациям случайных параметров.

В таблицах 4.1 и 4.2 представлено дифференцированное распределение по стратам технических показателей эксплуатации транспортного комплекса ГПТОП в г. Москве на основании данных таблицы 1.1 (объём перевозок и процент распределения пассажиропотока по видам транспорта, г. Москва, 2022 г.).

Таблица 4.1. – Страта, содержащая данные по объёмным техническим показателям эксплуатации маршрутной сети

Виды транспорта	Показатели маршрутной сети		
	Протяжённость сети, км	Количество маршрутов	Количество ПС
Трамвай	183,1	43	700
Троллейбус	9,5	1	18
Электробус	790	117	1300
Автобус	7995,5	795	4800
Метрополитен	460,5	14	5956
ЖД (городская)	357	5	155

Таблица 4.2 – Страта, содержащая данные по объёмным техническим показателям эксплуатации объектов инфраструктуры

Виды транспорта	Показатели инфраструктуры обслуживания ПС		
	Хранение	Маршрутные	ТО + ТР
Трамвай	5	958	4
Троллейбус	1	8	1
Электробус	3	1400	3
Автобус	20	8600	17
Метрополитен	20	263	20
ЖД (городская)	5	167	5

Современные информационные технологии и методы интеллектуального анализа данных открывают новые возможности для решения многокритериальных задач в условиях неопределённости. Машинное обучение и нейронные сети позволяют выявлять скрытые закономерности в больших массивах данных о функционировании транспортных систем и строить прогностические модели без необходимости явной формализации всех взаимосвязей. Имитационное моделирование даёт возможность исследовать поведение сложных систем в различных сценариях и оценивать последствия принимаемых решений до их практической реализации. Системы поддержки принятия решений, интегрирующие различные аналитические инструменты, обеспечивают комплексный подход к анализу альтернатив и выбору оптимальных стратегий распределения ресурсов [54].

Обоснование выбора метода решения многокритериальных оптимизационных задач для конкретного исследования должно базироваться на анализе особенностей исследуемой системы, характера имеющихся данных, типа неопределённости, целей исследования и требований к результатам. Для задач распределения ресурсов в городских пассажирских транспортных системах необходим метод, способный работать с неполной информацией, учитывать

множественные взаимосвязанные критерии, обеспечивать прозрачность процесса принятия решений и возможность участия заинтересованных сторон, а также допускать адаптацию к изменяющимся условиям функционирования системы. Такой метод должен обладать достаточной математической строгостью для получения надёжных результатов, но при этом оставаться достаточно гибким для учёта качественных факторов и экспертных суждений, которые невозможно полностью формализовать количественно.

#### **4.2 Разработка аналитических инструментов снятия неопределённости в сложных многокритериальных системах распределения ресурсов**

Снятие неопределённости в задачах распределения ресурсов пассажирских транспортных систем требует разработки специализированных аналитических инструментов, способных трансформировать качественную и неполную информацию в формализованные структуры, пригодные для принятия обоснованных управленческих решений. Неопределённость в данном контексте проявляется не только в вариативности исходных данных о параметрах функционирования транспортной системы, но и в многообразии возможных интерпретаций целей и критериев оптимальности, а также в сложности прогнозирования последствий принимаемых решений в условиях динамично изменяющейся внешней среды. Разработка эффективных аналитических инструментов предполагает создание комплексной методологической базы, объединяющей математические методы, экспертные процедуры и информационно-аналитические технологии в единую систему поддержки принятия решений.

Первым этапом разработки аналитических инструментов является структурирование пространства неопределённости и выявление основных источников неполноты информации в исследуемой системе. Для городских пассажирских транспортных систем общего пользования можно выделить несколько ключевых областей неопределённости. Во-первых, это неопределённость спроса на транспортные услуги, связанная с изменчивостью

пассажиропотоков во времени и пространстве, влиянием сезонных факторов, специальных событий, погодных условий и других трудно прогнозируемых обстоятельств. Во-вторых, это техническая неопределённость, обусловленная вероятностным характером отказов оборудования, вариативностью параметров технического состояния подвижного состава и инфраструктуры, а также непредсказуемостью результатов внедрения новых технологий [23]. В-третьих, это экономическая неопределённость, связанная с колебаниями цен на энергоносители и материалы, изменением тарифной политики, неопределённостью объёмов финансирования и рыночной конъюнктуры.

В таблице 4.3 приведён ряд решений, основанный на модели оценки вероятностных характеристик, соответствующих максимуму неопределённости в исследуемой системе [148].

Таблица 4.3 – Решения задачи снятия неопределённости, основанное на оценках Фишберна

N	$\Phi$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
2	$F_1 \approx F_2$	1/2	1/2	-	-
	$F_1 \succ F_2$	2/3	1/3	-	-
3	$F_1 \approx F_2 \approx F_3$	1/3	1/3	1/3	-
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3$	2/4	1/4	1/4	-
	$F_1 \approx F_2 \succ F_3$	2/5	2/5	1/5	-
	$F_1 \succ F_2 \succ F_3$	3/6	2/6	1/6	-
4	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \approx F_4$	1/4	1/4	1/4	1/4
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \approx F_4$	2/5	1/5	1/5	1/5
	$F_1 \approx F_2 \succ F_3 \approx F_4$	2/6	2/6	1/6	1/6
	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \succ F_4$	2/7	2/7	2/7	1/7
	$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \approx F_4$	3/7	2/7	1/7	1/7
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \succ F_4$	3/8	2/8	2/8	1/8
	$F_1 \approx F_2 \succ F_3 \succ F_4$	3/9	3/9	2/9	1/9
	$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \succ F_4$	4/10	3/10	2/10	1/10

Во второй главе было предложено не ограничиваться решением задачи на основании отдельно взятого предпочтения из ряда возможных априорных

вероятностей, но рассматривать полное множество распределения априорных вероятностей  $\hat{P}_j$ . Было определено, что данное множество может быть представлено в виде прямоугольного единичного гипертетраэдра в информационном пространстве  $(n-1)$  независимых величин  $\sum_{j=1}^{n-1} \hat{P}_j$ . Тогда в декартовой системе координат данный гипертетраэдр формируется пересечением положительного гипероктанта гиперплоскостью, отсекающей на каждой из осей отрезок, равный единице. При  $n=3$  поле распределений априорных вероятностей трансформируется в прямоугольный треугольник с единичными катетами (Рисунок 2.2).

Используя данные таблицы 4.3 определим координаты точек, являющиеся решением модели снятия неопределённости в соответствии с оценками Фишберна для информационного состояния:  $P_1 \geq P_2 \geq P_3$  (рисунок 4.1).

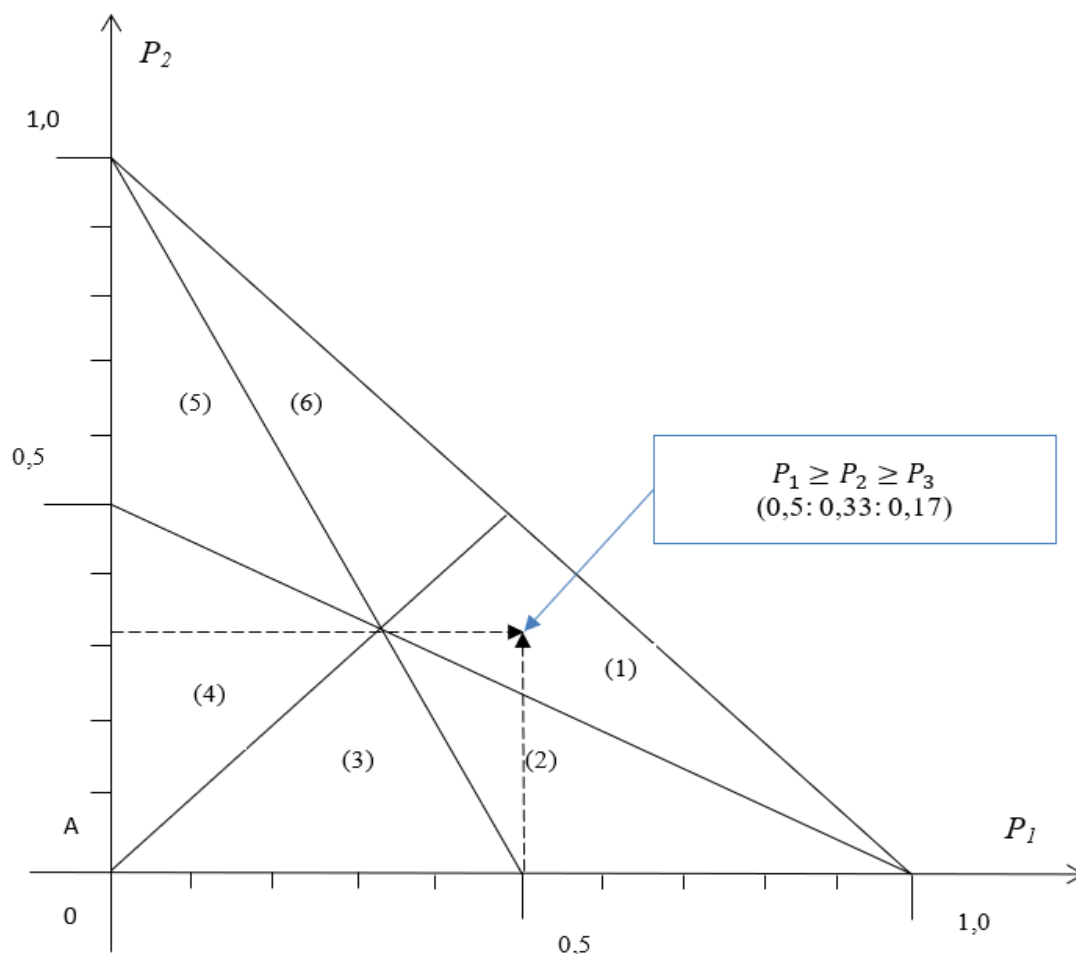


Рисунок 4.1 – Поле распределений информационных состояний для  $\hat{P}_j$ , при  $P_3 = 3! = 6$ . Источник: [разработано автором]

Далее не вызовет затруднений определить оценки вероятностных характеристик для  $n=3!=6$  с целью изучения ИС с учётом полного факторного пространства, влияющего на получение возможных решений (рисунок 4.2).

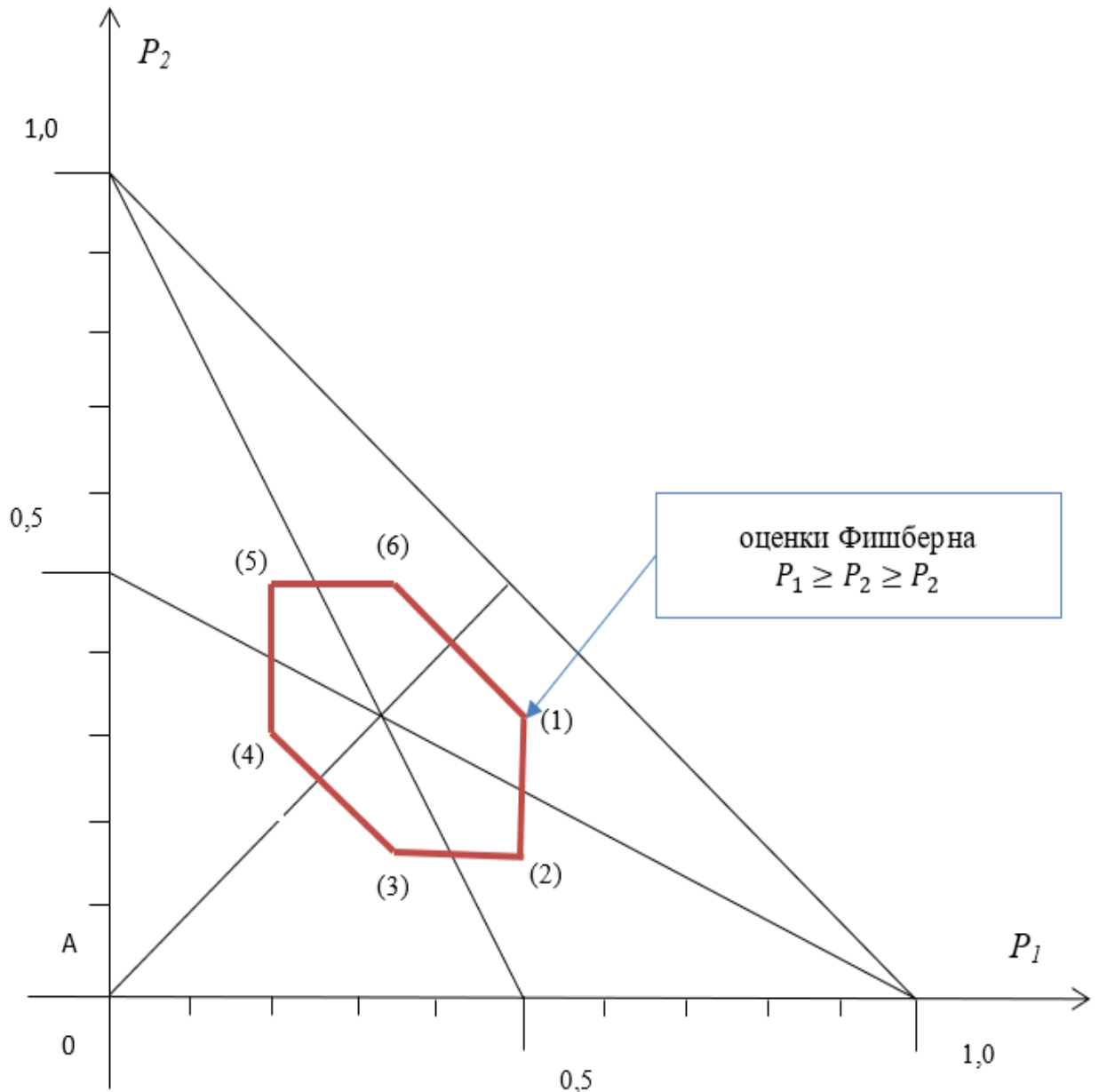


Рисунок 4.2 – Поле распределений информационных состояний для  $P\hat{P}_j$  по Фишберну, при  $P_3 = 3! = 6$ . Источник: [разработано автором]

На рисунке 4.2 мы видим, что оценки Фишберна для всех ИС представлены в виде некоторого замкнутого контура, причем для каждого из рассматриваемых

предпочтений это будет отдельное единичное значение, которое в совокупности будет формировать множество  $\{(1), (2), \dots, (6)\}$ .

Структурирование неопределённости требует построения формализованной модели системы, в которой явно выделены детерминированные и стохастические компоненты, а также идентифицированы параметры, значения которых могут быть определены лишь с некоторой степенью уверенности. Для этого целесообразно использовать аппарат теории нечётких множеств, позволяющий представить неопределённость в виде функций принадлежности, характеризующих степень возможности различных значений параметров. В отличие от вероятностного подхода, предполагающего наличие статистических данных о частоте возникновения тех или иных событий, нечеткое моделирование опирается на экспертные суждения и качественные оценки, что особенно важно при дефиците количественной информации или при анализе принципиально новых ситуаций, для которых отсутствует историческая статистика.

Построение нечетких моделей начинается с определения лингвистических переменных, описывающих ключевые параметры и характеристики системы. Например, интенсивность пассажиропотока может быть описана лингвистическими терминами низкая, средняя, высокая, очень высокая, каждый из которых представляется соответствующей функцией принадлежности на числовой оси значений пассажиропотока. Форма функций принадлежности определяется на основе экспертных оценок с учётом специфики конкретной транспортной системы. Наиболее распространёнными являются треугольные, трапецеидальные и гауссовы функции принадлежности, выбор между которыми зависит от характера неопределённости и доступной информации о распределении значений параметра [60].

Важным аспектом разработки аналитических инструментов является создание механизмов агрегирования информации из различных источников и преобразования качественных оценок в количественные показатели. Для решения этой задачи используются методы экспертного оценивания, основанные на структурированных процедурах сбора и обработки мнений специалистов. Одним

из эффективных подходов является применение метода Дельфы, предполагающего многоуровневый итерационный опрос экспертов с обратной связью и постепенным сближением позиций. Данный метод позволяет снизить влияние индивидуальных предубеждений и повысить объективность групповых оценок за счёт анонимности участников и возможности пересмотра своих суждений с учётом аргументов других экспертов.

Альтернативным подходом к агрегированию экспертной информации является использование методов многокритериального анализа, позволяющих формализовать предпочтения экспертов в виде весовых коэффициентов или ранжирований альтернатив по различным критериям.

Для количественной характеристики неопределённости используются различные меры, такие как энтропия, дисперсия, размах вариации, коэффициенты вариации и специальные показатели нечеткости. Энтропийные меры, заимствованные из теории информации, позволяют оценить степень беспорядка или неопределённости в распределении вероятностей или функций принадлежности. Высокие значения энтропии указывают на высокую степень неопределённости и необходимость дополнительного сбора информации или применения робастных методов принятия решений, устойчивых к неопределённости исходных данных.

Для снятия неопределённости в многокритериальных системах распределения ресурсов необходимо разработать процедуры определения весовых коэффициентов критериев, отражающих их относительную важность с точки зрения целей функционирования системы. Эта задача осложняется тем, что различные заинтересованные стороны могут иметь различные системы приоритетов и по-разному оценивать значимость тех или иных аспектов работы транспортной системы. Пассажиры в первую очередь ценят удобство, комфорт и скорость передвижения, перевозчики заинтересованы в экономической эффективности и рентабельности операций, городские власти учитывают социальные, экологические и градостроительные аспекты, а регулирующие органы следят за соблюдением нормативных требований и стандартов безопасности [30].

Для учёта множественности позиций заинтересованных сторон разработан инструментальный многостороннего анализа, позволяющий выявить и формализовать различные системы предпочтений и найти компромиссные решения, приемлемые для всех участников. Данный инструмент анализа основывается на принципах теории игр и теории переговоров, рассматривающих процесс принятия решений как взаимодействие нескольких игроков с различными целевыми функциями. Результатом такого анализа является определение множества Парето-оптимальных решений и выделение соответствующих различным концепциям справедливости и эффективности.

Стоит отметить такие методы сценарного анализа, которые позволяют исследовать поведение системы при различных вариантах развития внешней среды и внутренних параметров. Сценарный подход предполагает построение нескольких качественно отличающихся картин будущего. Для каждого сценария проводится оценка последствий возможных управленческих решений, что позволяет выявить робастные стратегии, эффективные при различных условиях, а также идентифицировать критические точки, в которых система особенно чувствительна к изменениям параметров [146].

На основе такого анализа формируются базовый, оптимистический и пессимистический сценарии, охватывающие диапазон возможных состояний системы и внешней среды. Для количественной оценки последствий различных решений в рамках каждого сценария применяются методы имитационного моделирования. Имитационные модели строятся на основе дискретно-событийного подхода, агентного моделирования или системной динамики в зависимости от особенностей исследуемых процессов и целей анализа. Дискретно-событийное моделирование наиболее эффективно для детального анализа операционных процессов, таких как движение транспортных средств по маршрутам, обслуживание пассажиров на остановках, выполнение графика движения. Агентное моделирование позволяет учесть индивидуальное поведение множества автономных агентов, представляющих пассажиров, водителей, диспетчеров и другие активные элементы системы. Системная динамика

ориентирована на анализ долгосрочных тенденций и обратных связей в системе, влияющих на её эволюцию во времени.

Разработка имитационных моделей предполагает создание формализованного описания структуры системы, правил функционирования её элементов, параметров внешней среды и критериев оценки результатов. Верификация и валидация моделей осуществляется путем сопоставления результатов моделирования с реальными данными о функционировании транспортной системы и экспертными оценками адекватности воспроизведения ключевых закономерностей. Откалиброванная модель может использоваться для проведения вычислительных экспериментов, в ходе которых исследуется влияние различных управленческих решений на показатели эффективности системы при заданных сценариях развития [147].

Для формализации и обработки экспертной информации разработан специальный математический аппарат, основанный на теории свидетельств и теории возможностей.

Теория свидетельств оперирует понятиями базовой вероятностной функции, функций доверия и правдоподобия, позволяющих формализовать ситуации, когда имеющаяся информация не позволяет определить точное распределение вероятностей, но дает основания для оценки степени обоснованности различных гипотез. Правила комбинирования свидетельств из различных источников позволяют агрегировать информацию от нескольких экспертов или из разных источников данных с учётом их надёжности и взаимной согласованности.

Теория возможностей дополняет вероятностный подход, предлагая альтернативную интерпретацию неопределённости в терминах возможности и необходимости событий. Распределение возможностей отражает степень совместимости различных значений параметра с имеющейся информацией, не требуя предположений о частоте наблюдения этих значений. Это особенно полезно при работе с уникальными событиями или ситуациями, для которых отсутствует статистика повторяющихся наблюдений. Меры возможности и необходимости образуют двойственную пару, аналогично верхним и нижним вероятностям в

теории свидетельств, позволяя оценить диапазон неопределённости в утверждениях о значениях параметров или последствиях решений [46].

Практическая реализация аналитических инструментов снятия неопределённости требует создания информационно-аналитических систем, интегрирующих методы сбора, хранения, обработки и визуализации данных о функционировании транспортной системы. Современные технологии больших данных и аналитики в реальном времени открывают новые возможности для мониторинга состояния системы и оперативного выявления отклонений от нормального режима работы. Автоматизированные системы управления транспортом, оснащенные датчиками и средствами телематики, генерируют огромные объёмы информации о местоположении транспортных средств, пассажиропотоках, техническом состоянии оборудования, дорожных условиях и других параметрах. Эффективная обработка этих данных с применением методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных позволяет выявлять закономерности, строить прогностические модели и поддерживать принятие решений на различных уровнях управления.

Машинное обучение предлагает набор алгоритмов для автоматического обнаружения паттернов в данных и построения предсказательных моделей без необходимости явного программирования всех правил и зависимостей. Методы обучения с учителем, такие как регрессионный анализ, деревья решений, нейронные сети и метод опорных векторов, используются для прогнозирования пассажиропотоков, оценки времени в пути, предсказания отказов оборудования на основе исторических данных о связи входных факторов с целевыми переменными. Методы обучения без учителя, включая кластеризацию и снижение размерности, применяются для выявления групп схожих объектов или ситуаций, идентификации аномалий и сегментации пространства состояний системы на относительно однородные области [54].

Глубокое обучение на основе многослойных нейронных сетей демонстрирует особенно высокую эффективность при работе со сложными нелинейными зависимостями и большими объёмами данных. Рекуррентные

нейронные сети и архитектуры на основе механизмов внимания успешно применяются для анализа временных рядов и прогнозирования динамики пассажиропотоков с учётом сезонных эффектов, трендов и внешних факторов. Нейронные сети эффективны для анализа пространственных данных, таких как карты плотности населения, схемы транспортных сетей, изображения с камер видеонаблюдения.

Постоянное развитие аналитических инструментов предполагает мониторинг новых достижений в области методов анализа данных, теории принятия решений и информационных технологий с целью своевременной адаптации и внедрения передовых подходов. Это требует организации взаимодействия между научными организациями, разработчиками программного обеспечения и эксплуатирующими предприятиями для обмена знаниями и опытом, проведения совместных исследований и пилотных проектов по апробации инновационных решений. Создание открытых платформ и репозиториев аналитических инструментов способствует распространению лучших практик и ускоряет внедрение новых методов в широкую практику управления транспортными системами.

Рассмотрим графоаналитическую модель определения эффективности в исследуемой системе (рисунок 4.3) на одном из множества взаимоисключающих вариантов  $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_n)$  при  $n = 3$ , и для одного из предпочтений, соответствующего априорной вероятностей  $\hat{P}_j$  (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Геометрическое поле распределения априорных вероятностей  $\hat{P}_j$

Подмножество	Соотношение априорных вероятностей $\hat{P}_j$ .
(1)	$\hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_3}$

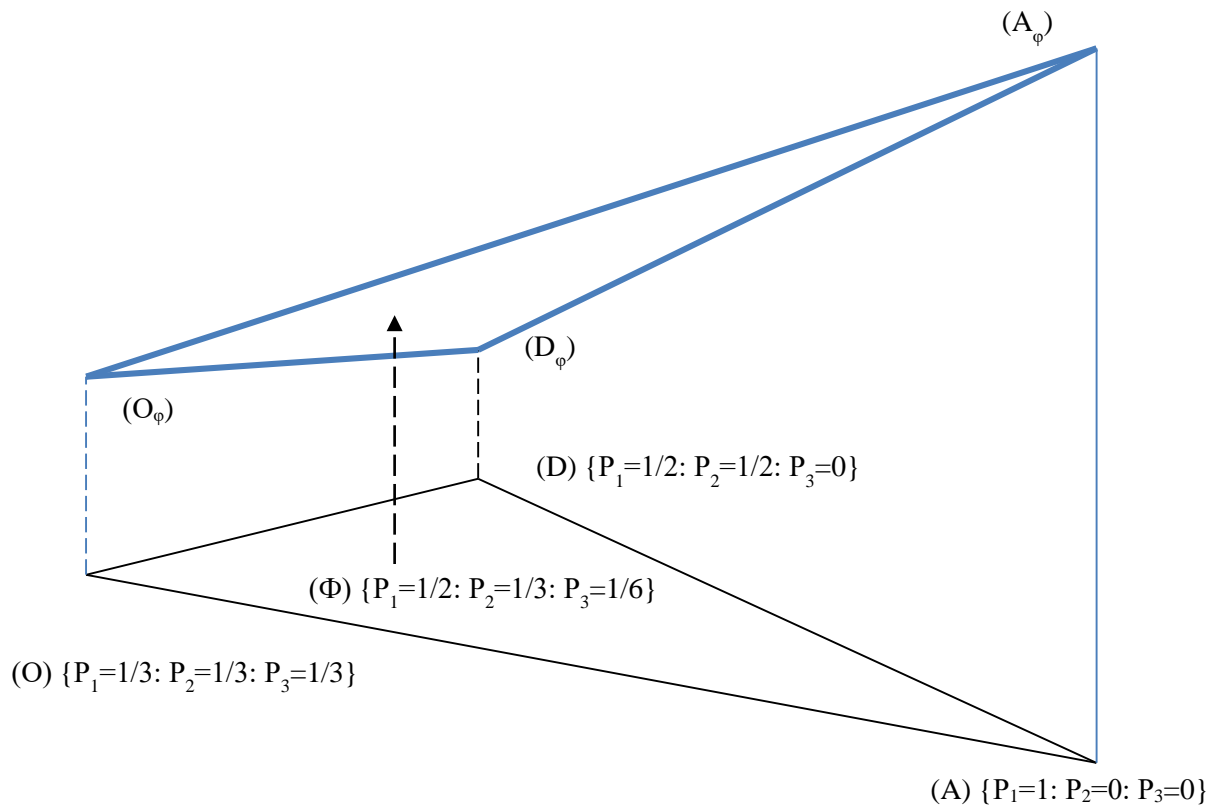


Рисунок 4.3 – Графоаналитическая модель определения эффективности на одном из множества взаимоисключающих вариантов  $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_n)$  при  $n=3$  для одного из предпочтений  $\hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_3}$ . Источник: [разработано автором]

На рисунке 4.3 множество точек плоскости, ограниченной треугольником AOD, является совокупностью вероятностных характеристик, соответствующих предпочтению  $\hat{P}_{j_1} < \hat{P}_{j_2} < \hat{P}_{j_3}$ , а множество точек плоскости, ограниченной треугольником  $A_\phi O_\phi D_\phi$ , является множеством точек, соответствующих оценочному функционалу для исследуемой страты РР-системы на всём множестве СВС.

Точка (Ф) является одним из возможных решений, определимым в соответствии с моделью оценок Фишберна. Из рисунка 4.3 нетрудно сделать вывод, что применение модели, основанной на оценках Фишберна, решает основную задачу снятия неопределённости в исследуемой системе

Покажем на гипотетическом примере принципиальные отличия между перечисленными и исследованными методами: методом оценок Фишберна, методом районирования по принципу доминирования вероятностей возможных состояний внешней среды и методом районирования по принципу соблюдения иерархического соотношений вероятностей возможных состояний внешней среды (рисунок 4.4).

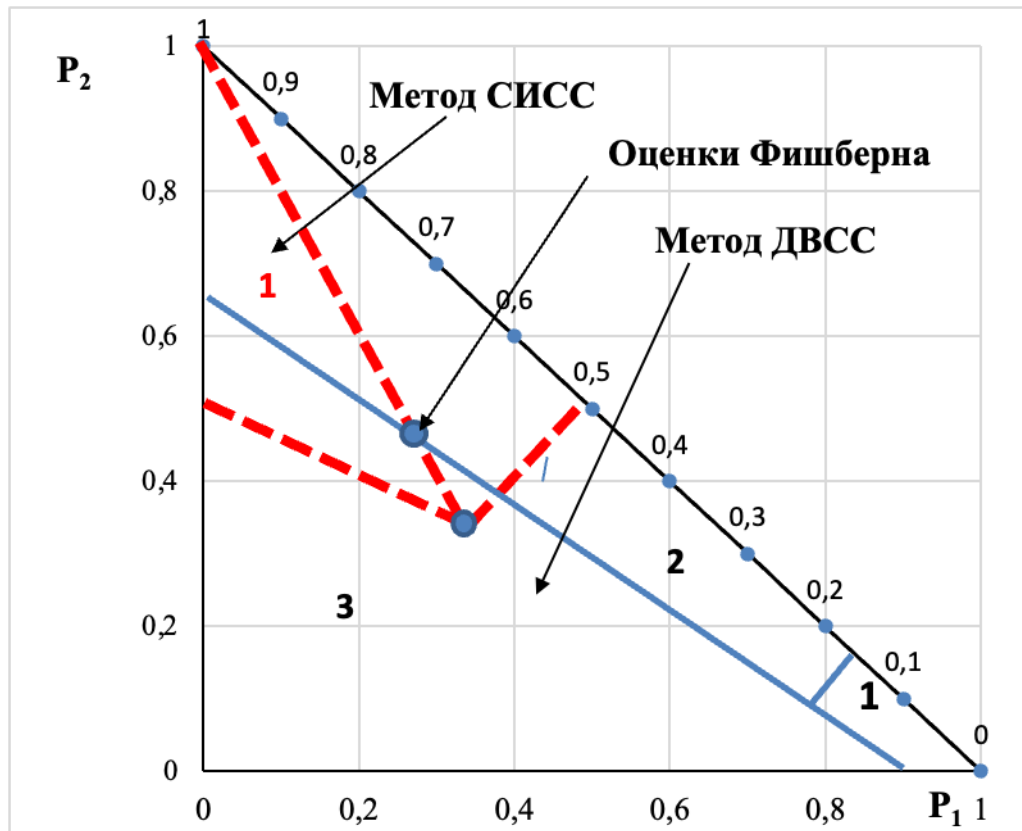


Рисунок 4.4 – Графическое представление возможных решений при условии  $p_2 \geq p_3 \geq p_1$ . Источник: [разработано автором]

На рисунке 4.4 представлены гипотетическое распределение вероятностных характеристик для единой структуры оценочного функционала, распределенного по трём критериям эффективности. Для гипотетического случая количественные оценки рассматриваемого функционала не столь важны, главное показать принципиальные отличия между различными инструментами поиска решений и выбрать наиболее предпочтительный для исследования РР-систем.

1. Метод «оценки Фишберна» всегда будет рекомендовать единственное решение при заданном предпочтении.

2. Метод «районирования по принципу доминирования вероятностей возможных состояний внешней среды» (ДВСС) независим от устанавливаемых предпочтений, его основное назначение определить районы доминирования отдельных действий или определение вероятностных характеристик, соответствующим наборам эффективных решений по каждому из исследуемых вариантов (районы 1, 2 и 3, выделенные на рисунке 4.4). Далее в соответствии с ДВСС определяются парные границы между выявленными районами и определяются предпочтения, при которых можно добиться эффективных решений.

Метод «районирования по принципу соблюдения иерархического соотношений вероятностей возможных состояний внешней среды» (СИСС) позволяет исследовать возможные варианты эффективных решений на всем наборе возможных предпочтений. На рисунке 4.4 показана одна область, соответствующая предпочтению  $p_2 \geq p_3 \geq p_1$ , в которой будет определяться эффективное решение. Следующим шагом является перебор всех возможных решений с выявлением максимально эффективного решения в каждом из предпочтений.

#### **4.3 Анализ эффективности аналитических инструментов снятия неопределенности с целью выявления объективных моделей управления ресурсами в сложных в транспортных системах**

В предыдущих разделах исследования было установлено, что сложные транспортные системы характеризуются высоким уровнем неопределённости, обусловленным множественностью факторов влияния, нестабильностью параметров функционирования и динамическим характером изменения состояний системы. Принятие управленческих решений в таких условиях требует применения специализированных аналитических инструментов, позволяющих объективно

оценивать эффективность распределения ресурсов между элементами системы, что особо актуально для городского пассажирского транспорта общего пользования.

Специфика ресурсораспределительных систем в городском пассажирском транспорте общего пользования определяется рядом важных особенностей, которые делают невозможным применение традиционных методов оптимизации, основанных на субъективных экспертных оценках. Во-первых, структура таких систем представляет собой большое и, как правило, нестабильное множество элементов, количество которых изменяется во времени. Во-вторых, связи между элементами системы формируют сложную иерархическую структуру с неопределённой информационной составляющей, касающейся природы факторов влияния и характера их взаимодействия [23].

Указанные особенности обуславливают необходимость разработки и применения объективных аналитических методов, базирующихся на теории принятия решений в условиях неопределённости. Объективность таких методов должна обеспечиваться минимизацией субъективного фактора при формировании весовых коэффициентов критериев и возможностью получения воспроизводимых результатов при повторных расчётах на одних и тех же исходных данных. Эффективность же аналитических инструментов определяется их способностью выявлять множество недоминируемых решений и обеспечивать максимально возможные количественные оценки эффективности распределения ресурсов.

Для проведения исследований были определены (приняты) оценочные функционалы двух страт на основе данных таблицы 1.1:

- **Страта 1**, содержащая данные по объёмным техническим показателям эксплуатации маршрутной сети (таблица 4.1), за исключением объектов ж/д транспорта.

$$\|F_{ij}\| = \begin{pmatrix} 183,1 & 43 & 700 \\ 9,5 & 1 & 18 \\ 790 & 117 & 1300 \\ 7999,5 & 795 & 4800 \\ 460,5 & 14 & 5956 \end{pmatrix}$$

- **Страта 2**, содержащая данные по объёмным техническим показателям эксплуатации объектов инфраструктуры (таблица 4.2), за исключением объектов ж/д транспорта.

$$\|F_{ij}\| = \begin{pmatrix} 5 & 958 & 4 \\ 1 & 8 & 1 \\ 3 & 1400 & 3 \\ 20 & 8600 & 17 \\ 20 & 263 & 20 \end{pmatrix}$$

Далее выполним расчёт по представленным выше алгоритмам в разработанном ПО. Последовательность действий представлена на рисунках в следующем порядке:

- рисунок 4.5 (а, б и в): Метод оценки Фишберна (страта 1), ПО C++;
- рисунок 4.6 (а и б): Метод СИСС (страта 1), ПО C++;
- рисунок 4.7 (а, б и в): Метод оценки Фишберна (страта 2), ПО C++;
- рисунок 4.8 (а и б): Метод СИСС (страта 2), ПО C++;
- рисунок 4.9 (а): Метод ДВСС, ПО Excel;
- рисунок 4.9 (б): Метод ДВСС, ПО Excel.

Form1

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

	K1	K2	K3
D1	183,1	43	700
D2	9,5	1	18
D3	790	117	1300
D4	7995,5	795	4800
D5	460,5	14	5956
min-max	max	max	min

Рисунок 4.5 (а) – Интерфейс ПО «ввод данных-страта 1», метод - оценки Фишберна. Источник: [разработано автором]

Form1

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

ВВОД

	K1	K2	K3
D1	0,019	0,044	0,025
D2	0,001	0,001	0,956
D3	0,084	0,120	0,013
D4	0,847	0,820	0,004
D5	0,049	0,015	0,003
▶ min-max	max	max	min

НОРМАЛИЗОВАТЬ      РАССЧИТАТЬ

Рисунок 4.5 (б) – Интерфейс ПО «нормирование данных с учётом целеполагания - страта 1», метод - оценки Фишберна. Источник: [разработано автором]

Form1

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

ВВОД

	K1	K2	K3
D1	0,019	0,044	0,025
D2	0,001	0,001	0,956
D3	0,084	0,120	0,013
D4	0,847	0,820	0,004
D5	0,049	0,015	0,003
▶ min-max	max	max	min

НОРМАЛИЗОВАТЬ      РАССЧИТАТЬ

×

Результаты расчёта программы представлены в файле Result.txt

ОК

Рисунок 4.5 (в) – Интерфейс ПО «результаты расчёта-страта1», метод - оценки Фишберна. Источник: [разработано автором]

Ниже приведены результаты расчёта для набора из 6-и возможных предпочтений и выборка наилучших решений (выделено подчеркиванием):

- 1)  $P1 > P2 > P3$   $D1=0,0283$ ;  $D2=0,1602$ ;  $D3=0,0842$ ;  $D4=0,6975$ ;  $D5=0,0300$ ; 4
- 2)  $P1 > P3 > P2$   $D1=0,0252$ ;  $D2=0,3193$ ;  $D3=0,0663$ ;  $D4=0,5615$ ;  $D5=0,0280$ ; 4
- 3)  $P2 > P1 > P3$   $D1=0,0325$ ;  $D2=0,1602$ ;  $D3=0,0902$ ;  $D4=\underline{0,6930}$ ;  $D5=0,0243$ ; 4
- 4)  $P2 > P3 > P1$   $D1=0,0335$ ;  $D2=0,3193$ ;  $D3=0,0783$ ;  $D4=0,5525$ ;  $D5=0,0167$ ; 4
- 5)  $P3 > P2 > P1$   $D1=0,0303$ ;  $D2=\underline{0,4785}$ ;  $D3=0,0605$ ;  $D4=0,4165$ ;  $D5=0,0147$ ; 2
- 6)  $P3 > P1 > P2$   $D1=0,0262$ ;  $D2=\underline{0,4785}$ ;  $D3=0,0545$ ;  $D4=0,4210$ ;  $D5=0,0203$ ; 2

Количество областей, соответствующих наилучшим решениям:

$$D1=0; \quad D2=2; \quad D3=0; \quad D4=4; \quad D5=0$$

Весовые коэффициенты, определяемые назначенные моделью оценки Фишберна:

$$0,5000 \quad 0,3333 \quad 0,1667$$

Form1

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

	K1	K2	K3
D1	183,1	43	700
D2	9,5	1	18
D3	790	117	1300
D4	7995,5	795	4800
D5	460,5	14	5956
min-max	max	max	min

Рисунок 4.6 (а) – Интерфейс ПО «ввод данных-страта 1», метод – районирование СИСС. Источник: [разработано автором]

Form1

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

ВВОД

	K1	K2	K3
D1	0,019	0,044	0,025
D2	0,001	0,001	0,956
D3	0,084	0,120	0,013
D4	0,847	0,820	0,004
D5	0,049	0,015	0,003
▶ min-max	max	max	min

НОРМАЛИЗОВАТЬ      РАССЧИТАТЬ

Рисунок 4.6 (б) – Интерфейс ПО «нормирование данных-страта 1», метод – районирование СИСС. Источник: [разработано автором]

Ниже приведены результаты расчёта для набора из 6-и возможных предпочтений и выборка наилучших решений (выделено подчёркиванием):

- 1) P1>P2>P3 D1=0,0315; D2=0,3193; D3=0,1020; **D4=0,8470**; D5=0,0490; 4
- 2) P1>P3>P2 D1=0,0293; D2=0,4785; D3=0,0723; **D4=0,8470**; D5=0,0490; 4
- 3) P2>P1>P3 D1=0,0440; D2=0,3193; D3=0,1200; D4=0,8335; D5=0,0320; 4
- 4) P2>P3>P1 D1=0,0440; D2=0,4785; D3=0,1200; D4=0,5570; D5=0,0223; 4
- 5) P3>P2>P1 D1=0,0345; **D2=0,9560**; D3=0,0665; D4=0,5570; D5=0,0223; 2
- 6) P3>P1>P2 D1=0,0293; **D2=0,9560**; D3=0,0723; D4=0,4255; D5=0,0260; 2

Количество областей, соответствующих наилучшим решениям:

$$D1=0 \ D2=2 \ D3=0 \ D4=4 \ D5=0$$

Form1

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

ВВОД

	K1	K2	K3
D1	5	958	4
D2	1	8	1
D3	3	1400	3
D4	20	8600	17
D5	20	263	20
min-max	min	min	min

НОРМАЛИЗОВАТЬ

РАССЧИТАТЬ

Рисунок 4.7 (а) - Интерфейс ПО «ввод данных-страта 2», метод – оценки Фишберна. Источник: [разработано автором]

Form1

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

ВВОД

	K1	K2	K3
D1	0,122	0,008	0,148
D2	0,612	0,957	0,591
D3	0,204	0,006	0,197
D4	0,031	0,001	0,035
D5	0,031	0,029	0,030
▶ min-max	min	min	min

НОРМАЛИЗОВАТЬ

РАССЧИТАТЬ

Рисунок 4.7 (б) - Интерфейс ПО «нормирование данных с учётом целеполагания - страта 2», метод – оценки Фишберна. Источник: [разработано автором]

Form1

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

ВВОД

	K1	K2	K3
D1	0,122	0,008	0,148
D2	0,612	0,957	0,591
D3	0,204	0,006	0,197
D4	0,031	0,001	0,035
D5	0,031	0,029	0,030
min-max	min	min	min

НОРМАЛИЗОВАТЬ

РАССЧИТАТЬ

×

Результаты расчета программы представлены в файле Result.txt

ОК

Рисунок 4.7 (в) - Интерфейс ПО «результаты расчёта-страта 2», метод – оценки Фишберна. Источник: [разработано автором]

Ниже приведены результаты расчёта для набора из 6-и возможных предпочтений и выборка наилучших решений (выделено подчеркиванием):

- 1) P1>P2>P3 D1=0,0883; D2=0,7235; D3=0,1368; D4=0,0217; D5=0,0302; 2
- 2) P1>P3>P2 D1=0,1117; D2=0,6625; D3=0,1687; D4=0,0273; D5=0,0303; 2
- 3) P2>P1>P3 D1=0,0693; **D2=0,7810**; D3=0,1038; D4=0,0167; D5=0,0298; 2
- 4) P2>P3>P1 D1=0,0737; D2=0,7775; D3=0,1027; D4=0,0173; D5=0,0297; 2
- 5) P3>P2>P1 D1=0,0970; D2=0,7165; D3=0,1345; D4=0,0230; D5=0,0298; 2
- 6) P3>P1>P2 D1=0,1160; D2=0,6590; D3=0,1675; D4=0,0280; D5=0,0302; 2

Количество областей, соответствующих наилучшим решениям:

$$D1=0 \ D2=6 \ D3=0 \ D4=0 \ D5=0$$

Весовые коэффициенты, определяемые назначенные моделью оценки Фишберна.

$$0,5000 \ 0,3333 \ 0,1667$$

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

ВВОД

	K1	K2	K3
D1	5	958	4
D2	1	8	1
D3	3	1400	3
D4	20	8600	17
D5	20	263	20
min-max	min	min	min

НОРМАЛИЗОВАТЬ

РАССЧИТАТЬ

Рисунок 4.8 (а) - Интерфейс ПО «ввод данных-страта 2», метод – районирование СИСС. Источник: [разработано автором]

Form1

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО КРИТЕРИЕВ (N)

ВВЕДИТЕ КОЛИЧЕСТВО РЕШЕНИЙ (M)

ВВОД

	K1	K2	K3
D1	0,122	0,008	0,148
D2	0,612	0,957	0,591
D3	0,204	0,006	0,197
D4	0,031	0,001	0,035
► D5	0,031	0,029	0,030
min-max	min	min	min

НОРМАЛИЗОВАТЬ

РАССЧИТАТЬ

Рисунок 4.8 (б) - Интерфейс ПО «нормирование данных-страта2», метод – районирование СИСС. Источник: [разработано автором]

Ниже приведены результаты расчёта для набора из 6-и возможных предпочтений и выборка наилучших решений (выделено подчеркиванием):

- 1)  $P1 > P2 > P3$   $D1=0,0927$ ;  $D2=0,7845$ ;  $D3=0,2040$ ;  $D4=0,0223$ ;  $D5=0,0310$ ; 2
- 2)  $P1 > P3 > P2$   $D1=0,1350$ ;  $D2=0,7200$ ;  $D3=0,2040$ ;  $D4=0,0330$ ;  $D5=0,0310$ ; 2
- 3)  $P2 > P1 > P3$   $D1=0,0927$ ;  **$D2=0,9570$** ;  $D3=0,1050$ ;  $D4=0,0223$ ;  $D5=0,0300$ ; 2
- 4)  $P2 > P3 > P1$   $D1=0,0780$ ;  **$D2=0,9570$** ;  $D3=0,1357$ ;  $D4=0,0180$ ;  $D5=0,0300$ ; 2
- 5)  $P3 > P2 > P1$   $D1=0,1480$ ;  $D2=0,7740$ ;  $D3=0,1357$ ;  $D4=0,0350$ ;  $D5=0,0300$ ; 2
- 6)  $P3 > P1 > P2$   $D1=0,1480$ ;  $D2=0,7200$ ;  $D3=0,2005$ ;  $D4=0,0350$ ;  $D5=0,0305$ ; 2

Количество областей, соответствующих наилучшим решениям:

$$D1=0 \ D2=6 \ D3=0 \ D4=0 \ D5=0$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
1	Страта 1																										
2																											
3		Дано:				Исходные значения						Переменные значения															
4																											
5	k1=	183,1	x1+	10	x2+	790	x3+	7995,5	x4+	460,5	x5																
6	k2=	43	x1+	1	x2+	117	x3+	795	x4+	14	x5																
7	k3=	700	x1+	18	x2+	1300	x3+	4800	x4+	5956	x5																
8																											
9							P1	P2	P3																		
10							0,019	0,044	0,025																		
11							0,001	0,001	0,956																		
12	Матрица эффективности:				A =		0,084	0,12	0,013																		
13							0,847	0,82	0,04																		
14							0,049	0,015	0,003																		
15																											
16							0,018	P1+	0,043	P2+	-0,931	P3=	0														
17							-0,083	P1+	-0,119	P2+	0,943	P3=	0														
18							-0,763	P1+	-0,7	P2+	-0,027	P3=	0														
19							0,798	P1+	0,805	P2+	0,037	P3=	0														
20	Все комбинации уравнений:						-0,065	P1+	-0,076	P2+	0,012	P3=	0														
21							-0,846	P1+	-0,819	P2+	0,916	P3=	0														
22							0,035	P1+	0,105	P2+	0,01	P3=	0														
23							-0,828	P1+	-0,776	P2+	-0,015	P3=	0														
24							-0,048	P1+	-0,014	P2+	0,953	P3=	0														
25							-0,03	P1+	0,029	P2+	0,022	P3=	0														
26																											
27							0,949	P1+	0,974	P2=	0,931																
28							-1,026	P1+	-1,062	P2=	-0,943																
29							-0,736	P1+	-0,673	P2=	0,027																
30							0,761	P1+	0,768	P2=	-0,037																
31	Уравнения искомым прямым:						-0,077	P1+	-0,088	P2=	-0,012																
32							-1,762	P1+	-1,735	P2=	-0,916																
33							0,025	P1+	0,095	P2=	-0,01																
34							-0,813	P1+	-0,761	P2=	0,015																
35							-1,001	P1+	-0,967	P2=	-0,953																
36							-0,052	P1+	0,007	P2=	-0,022																
37																											
38																											

Рисунок 4.9 (а) – Определение районов эффективных решений и парных границ между ними (страта 1): метод – районирование ДВСС, ПО Excel. Источник: [разработано автором]

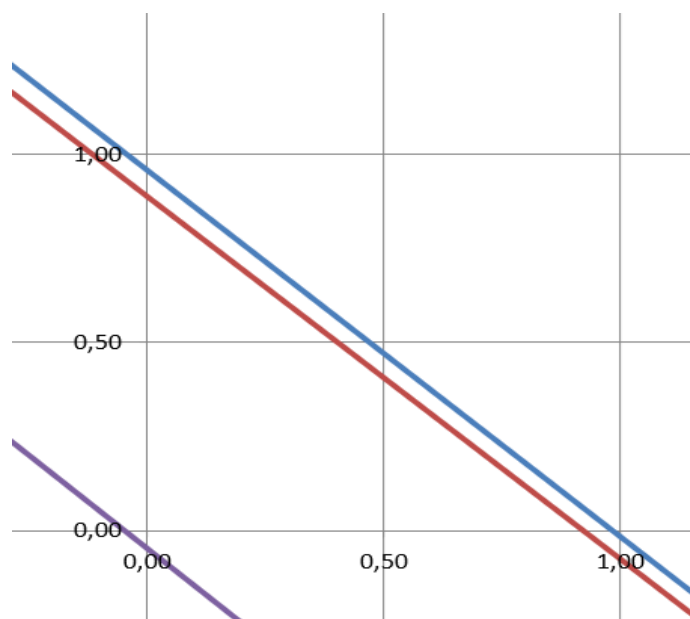
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
1	Страта 2																											
2																												
3		Дано:			Исходные значения						Переменные значения																	
4																												
5	k1=	5	x1+	1	x2+	3	x3+	20	x4+	20	x5					P1+P2+P3=1												
6	k2=	958	x1+	8	x2+	1400	x3+	8600	x4+	263	x5					Следовательно: √												
7	k3=	4	x1+	1	x2+	3	x3+	17	x4+	12	x5					P3=1-P1-P2												
8																												
9							P1	P2	P3																			
10							0,122	0,008	0,148																			
11							0,612	0,957	0,591																			
12	Матрица эффективности:				A =		0,204	0,006	0,197																			
13							0,031	0,001	0,035																			
14							0,031	0,029	0,3																			
15																												
16							-0,49	P1+	-0,949	P2+	-0,443	P3=	0															
17							0,408	P1+	0,951	P2+	0,394	P3=	0															
18							0,173	P1+	0,005	P2+	0,162	P3=	0															
19							0	P1+	-0,028	P2+	-0,265	P3=	0															
20	Все комбинации уравнений:						-0,082	P1+	0,002	P2+	-0,049	P3=	0															
21							0,581	P1+	0,956	P2+	0,556	P3=	0															
22							0,173	P1+	-0,023	P2+	-0,103	P3=	0															
23							0,091	P1+	0,007	P2+	0,113	P3=	0															
24							0,581	P1+	0,928	P2+	0,291	P3=	0															
25							0,091	P1+	-0,021	P2+	-0,152	P3=	0															
26																												
27							-0,047	P1+	-0,506	P2=	0,443																	
28							0,014	P1+	0,557	P2=	-0,394																	
29							0,011	P1+	-0,157	P2=	-0,162																	
30							0,265	P1+	0,237	P2=	0,265																	
31	Уравнения искомых прямых:						-0,033	P1+	0,051	P2=	0,049																	
32							0,025	P1+	0,4	P2=	-0,556																	
33							0,276	P1+	0,08	P2=	0,103																	
34							-0,022	P1+	-0,106	P2=	-0,113																	
35							0,29	P1+	0,637	P2=	-0,291																	
36							0,243	P1+	0,131	P2=	0,152																	
37																												

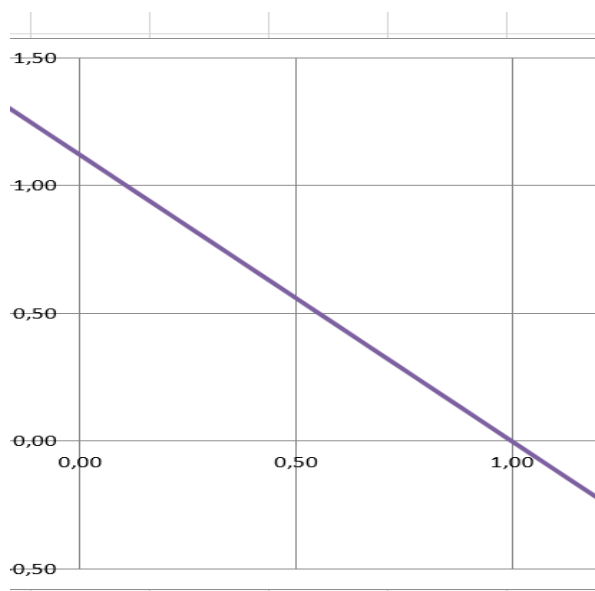
P1=	-4,00	-3,00	-2,00	-1,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
P2=	-0,50	-0,60	-0,69	-0,78	-0,88	-0,97	-1,06	-1,15	-1,25
	-0,61	-0,63	-0,66	-0,68	-0,71	-0,73	-0,76	-0,78	-0,81
	0,75	0,82	0,89	0,96	1,03	1,10	1,17	1,24	1,31
	5,59	4,47	3,35	2,24	1,12	0,00	-1,12	-2,24	-3,35
	-1,63	-0,98	-0,33	0,31	0,96	1,61	2,25	2,90	3,55
	-1,14	-1,20	-1,27	-1,33	-1,39	-1,45	-1,52	-1,58	-1,64
	15,09	11,64	8,19	4,74	1,29	-2,16	-5,61	-9,06	-12,51
	1,90	1,69	1,48	1,27	1,07	0,86	0,65	0,44	0,24
	1,36	0,91	0,45	0,00	-0,46	-0,91	-1,37	-1,82	-2,28
	8,58	6,73	4,87	3,02	1,16	-0,69	-2,55	-4,40	-6,26

Рисунок 4.9 (б) – Определение районов эффективных решений и парных границ между ними (страта 2): метод – районирование ДВСС, ПО Excel. Источник: [разработано автором]

На рисунках 4.10 (а и б) приведены результаты вычислений по определению районов эффективных решений и парных границ между ними по методу районирования ДВСС.



Рисунка 4.10 (а) – Результаты определения районов эффективных решений и парных границ между ними по методу районирования ДВСС (страта 1). Источник: [разработано автором]



Рисунка 4.10 (б) – Результаты определения районов эффективных решений и парных границ между ними по методу районирования ДВСС (страта 2). Источник: [разработано автором]

Для проведения сравнительного анализа эффективности различных аналитических инструментов было разработано специализированное программное обеспечение на алгоритмическом языке C++, позволяющее выполнять расчёты по трём базовым методам снятия неопределённости. К числу исследуемых методов относятся метод оценки Фишберна, основанный на ранжировании критериев с использованием линейно убывающих весовых коэффициентов, а также два метода районирования множества эффективных решений, различающихся способом учёта вероятностных характеристик критериев. Первый из методов районирования предполагает использование двусторонних вероятностных связей между критериями, второй базируется на системе интервальных структурированных связей. Каждый из этих методов имеет свои теоретические основания и область применимости, что делает необходимым их детальное сравнение на практических задачах распределения ресурсов в транспортных системах.

Экспериментальная база исследования была сформирована на основе реальных данных функционирования городской пассажирской транспортной системы общего пользования. Для обеспечения полноты анализа исходная информация была структурирована в виде двух страт, каждая из которых характеризует определенный аспект функционирования транспортной системы. Первая страта включает данные по объёмным техническим показателям эксплуатации маршрутной сети и содержит информацию о пяти различных видах транспорта, исключая объекты железнодорожного транспорта. Общее количество оценочных функционалов в первой страте составляет 5956 единиц, что обеспечивает высокую статистическую надёжность результатов анализа. Вторая страта содержит данные по объёмным техническим показателям эксплуатации объектов инфраструктуры, также исключая железнодорожный транспорт, и включает 20 оценочных функционалов. Такое разделение данных позволяет исследовать эффективность аналитических методов как на больших массивах информации с высокой детализацией, так и на агрегированных показателях инфраструктурного уровня.

Методология проведения вычислительного эксперимента предусматривала последовательное применение каждого из трех аналитических методов к обеим стратегиям данных с целью выявления множества эффективных решений и определения количественных оценок эффективности для каждого варианта распределения ресурсов. Для метода оценки Фишберна и метода районирования на основе системы интервальных структурированных связей исследовались все шесть возможных вариантов предпочтений вероятностных характеристик критериев, что позволило оценить устойчивость получаемых решений к изменению приоритетов. Метод районирования с использованием двусторонних вероятностных связей не требует задания предпочтений и обеспечивает определение границ между районами эффективных решений на основе анализа парных соотношений между вариантами [23].

Результаты применения метода оценки Фишберна к первой страте (рис. 4.11 (а)) данных показали, что при различных вариантах предпочтений критериев наблюдается относительно стабильная картина распределения эффективных решений между исследуемыми видами транспорта. Анализ показал, что для четырёх из шести возможных предпочтений наиболее эффективным является четвертый вариант распределения ресурсов, в то время как для оставшихся двух предпочтений оптимальным оказывается второй вариант. Количественные оценки эффективности для четвертого варианта при оптимальных для него предпочтениях достигают значения 0,6975, что свидетельствует о достаточно высокой степени соответствия данного варианта установленным критериям. Для второго варианта при благоприятных предпочтениях максимальное значение эффективности составило 0,4785. Весовые коэффициенты, автоматически назначаемые моделью оценки Фишберна, составили 0,5000 для первого критерия, 0,3333 для второго и 0,1667 для третьего, что соответствует классической схеме линейно убывающих весов.

Применение метода районирования на основе системы интервальных структурированных связей к той же первой страте данных выявило аналогичную структуру распределения эффективных решений, однако количественные оценки

эффективности оказались существенно выше. Для четвертого варианта распределения ресурсов при оптимальных предпочтениях достигнуто значение эффективности 0,8470, что на 21,4 процента превышает максимальную оценку, полученную методом Фишберна. Еще более значительное различие наблюдается для второго варианта, где метод интервальных структурированных связей дает оценку 0,9560 против 0,4785 по методу Фишберна, что представляет собой двукратное превышение. Такое увеличение количественных оценок объясняется тем, что метод интервальных структурированных связей более полно учитывает взаимосвязи между критериями и использует более гибкую схему формирования весовых коэффициентов, адаптирующуюся к специфике конкретной задачи [149].

Третий исследуемый метод, основанный на районировании с использованием двусторонних вероятностных связей, подтвердил правомерность отнесения второго и четвертого вариантов к множеству эффективных решений для первой страты данных. Результаты расчетов показали, что второй и четвертый варианты образуют устойчивые районы эффективности, границы которых четко определены и не перекрываются с районами других вариантов. Это говорит о том, что данные варианты сохраняют свою эффективность при любых возможных комбинациях весовых коэффициентов критериев, что является важным свойством робастности решений [23].

Анализ второй страты данных (рис. 4.11 (б)), содержащей агрегированные показатели эксплуатации объектов инфраструктуры, выявил еще более выраженную картину доминирования одного варианта распределения ресурсов. Метод оценки Фишберна показал, что второй вариант является единственным эффективным решением для всех шести исследованных предпочтений вероятностных характеристик. Максимальное значение эффективности для этого варианта составило 0,7810, что существенно превышает оценки всех остальных вариантов при любых комбинациях предпочтений. Весовые коэффициенты, определяемые методом Фишберна для второй страты, остались на том же уровне, что и для первой страты, поскольку количество критериев не изменилось.

Применение метода районирования на основе системы интервальных структурированных связей ко второй страте данных полностью подтвердило выводы, полученные методом Фишберна, относительно структуры множества эффективных решений, но при этом обеспечило значительно более высокую количественную оценку эффективности. Для второго варианта достигнуто максимальное значение эффективности 0,9570, что на 22,5 процента превышает оценку, полученную методом Фишберна. Столь высокое значение эффективности свидетельствует о том, что второй вариант распределения ресурсов практически оптимален с точки зрения всех рассматриваемых критериев и представляет собой наилучшее компромиссное решение для задачи управления инфраструктурными объектами транспортной системы.

Сравнительный анализ результатов, полученных различными методами для обеих стратег данных, позволяет сделать несколько важных выводов относительно эффективности аналитических инструментов снятия неопределённости в сложных многоуровневых пассажирских транспортных системах. Во-первых, все три исследованных метода демонстрируют согласованность в определении структуры множества эффективных решений. Это означает, что выявленные эффективные варианты распределения ресурсов являются объективно обоснованными и не зависят от специфики применяемого метода расчёта. Такая согласованность результатов повышает доверие к полученным выводам и свидетельствует о корректности методологии исследования [23].

Во-вторых, методы районирования обеспечивают существенно более высокие количественные оценки эффективности по сравнению с методом оценки Фишберна. Для первой стратегии данных превышение составляет от 21 до 100 процентов в зависимости от рассматриваемого варианта, для второй стратегии разница достигает 22,5 процента. Это объясняется тем, что методы районирования используют более совершенный математический аппарат учета взаимосвязей между критериями и позволяют более полно реализовать потенциал эффективности каждого варианта решения. В практическом плане это означает, что

применение методов районирования позволяет выявить дополнительные резервы повышения эффективности использования ресурсов транспортной системы.

В-третьих, среди двух исследованных методов районирования метод на основе системы интервальных структурированных связей демонстрирует лучшие результаты с точки зрения достижения максимальных количественных оценок эффективности. Для первой страты данных этот метод обеспечивает оценки на уровне 0,8470 и 0,9560 для эффективных вариантов, для второй страты достигается значение 0,9570. Такие высокие оценки свидетельствуют о том, что метод интервальных структурированных связей наиболее адекватно отражает реальную эффективность вариантов распределения ресурсов.

В-четвёртых, устойчивость структуры множества эффективных решений при различных вариантах предпочтений критериев является важным практическим свойством исследуемых методов. Тот факт, что эффективные варианты сохраняют свой статус при изменении приоритетов критериев, свидетельствует о робастности полученных решений и их применимости в условиях изменяющихся требований к функционированию пассажирской транспортной системы. Это особенно важно для задач стратегического планирования, где необходимо обеспечить эффективность решений в долгосрочной перспективе при возможных изменениях целевых установок.

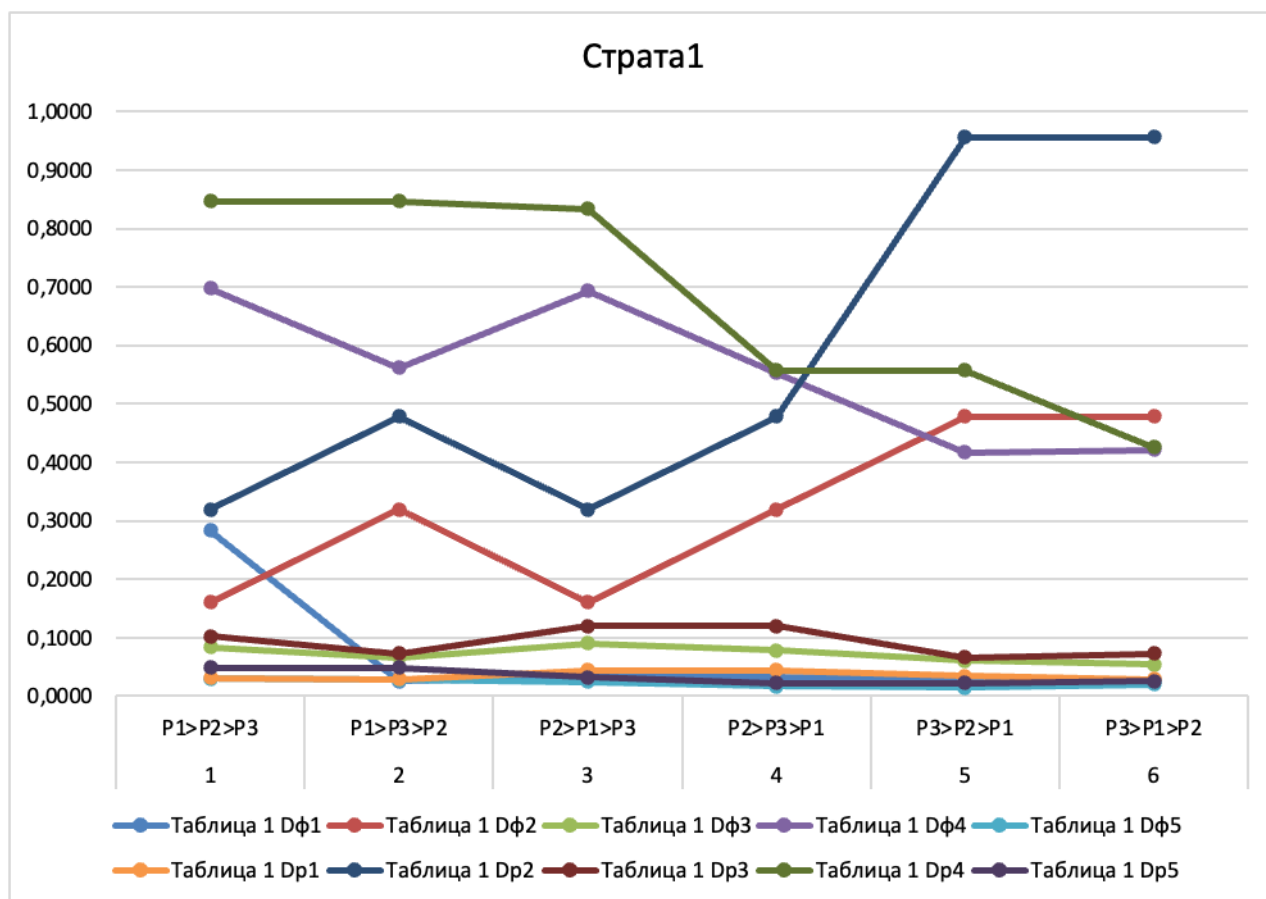


Рисунок 4.11 (а) – Результаты расчёта эффективности сравниваемых видов транспорта для набора из 6-и возможных предпочтений (страта 1). Источник: [разработано автором]

Полученные результаты имеют важное значение для формирования методологии управления ресурсами в сложных транспортных системах. Они показывают, что для достижения максимально возможного эффекта от распределения ресурсов необходимо применение передовых аналитических инструментов, основанных на теории принятия решений в условиях неопределённости. При этом выбор конкретного метода должен определяться спецификой решаемой задачи и требованиями к точности количественных оценок эффективности. Для задач, где критичным является достижение максимальных значений эффективности при текущих параметрах системы, наиболее целесообразным представляется применение метода районирования на основе системы интервальных структурированных связей [23].

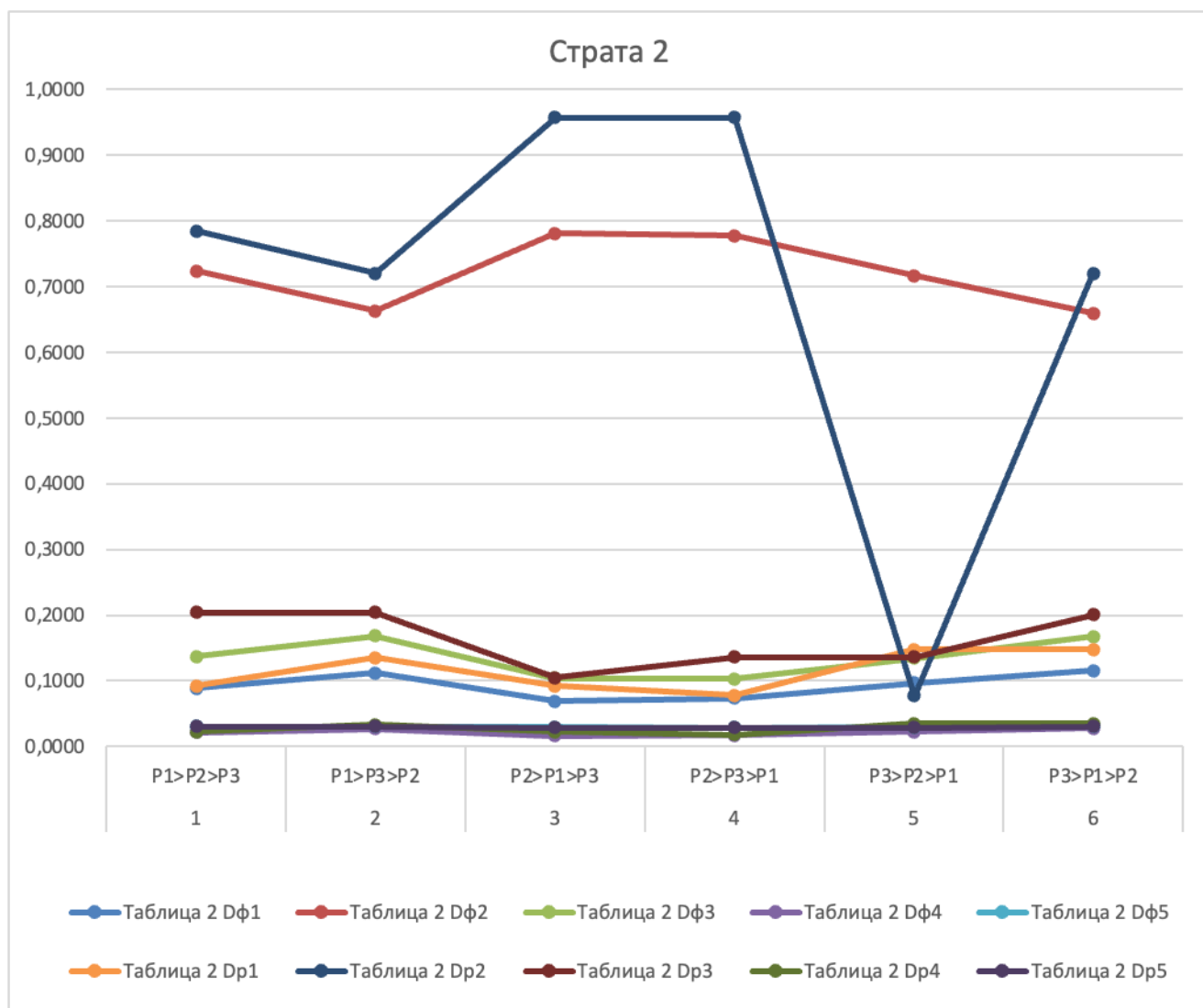


Рисунок 4.11 (б) – Результаты расчёта эффективности сравниваемых видов транспорта для набора из 6-и возможных предпочтений (страта 1). Источник: [разработано автором]

Практическая значимость проведённого анализа заключается в том, что он позволяет обосновать выбор аналитического инструментария для конкретных задач управления ресурсами в городских пассажирских транспортных системах. Результаты исследования могут быть использованы транспортными предприятиями и органами управления городским хозяйством при разработке стратегий развития транспортной инфраструктуры, оптимизации маршрутных сетей и распределении подвижного состава между различными видами транспорта. Применение рекомендованных методов позволит повысить обоснованность

принимаемых решений и обеспечить более эффективное использование ограниченных ресурсов транспортных систем.

### **Выводы по четвёртой главе**

В четвертой главе исследован и разработан комплекс математических моделей и алгоритмов поиска оптимальных решений в сложных транспортных системах в условиях неопределенности. Обосновано, что существует научная проблема, связанная с поиском оптимального решения многокритериальных задач в системах распределения ресурсов в условиях неопределенности из-за отсутствия разработок адекватного условиям задачи математического аппарата. Основной сложностью в решении задач построения эффективных систем, исследующих функционал городского пассажирского транспорта общего пользования, является не только наличие качественных критериев, но и наличие достаточно большого их количества.

Исследование аналитических методов снятия неопределённости (метод оценки Фишберна и методы районирования) показало, что:

1. Метод «оценки Фишберна» всегда будет рекомендовать единственное решение при заданном предпочтении.
2. Метод «районирования по принципу доминирования вероятностей возможных состояний внешней среды» (ДВСС) независим от устанавливаемых предпочтений, его основное назначение определить районы доминирования отдельных действий или определение вероятностных характеристик, соответствующим наборам эффективных решений по каждому из исследуемых вариантов. Далее в соответствии с ДВСС определяются парные границы между выявленными районами и определяются предпочтения при которых можно добиться эффективных решений.
3. Метод «районирования по принципу соблюдения иерархического соотношения вероятностей возможных состояний внешней среды» (СИСС)

позволяет исследовать возможные варианты эффективных решений на всем наборе возможных предпочтений. Окончательным действием СИСС является перебор всех возможных решений с выявлением максимального эффективного решения в каждом из предпочтений.

Для объективной проверки теоретических положений и сравнительной оценки эффективности исследуемых аналитических инструментов было разработано специализированное программное обеспечение на алгоритмическом языке C++, реализующее вычислительные процедуры всех трёх методов. Программный комплекс обеспечивает автоматизированное выполнение расчётов по методу оценки Фишберна и двум методам районирования с возможностью обработки больших массивов исходных данных. С использованием разработанного программного обеспечения проведен масштабный вычислительный эксперимент на двух стратах первого уровня ресурсораспределительной системы, что позволило получить представительную выборку результатов для статистически обоснованных выводов.

Комплексный анализ результатов вычислительного эксперимента привел к важному практическому выводу о том, что для ресурсораспределительных систем городского пассажирского транспорта, где требуется достижение максимально возможного эффекта от распределения ресурсов при текущих значениях исследуемых функционалов, наиболее целесообразным является применение метода районирования по принципу соблюдения иерархических соотношений вероятностей. Данный метод обеспечивает не только выявление множества эффективных решений, но и получение наиболее высоких количественных оценок эффективности, что критически важно для максимизации отдачи от ограниченных ресурсов транспортной системы. Преимущество метода особенно проявляется в ситуациях, когда распределение коэффициентов относительной важности критериев должно соответствовать текущему состоянию системы и динамично изменяющимся условиям её функционирования.

## 5. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ЦЕЛЯХ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СИСТЕМЕ НАЗЕМНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА В Г. МОСКВЕ

### 5.1 Описание и постановка вычислительного эксперимента, исходные данные для моделирования

Вычислительный эксперимент представляет собой комплексный процесс создания и исследования математических моделей изучаемого объекта с использованием специализированного программного обеспечения. В контексте настоящего исследования объектом выступает ресурсораспределительная система городского пассажирского транспорта общего пользования, функционирующая в условиях многофакторной неопределённости и требующая систематического анализа эффективности распределения ограниченных ресурсов между различными видами транспорта [23].

Основная цель проводимого вычислительного эксперимента заключается в синтезе оптимальной структуры распределения ресурсов между видами наземного пассажирского транспорта на основе многокритериального анализа показателей эффективности их функционирования. Достижение данной цели предполагает решение комплекса взаимосвязанных задач, включающих формализацию структуры системы, разработку алгоритмов оценки эффективности, проведение численных расчётов и интерпретацию полученных результатов с позиций теории принятия решений в условиях неопределённости [18].

Разработанная структура ресурсораспределительной системы городского пассажирского транспорта общего пользования обладает свойством адаптивности и может быть трансформирована для различных исследовательских задач. Данное обстоятельство обусловило необходимость создания трёх базовых моделей представления системы, построенных на едином концептуальном фундаменте, но различающихся принципами формирования морфологических матриц выбора сценариев и учётом специфических показателей эффективности.

Первая модель структуры системы основана на технологическом принципе представления показателей и предполагает, что формирование логических операторов второго иерархического уровня осуществляется исключительно из наилучших показателей эффективности, полученных на первом уровне. Такой подход позволяет сконцентрироваться на технических и технологических аспектах функционирования отдельных видов транспорта, абстрагируясь от организационных и управленческих факторов. Модель ориентирована на выявление транспортных средств с максимальной технической эффективностью и может быть использована при решении задач технического перевооружения транспортного парка.

Вторая модель базируется на организационно-технологическом принципе представления показателей на различных иерархических уровнях. В рамках данного подхода реализуется принцип формирования матрицы логических операторов второго уровня в виде набора подмножеств информационных состояний полного информационного пространства возможных решений. Данная модель учитывает не только технологические характеристики видов транспорта, но и организационные особенности их эксплуатации, включая взаимодействие различных управляющих субъектов, ответственных за функционирование транспортной системы в целом [118].

Третья модель структуры системы построена на функционально-сетевом принципе представления показателей и ориентирована на анализ транспортной системы как единого сетевого комплекса, в котором отдельные виды транспорта рассматриваются не изолированно, а в контексте их функционального взаимодействия в рамках информационно-аналитических платформ управления городской мобильностью. Такой подход соответствует современным тенденциям развития интеллектуальных транспортных систем и позволяет учитывать синергетические эффекты от интеграции различных видов транспорта.

Для реализации перечисленных моделей были разработаны три соответствующих алгоритма, представленных на рисунках 5.1 – 5.3. [150].

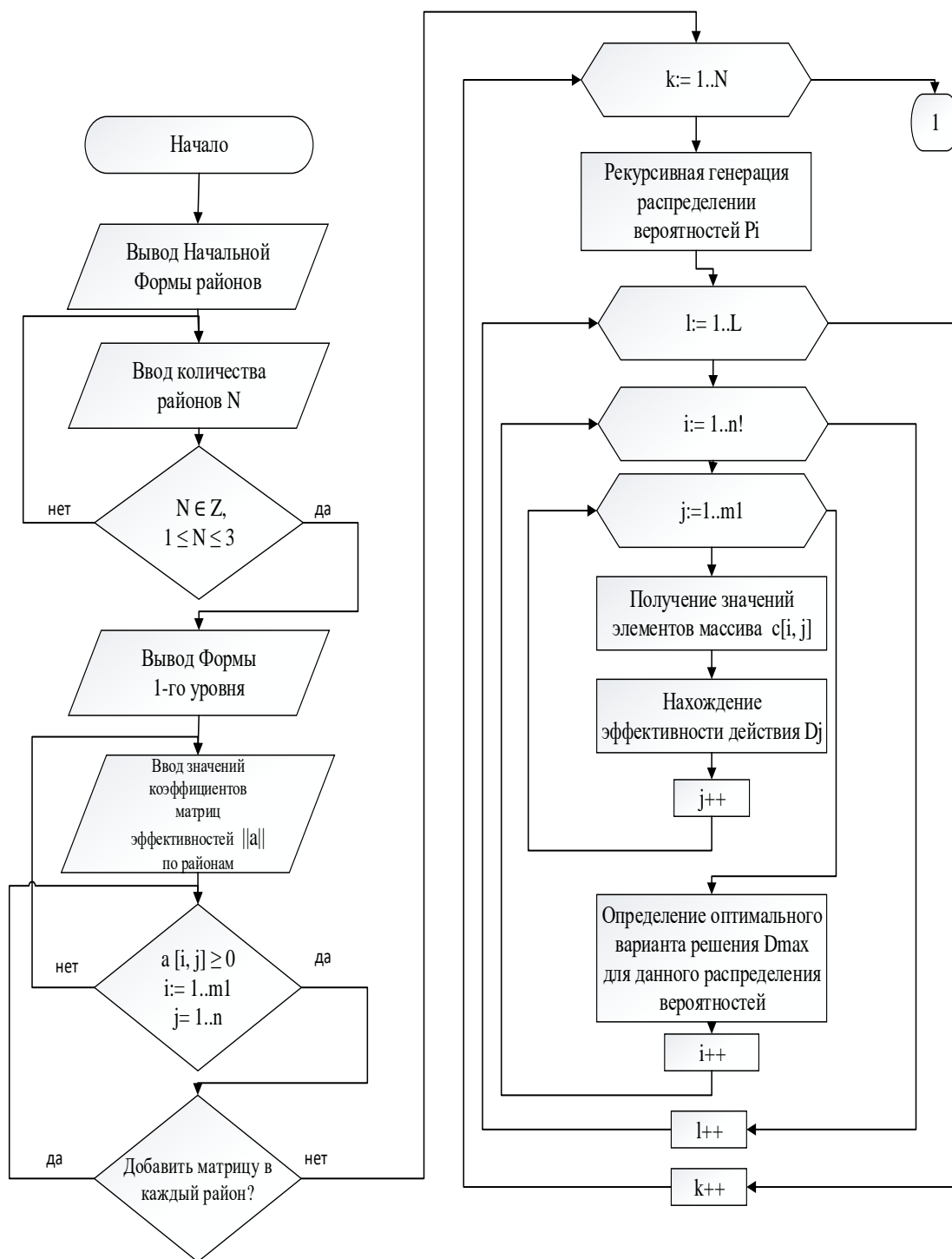


Рисунок 5.1 (а) – Алгоритм исследования эффективности функционирования отдельных видов транспорта в РР-системе ГПТОП (начало)

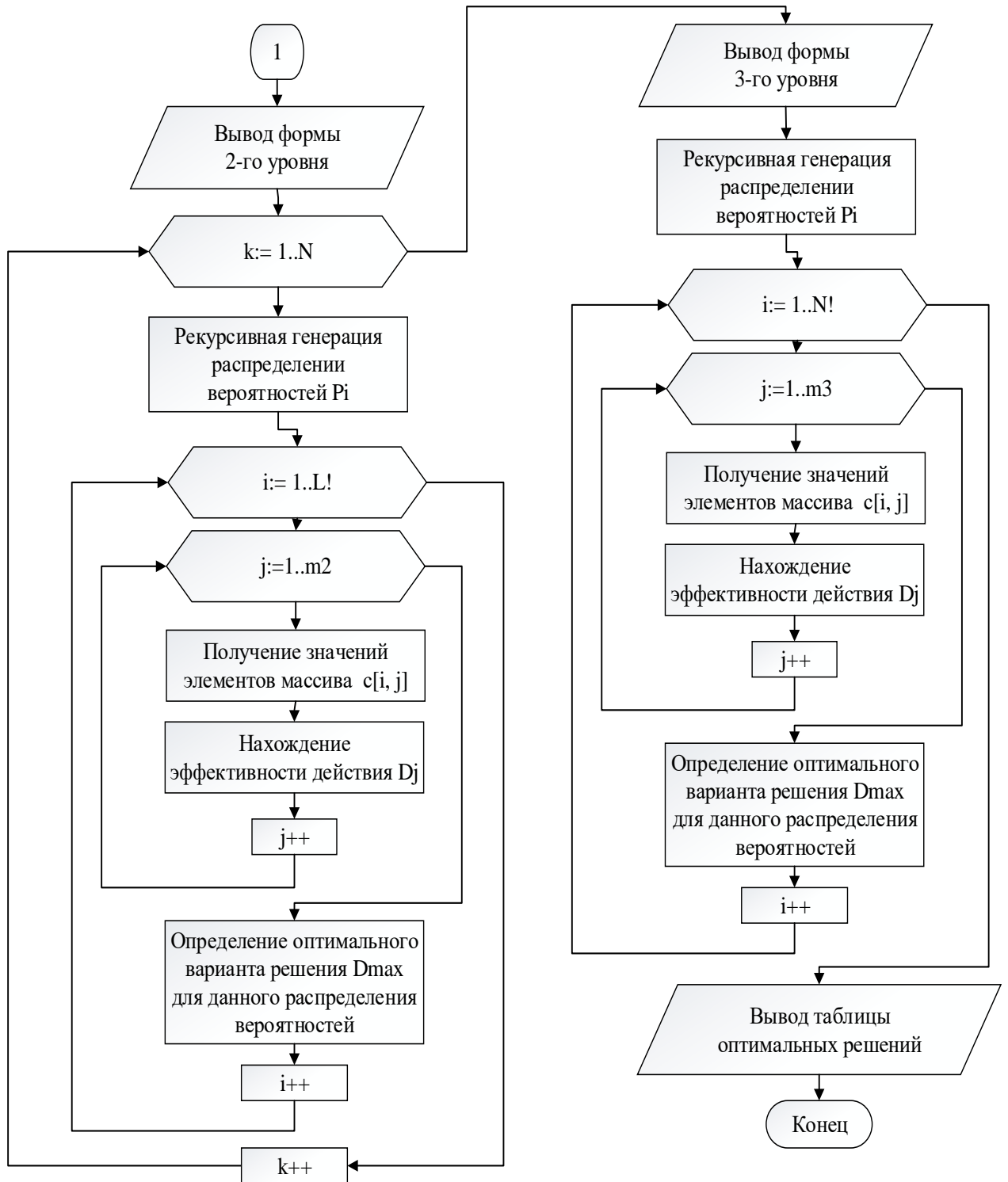


Рисунок 5.1 (б) – Алгоритм исследования эффективности функционирования отдельных видов транспорта в РР-системе ГПТОП (окончание)

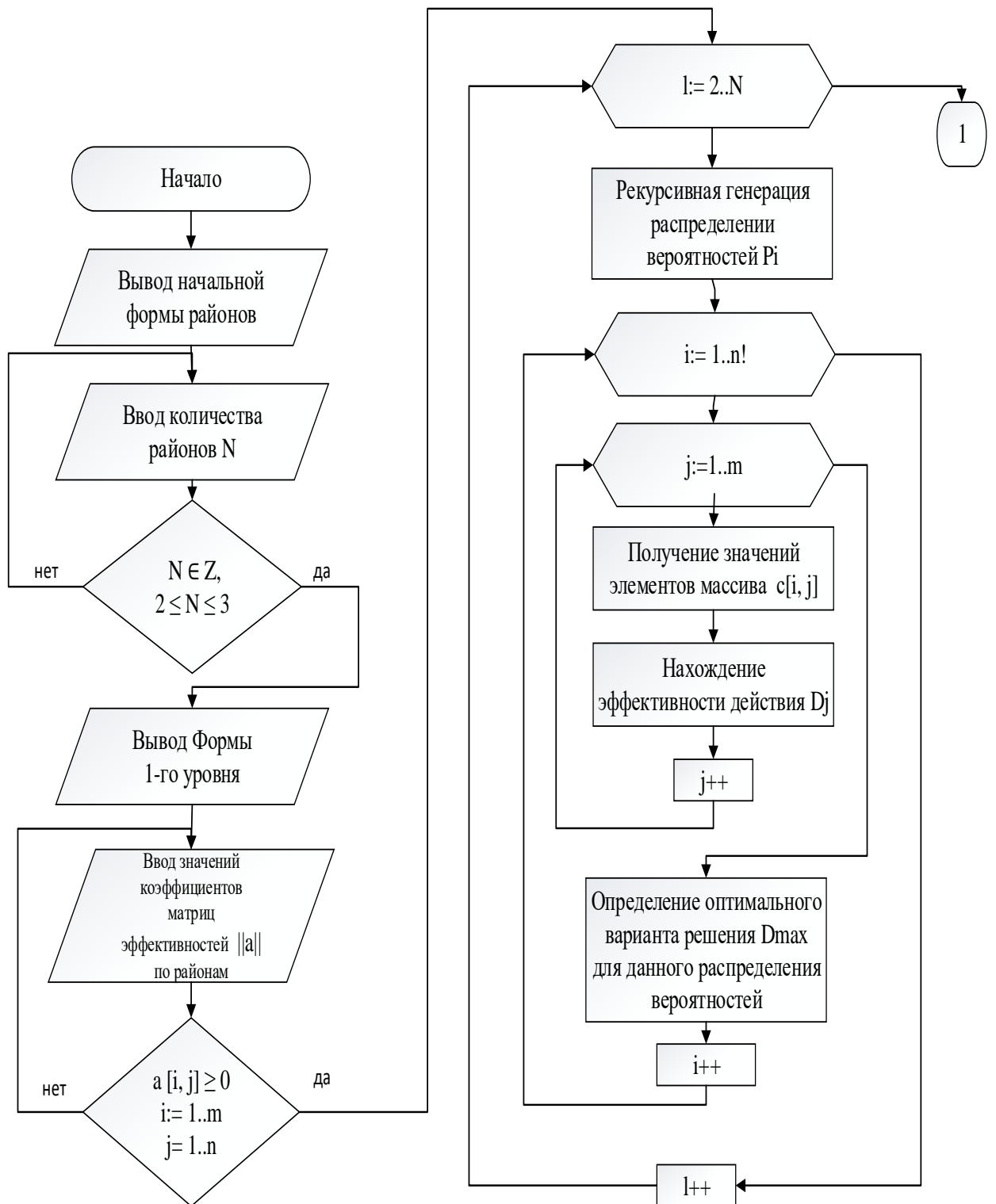


Рисунок 5.2 (а) – Алгоритм исследования эффективности действий фактических субъектов управления, отвечающих за организацию функционирования отдельных локаций транспортных систем (начало)

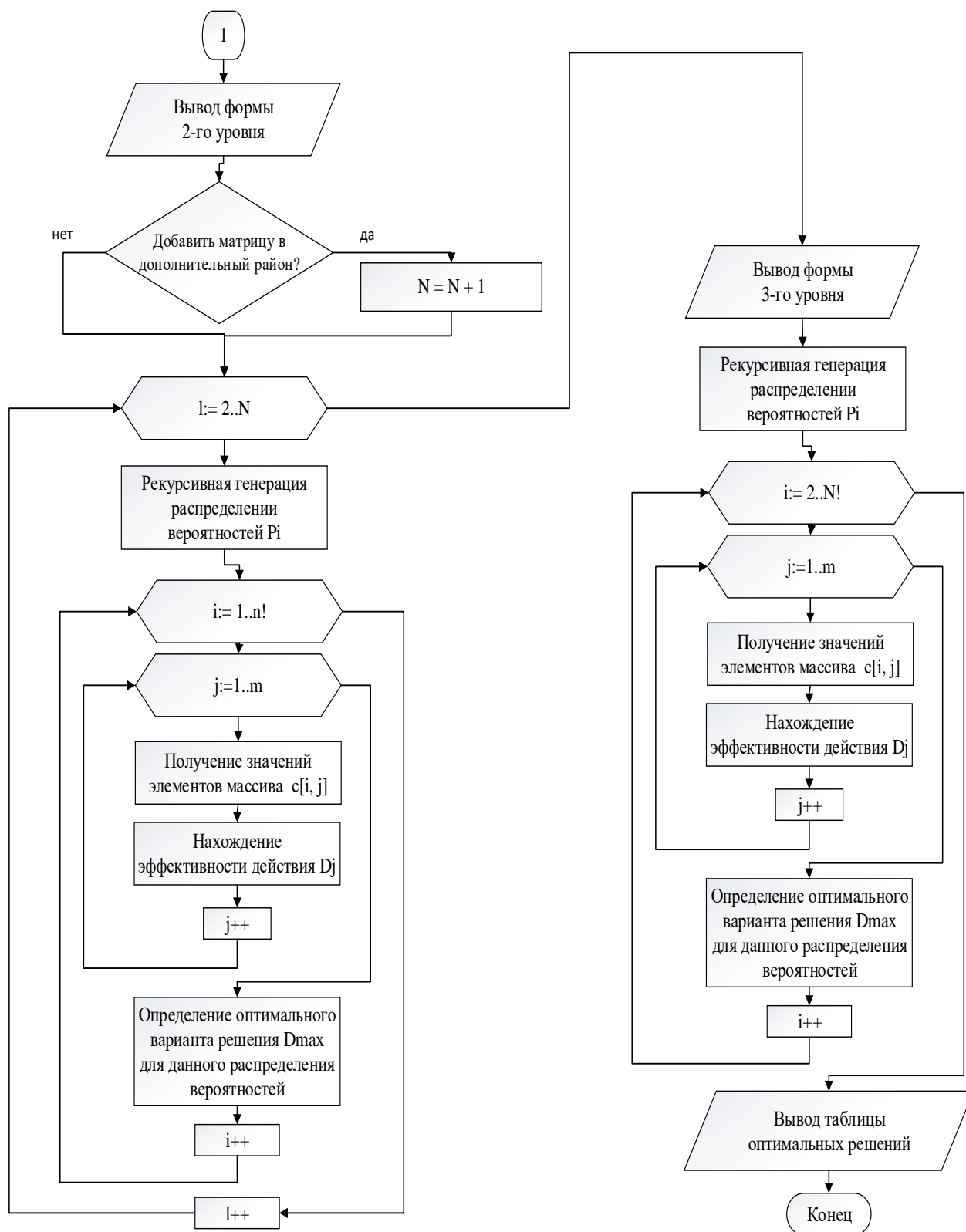


Рисунок 5.2 (б) – Алгоритм исследования эффективности действий фактических субъектов управления, отвечающих за организацию функционирования отдельных локаций транспортных систем (окончание)

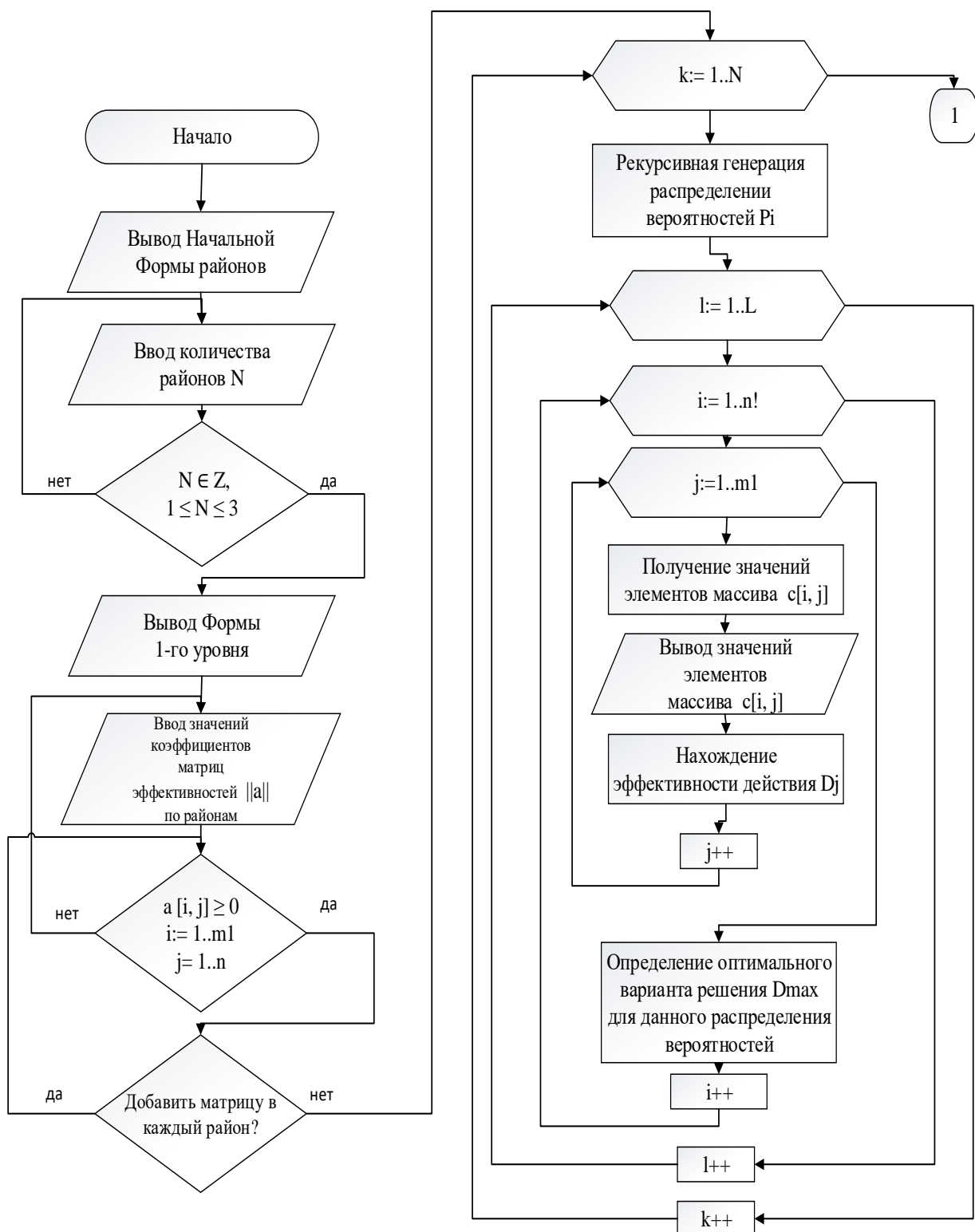


Рисунок 5.3 (а) – Алгоритм исследования эффективности функционирования транспортных систем как совокупности отдельных видов транспорта в информационно-аналитических платформах (начало)

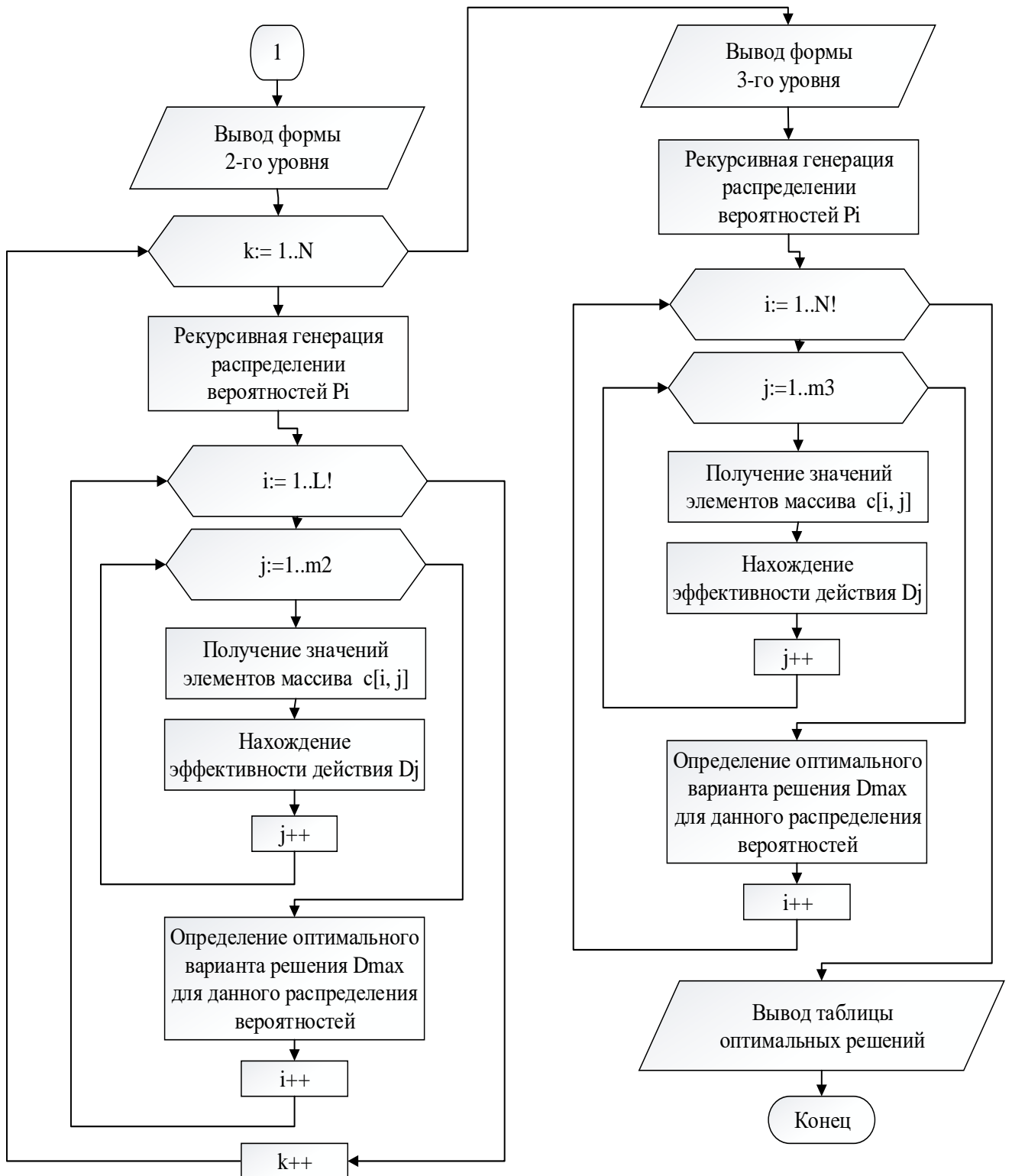


Рисунок 5.3 (б) – Алгоритм исследования эффективности функционирования транспортных систем как совокупности отдельных видов транспорта в информационно-аналитических платформах (окончание)

Первый алгоритм, изображенный на рисунке 5.1, предназначен для исследования эффективности функционирования отдельных видов транспорта в ресурсораспределительной системе и позволяет провести сравнительный анализ технико-эксплуатационных характеристик трамвая, электробуса и автобуса с двигателем внутреннего сгорания. Второй алгоритм, представленный на рисунке 5.2, обеспечивает исследование эффективности действий фактических субъектов управления, отвечающих за организацию функционирования отдельных локаций транспортных систем, что особенно актуально в условиях многосубъектности управления городским транспортом [30].

Третий алгоритм, визуализированный на рисунке 5.3, реализует исследование эффективности функционирования транспортных систем как совокупности отдельных видов транспорта в рамках информационно-аналитических платформ. Данный алгоритм учитывает возможности цифровизации транспортного комплекса и позволяет оценить эффективность распределения ресурсов с учётом интеграции различных подсистем в единое информационное пространство.

Все три разработанных алгоритма базируются на единой структуре первого иерархического уровня оценочного функционала, что обеспечивает сопоставимость результатов исследований и возможность комплексного анализа. Реализация данных алгоритмов на алгоритмическом языке C++ обеспечивает необходимую гибкость архитектуры программного обеспечения, позволяя варьировать количество исследуемых районов показателей и число страт в каждом районе в зависимости от специфики решаемой задачи. Такая структура особенно эффективна при решении многокритериальных оптимизационных задач, поскольку полная структура целеполагания первого уровня декомпозируется на несколько подсистем, в рамках каждой из которых решается задача оптимизации логических операторов существенно меньшей размерности [151].

В нашем вычислительном эксперименте на первом уровне сформированы три района (подсистемы) показателей, состоящих из трёх отдельных страт:

1. Первый район - удельные качественные показатели использования и результативные показатели эксплуатации транспортных средств, оценивающие эффективность видов транспорта в исследуемой системе распределения ресурсов.

2. Второй район – количественные показатели эксплуатации транспортных средств и инфраструктуры обслуживания с учетом степени износа основных фондов в системе распределения ресурсов.

3. Третий район – показатели удовлетворённости потребительских свойств, требуемые для обеспечения в соответствии с ГОСТ «Услуги транспортные. Пассажирские перевозки. Номенклатура показателей качества».

Формирование исходных данных для проведения вычислительного эксперимента осуществлялось на основе анализа статистической отчетности профильных организаций, научных публикаций и аналитических материалов предприятий городского пассажирского транспорта. В качестве объектов исследования были выбраны четыре основных вида наземного пассажирского транспорта, функционирующих в Москве, а именно – трамвай, электробус и автобус с двигателем внутреннего сгорания. Троллейбус был исключен из расчётов в связи с фактическим прекращением его массовой эксплуатации в городе.

Первый иерархический уровень системы показателей организован следующим образом. Страта первого района включает удельные показатели использования транспортных средств, отражающие эффективность их эксплуатации. Первый критерий данной страты представляет собой объёмный показатель эффективности эксплуатации, определяемый отношением процентного распределения выполненных объёмов работ к количеству транспортных средств. Вторым критерием характеризует производительность эксплуатации единицы подвижного состава через количество перевезенных пассажиров в миллионах человек на единицу транспортного средства. Третий критерий отражает производительность через количество выполненных пассажиро-километров в миллионах на единицу транспортного средства. Данные показатели представлены в таблице формы 1.1, причем для всех критериев установлено целеполагание на максимизацию.

Вторая страта первого района содержит показатели использования транспортных средств, оценивающие эффективность технической эксплуатации. Первый критерий представляет коэффициент использования пробега, второй характеризует коэффициент использования вместимости, третий отражает коэффициент технической готовности подвижного состава. Значения данных показателей, приведенные в форме 1.2, демонстрируют существенную дифференциацию по видам транспорта, что обусловлено различиями в технологиях эксплуатации и характеристиках подвижного состава.

Третья страта первого района включает годовые результативные показатели эксплуатации транспортных средств. Первый критерий характеризует пассажирооборот в миллионах пассажиро-километров в год, второй отражает объем перевозок в миллионах пассажиров в год, третий представляет выработку на одно пассажирское место транспортного средства в тысячах пассажиров в год. Данные показатели представлены в форме 1.3. Они позволяют оценить абсолютную результативность работы каждого вида транспорта.

Второй район показателей первого уровня включает три страты, характеризующие количественные параметры функционирования транспортной системы. Первая страта содержит показатели эффективности эксплуатации основных фондов, включая количество эксплуатируемых транспортных средств в единицах, степень износа основных фондов в процентах и провозную способность видов транспорта с учётом развитости инфраструктуры в пассажирах в час. Форма 1.4 демонстрирует, что для первых двух критериев установлено целеполагание на минимизацию, тогда как для третьего критерия целевой функцией является максимизация.

Вторая страта второго района характеризует эффективность эксплуатации транспортной инфраструктуры через стоимость эксплуатации видов транспорта в рублях на километр пробега, количество маршрутов по видам транспорта в единицах и протяженность инфраструктурной сети в километрах. Данные показатели, представленные в форме 1.5, отражают масштаб развития каждого вида

транспорта и его роль в обеспечении транспортной доступности различных районов города.

Третья страта второго района включает удельные показатели, оценивающие количество разнородных по функционалу объектов инфраструктуры, приходящихся на единицу транспортного средства. Рассматриваются количество объектов для хранения подвижного состава, количество маршрутных объектов обслуживания и количество объектов технического обслуживания и текущего ремонта. Форма 1.6 содержит значения данных показателей.

Третий район показателей первого уровня посвящен оценке удовлетворенности потребительских свойств транспортных услуг в соответствии с требованиями государственных стандартов. Первая страта данного района включает показатели скорости движения транспортных средств, необходимых интервалов движения и соблюдения расписания, измеряемые в балльной шкале. Форма 1.7 представляет экспертные оценки данных показателей, полученные на основе социологических опросов пассажиров и анализа статистики работы диспетчерских служб.

Вторая страта третьего района характеризует обеспеченность безопасности и комфорта в салоне транспортного средства, а также удобство расположения остановочных пунктов. Критерии данной страты оценивают комфорт доступности транспорта, обеспеченность безопасности через наличие запасных выходов и средств эвакуации, а также обеспеченность комфорта, обусловленную эргономическими качествами и климатическими условиями. Балльные оценки, приведенные в форме 1.8, отражают субъективное восприятие качества транспортного обслуживания пассажирами.

Третья страта третьего района содержит показатели качества индивидуального транспортного обслуживания, включая обеспеченность местами для сидения, удобство проезда с багажом и удобство информационного обеспечения. Форма 1.9 демонстрирует балльные оценки данных показателей.

Второй иерархический уровень системы показателей представляет собой дополнительный район исследования, имеющий межотраслевое значение.

Единственная страта данного уровня включает показатели экологической безопасности, безопасности дорожного движения и обеспечения передвижения маломобильных граждан. Первый критерий характеризует экологическую безопасность через выбросы с учётом производства и доставки топлива, а также при движении транспорта в граммах на пассажиро-километр. Второй критерий оценивает безопасность дорожного движения через количество дорожно-транспортных происшествий, совершённых по вине водителя на одного перевезённого пассажира. Третий критерий отражает долю транспортных средств, оборудованных для перевозки маломобильных пассажиров в процентах. Форма 1.10 содержит значения данных показателей, причём для первых двух критериев установлено целеполагание на минимизацию, а для третьего на максимизацию.

Представленная система показателей образует многомерное пространство критериев оценки эффективности функционирования видов транспорта, которое служит основой для проведения многокритериального анализа и синтеза оптимальной структуры распределения ресурсов. Комплексный характер системы показателей обеспечивает учет технических, экономических, экологических и социальных аспектов функционирования транспортной системы, что соответствует современным требованиям устойчивого развития городской мобильности.

### **Первый иерархический уровень.**

**1. Первый район** - удельные качественные показатели использования и результативные показатели эксплуатации транспортных средств, оценивающие эффективность видов транспорта в исследуемой РР-системе.

**Страта 1.1.** – Удельные показатели использования транспортных средств, отражающие эффективность их эксплуатации в РР-системе ГПТОП:

К1 – объемный показатель эффективности эксплуатации транспортных средств или удельный показатель, определяемый отношением процентного распределения выполненных объемов работ в РР-системе ГПТОП к количеству транспортных средств);

К2 – показатель производительности эксплуатации единицы транспортного средства, или количество перевезенных пассажиров, приходящихся на единицу транспортного средства, млн. чел./ед.;

К3 – показатель производительности эксплуатации транспортного средства или количество выполненных пассажира-километров, приходящиеся на единицу транспортного средства, млн. пассаж-км/ед.

Форма 1.1 – Удельные показатели использования транспортных средств, отражающие эффективности их эксплуатации в РР-системе ГПТОП

Вариант решения \ Критерий	К1	К2	К3
Трамвай	0,0053	0,217	1,283
Троллейбус (исключён из расчётов)	0,0055	0,078	0,003
Электробус	0,0017	0,091	0,338
Автобус (ДВС)	0,0054	0,183	0,749
Целеполагание	<i>max</i>	<i>max</i>	<i>max</i>

**Страта 1.2** – Показатели использования транспортных средств, оценивающие эффективность технической эксплуатации транспортных средств в РР-системе ГПТОП:

К1 – коэффициент использования пробега транспортных средств;

К2 – коэффициент использования вместимости транспортных средств;

К3 – коэффициент технической готовности транспортных средств.

Форма 1.2 – Показатели использования транспортных средств, оценивающие эффективность технической эксплуатации транспортных средств в РР-системе ГПТОП

Критерий Вариант решения	К1	К2	К3
Трамвай	0,95	0,45	0,89
Троллейбус (исключён из расчётов)	0,94	0,67	0,87
Электробус	0,86	0,54	0,78
Автобус (ДВС)	0,98	0,48	0,75
Целеполагание	<i>max</i>	<i>max</i>	<i>max</i>

**Страта 1.3** – Годовые результативные показатели эксплуатации транспортных средств в РР-системе ГПТОП:

К1 – пассажирооборот млн. пасс-км/год;

К2 – объём перевозки, млн. пасс. /год;

К3 – выработка на 1- пассажира-место транспортного средства, тыс. пасс/год.

Форма 1.3 – Результативные показатели эксплуатации транспортных средств в РР-системе

Критерий Вариант решения	К1	К2	К3
Трамвай	898,75	152,2	1,815
Троллейбус (исключён из расчётов)	0,0611	0,0142	0,011
Электробус	434,01	117,3	1,503
Автобус (ДВС)	3595,7	877	3,045
Целеполагание	<i>max</i>	<i>max</i>	<i>max</i>

**2. Второй район** – количественные показатели эксплуатации транспортных средств и инфраструктуры обслуживания с учётом степени износа основных фондов в РР-системе ГПТОП.

**Страта 2.1.** - Количественные показатели, оценивающие эффективность эксплуатации основных фондов в РР-системе ГПТОП:

К1 – количество эксплуатируемых транспортных средств, ед.;

К2 – степень износа основных фондов, процентов, %;

К3 – провозная способность видов транспорта с учётом развитости транспортной инфраструктуры, пассаж/т.

Форма 1.4 – Количественные показатели, оценивающие эффективность эксплуатации основных фондов в РР-системе ГПТОП

Критерий Вариант решения	К1	К2	К3
Трамвай	700	60,8	9000
Троллейбус (исключён из расчётов)	18	54,2	4500
Электробус	1300	15,3	4800
Автобус (ДВС)	4800	43,5	4500
Целеполагание	<i>min</i>	<i>min</i>	<i>max</i>

**Страта 2.2** – Количественные показатели эффективности эксплуатации транспортной инфраструктуры:

К1 – стоимость эксплуатации видов транспорта с существующей инфраструктурой, руб./1 км. Пробега;

К2 – количество маршрутов по видам транспорта, ед.;

К3 – протяжённость инфраструктурной сети по видам транспорта, км.

Форма 1.5 – Количественные показатели эффективности эксплуатации транспортной инфраструктуры

Критерий Вариант решения	К1	К2	К3
Трамвай	35,3	43	183,1
Троллейбус (исключен из расчётов)	47,2	1	9,5
Электробус	66,3	117	790
Автобус (ДВС)	59,7	795	7995,5
Целеполагание	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>max</i>

**Страта 2.3** – Удельные показатели, оценивающие количество разнородных по функционалу объектов инфраструктуры, приходящихся на единицу транспортного средства:

К1 – количество объектов инфраструктуры, необходимых для хранения транспортных средств, ед.;

К2 – количество маршрутных объектов инфраструктуры обслуживания транспортной системы;

К3 – количество объектов инфраструктуры, выполняющих техническое обслуживание и текущий ремонт (ТО и ТР) транспортных средств в РР-системе ГПТОП.

Форма 1.6 – Удельные показатели, оценивающие количество разнородных по функционалу объектов инфраструктуры, приходящихся на единицу транспортного средства

Критерий Вариант решения	К1	К2	К3
Трамвай	0,007	1,368	0,006
Троллейбус (исключен из расчётов)	0,056	0,443	0,056
Электробус	0,003	1,076	0,002
окончание формы 1.6			
	К1	К2	К3

Автобус (ДВС)	0,004	0,750	0,004
Целеполагание	<i>min</i>	<i>min</i>	<i>min</i>

**3. Третий район** – показатели удовлетворённости потребительских свойств, требуемые для обеспечения в соответствии с ГОСТ «Услуги транспортные. Пассажирские перевозки. Номенклатура показателей качества».

**Страта 3.1** – показатели скорости движения транспортных средств, необходимых интервалов движения и соблюдения расписания движения транспортных средств:

К1 – скорость движения транспортных средств, балл;

К2 – необходимый интервал движения для удовлетворения пассажиропотока, балл;

К3 – соблюдение расписания движения транспортными средствами, балл.

Форма 1.7 – Показатели скорости движения транспортных средств, необходимых интервалов движения и соблюдения расписания движения транспортных средств

Критерий Вариант решения	К1	К2	К3
Трамвай	3,9	3,6	4,6
Троллейбус (исключен из расчётов)	3,6	4,0	4,2
Электробус	3,7	3,9	4,1
Автобус (ДВС)	3,6	4,1	4,2
Целеполагание	<i>max</i>	<i>max</i>	<i>max</i>

**Страта 3.2** – показатели обеспеченности безопасности и комфорта в салоне, а также удобства расположения остановочных пунктов:

К1 – удобство расположения остановочных пунктов на маршрутной сети, комфорт доступности транспорта, балл;

К2 – обеспеченность безопасности в салоне транспортного средства, определяемая наличием запасных выходов, средств и удобства эвакуации в случае

дорожно-транспортных происшествий и чрезвычайных ситуаций на транспорте, балл;

К3 – обеспеченность комфорта в салоне транспортного средства, обусловленная эргономическому качествами и климатическими условиями, балл.

Форма 1.8 – Показатели обеспеченности безопасности и комфорта в салоне, а также удобства расположения остановочных пунктов

Критерий Вариант решения	К1	К2	К3
Трамвай	2,9	3,5	3,6
Троллейбус (исключен из расчётов)	3,8	3,1	3,3
Электробус	3,5	3,1	3,4
Автобус (ДВС)	3,8	3,0	3,3
Целеполагание	<i>max</i>	<i>max</i>	<i>max</i>

**Страта 3.3** – Показатели качества индивидуального транспортного обслуживания пассажиров:

К1 – обеспеченность местами для сидения, балл.

К2 – удобство проезда с багажом, балл

К3 – удобство информационного обеспечения, балл

Форма 1.9 – Показатели качества индивидуального транспортного обслуживания пассажиров

Критерий Вариант решения	К1	К2	К3
Трамвай	3,2	3,4	4,6
Троллейбус (исключен из расчётов)	2,9	3,3	4,5
Электробус	3,0	3,2	4,1
окончание формы 1.9			
	К1	К2	К3

Автобус (ДВС)	2,9	3,2	4,1
Целеполагание	<i>max</i>	<i>max</i>	<i>max</i>

**Второй иерархический уровень** или дополнительный район исследования показателей в РР-системе, имеющий межотраслевое значение.

**Страта 2.1** – Показатели экологической безопасности, безопасности дорожного движения и обеспечения передвижения маломобильных граждан:

К1 – экологическая безопасность, выбросы с учётом производства и доставки топлива, а также при движении транспорта, г/ пасс-км;

К2 – критерий безопасность дорожного движения (количество ДТП, совершённых по вине водителя на 1-го перевезенного пассажира в РФ);

К3 – доля транспортных средств, оборудованных для перевозки маломобильных пассажиров, %.

Форма 1.10 – Показатели экологической безопасности, безопасности дорожного движения и обеспечения передвижения маломобильных граждан

Критерий Вариант решения	К1	К2	К3
Трамвай	0,02	0,11	10,3
Троллейбус (исключен из расчётов)	0,03	0,27	41,3
Электробус	0,07	0,35	85,5
Автобус (ДВС)	0,19	0,45	93,1
Целеполагание	<i>min</i>	<i>min</i>	<i>max</i>

## 5.2 Применение разработанного программного обеспечения для проведения вычислительного эксперимента

### 5.2.1 Специализированное ПО, реализующее модель, основанную на технологическом принципе представления показателей

Под распределением ресурсов следует понимать распределение в соответствии с планируемым количеством и качеством рейсов пассажирского транспорта с целью достижения максимального значения эффективности.

Ниже на рисунках 5.4 ... 5.7 представлены интерфейсы работы СПО, реализующие последовательность вычислительного эксперимента в РР-системе.

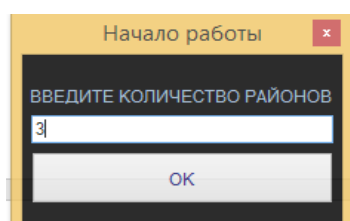


Рисунок 5.4 – Инициализации СПО, введение количество районов (подсистем) исследуемых показателей. В данном случае 3 района на 1-ом иерархическом уровне

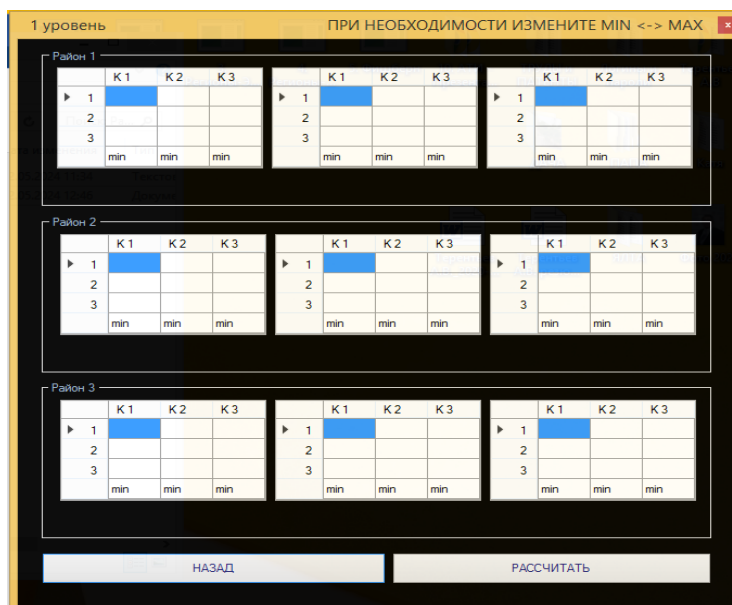


Рисунок 5.5 – Формирование интерфейса блока исходных данных. В соответствии с установленной структурой исследуемых показателей в каждом районе (подсистеме) располагаются три страты

В процессе подготовки вычислительного эксперимента было выявлено, что для исследуемой транспортной системы г. Москвы характерно практически полное

отсутствие троллейбусного движения (закрыто в 2020 г.), а именно: протяжённость маршрутной сети – 9,5 км; количество маршрутов – 1 (музейный); количество перевезенных пассажиров 14 000 пассаж. /год. Поэтому «троллейбус», как вариант принятия решения в СПО, исключается.

1 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

**Район 1**

	К 1	К 2	К 3
1	0,0053	0,217	1,283
2	0,017	0,091	0,338
3	0,0054	0,183	0,749
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,95	0,45	0,89
2	0,86	0,54	0,78
3	0,98	0,48	0,75
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	898,75	152,2	1,815
2	434,01	117,3	1,503
3	3595,7	877	3,045
▶	max	max	max

**Район 2**

	К 1	К 2	К 3
1	700	60,8	9000
2	1300	15,3	4800
3	4800	43,5	4500
▶	min	min	max

	К 1	К 2	К 3
1	35,3	43	183,1
2	66,3	117	790
3	59,7	795	799,5
▶	min	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,007	1,368	0,006
2	0,003	1,076	0,002
3	0,004	0,750	0,004
▶	min	min	min

**Район 3**

	К 1	К 2	К 3
1	3,9	3,6	4,6
2	3,7	3,9	4,1
3	3,6	4,1	4,2
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	2,9	3,5	3,6
2	3,5	3,1	3,4
3	3,8	3,0	3,3
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	3,2	3,4	4,6
2	3,0	3,2	4,1
3	2,9	3,2	4,1
▶	max	max	max

НАЗАД
РАССЧИТАТЬ

Рисунок 5.6 – Формирование блока исходных данных в трех подсистемах для трёх страт и трёх вариантов принятия решений: вариант 1 – «Трамвай»; вариант 2 – «Электробус»; вариант 3 – «Автобус» (ДВС)

Процедура расчёта при реализации алгоритма, реализующего модель, основанную на технологическом принципе представления показателей,

предполагает, что при переходе с предыдущего уровня на последующий количество вариантов решений остаётся неизменным и соответствуют трём исследуемым видам транспорта.

В данном вычислительном эксперименте применяется исследовательское ПО, позволяющие изменять при необходимости возможное количество вариантов решений (достаточно задать на правом иерархическом уровне величины необходимое значение  $n$ ). То есть количество сравниваемых видов транспорта может быть произвольной величиной. При практическом использовании данного алгоритма целесообразно создавать специализированные интерфейсы, полностью отражающие структуру исследуемых, характерных для локации применения СПО. Это позволит значительно сократить количество вычислительных процедур, и соответственно время обработки данных для получения результата.

Количество исследуемых подсистем в данном ПО (вычислительном эксперименте), также, как и количество содержащихся в них страт, является переменной величиной, задаваемой на начальном этапе эксперимента. Аналогично, как и в случае с количеством рассматриваемых вариантов решений при практическом применении СПО, рекомендуется их идентифицировать для исследуемой локации.

Следующим этапом вычислительного эксперимента является нормирование исследуемых показателей, производимое независимо для каждой страты на первом иерархическом уровне исследуемой РР-системы ГПТОП и формирование структуры показателей в виде относительных значений с учётом целеполагания. Нормирование исследуемых показателей производится единственный раз на первом этапе вычислений, а перевод их значений в относительные единицы с учётом целеполагания может производиться на любом уровне исследуемой системы в зависимости от характера исследуемой ИС. На рисунке 5.4 демонстрируется интерфейс СПО, в котором производится нормирование и установка необходимого целеполагания.

В интерфейсе первого уровня активизация функции «рассчитать» автоматически предполагает нормирование исследуемых показателей, а установка

целеполагания производится в ручном режиме. При необходимости данная процедура для практического СПО может быть полностью автоматизирована и активизироваться на этапе ввода начальных данных.

1 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

**Район 1**

	К 1	К 2	К 3
1	0,191	0,442	0,541
2	0,614	0,185	0,142
3	0,195	0,373	0,316
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,340	0,306	0,368
2	0,308	0,367	0,322
3	0,351	0,327	0,310
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,182	0,133	0,285
2	0,088	0,103	0,236
3	0,730	0,765	0,479
▶	max	max	max

**Район 2**

	К 1	К 2	К 3
1	0,594	0,157	0,492
2	0,319	0,624	0,262
3	0,087	0,220	0,246
▶	min	min	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,471	0,045	0,103
2	0,251	0,122	0,446
3	0,278	0,832	0,451
▶	min	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,197	0,244	0,182
2	0,459	0,310	0,545
▶ 3	0,344	0,445	0,273
	min	min	min

**Район 3**

	К 1	К 2	К 3
1	0,348	0,310	0,357
2	0,330	0,336	0,318
3	0,321	0,353	0,326
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,284	0,365	0,350
2	0,343	0,323	0,330
3	0,373	0,312	0,321
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,352	0,347	0,359
2	0,330	0,326	0,320
3	0,319	0,326	0,320
▶	max	max	max

НАЗАД
РАССЧИТАТЬ

Рисунок 5.7 – Интерфейс СПО, в котором производится нормирование и установка необходимого целеполагания в исследуемой РР-системе ГПТОП

Следующим этапом вычислительного эксперимента является перевод исследуемой РР-системы ГПТОП на второй иерархический уровень. Второй иерархический уровень в данном случае формируется из расчёта полученных

наилучших значений расчёта возможных вариантов решений на 1-ом иерархическом уровне ( $K1_{max}$ ,  $K2_{max}$ ,  $K3_{max}$ ). Количество вариантов решений (видов транспорта, естественно, сохраняется), при этом алгоритм расчёта предполагает, что на второй иерархический уровень переводятся решения, эффективность которых – наивысшая (максимальная) и достигается за счёт оптимального распределения ресурсов в каждой подсистеме 1-го иерархического уровня – максимального значения в отдельных подсистемах первого уровня. Тогда количество исследуемых подсистем 2-го уровня определяется количеством подсистем на 1-ом иерархическом уровне, но количество страт в каждой подсистеме первого уровня сокращается до единицы. На рисунке 5.8 представлен интерфейс исследования РР-системы второго уровня. Переход ко второму уровню производится в СПО автоматически.

2 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX В ДО... x

ДОБАВИТЬ ТАБЛИЦУ

РАССЧИТАТЬ

Район 1

	K1	K2	K3
▶ K1 max	0,541	0,368	0,285
K2 max	0,614	0,367	0,236
K3 max	0,373	0,351	0,765
min-max	min	min	min

Район 2

	K1	K2	K3
▶ K1 max	0,594	0,471	0,244
K2 max	0,624	0,446	0,545
K3 max	0,246	0,832	0,445
min-max	min	min	min

Район 3

	K1	K2	K3
▶ K1 max	0,357	0,365	0,359
K2 max	0,336	0,343	0,330
K3 max	0,353	0,373	0,326
min-max	min	min	min

Дополнительный район

Рисунок 5.8 – Интерфейс СПО второго иерархического уровня в исследуемой РР-системе ГПТОП

В соответствии с алгоритмом проведения вычислительного эксперимента в данной модели распределения ресурсов в РР-системе ГПТОП на втором

иерархическом уровне вводится дополнительный район исследуемых показателей, имеющих межотраслевое значение:

- показатели экологической безопасности эксплуатируемых транспортных средств, (выбросы с учётом производства и доставки топлива, а также при движении транспорта, г/ пасс-км);
- показатели безопасности дорожного движения (количество ДТП, совершённых по вине водителя на 1-го перевезённого пассажира в РФ);
- показатели комфорта (в данном случае – это доля транспортных средств, оборудованных для перевозки маломобильных пассажиров, %).

Интерфейсы ввода дополнительных показателей второго уровня представлены на рисунках 5.9 (а и б).

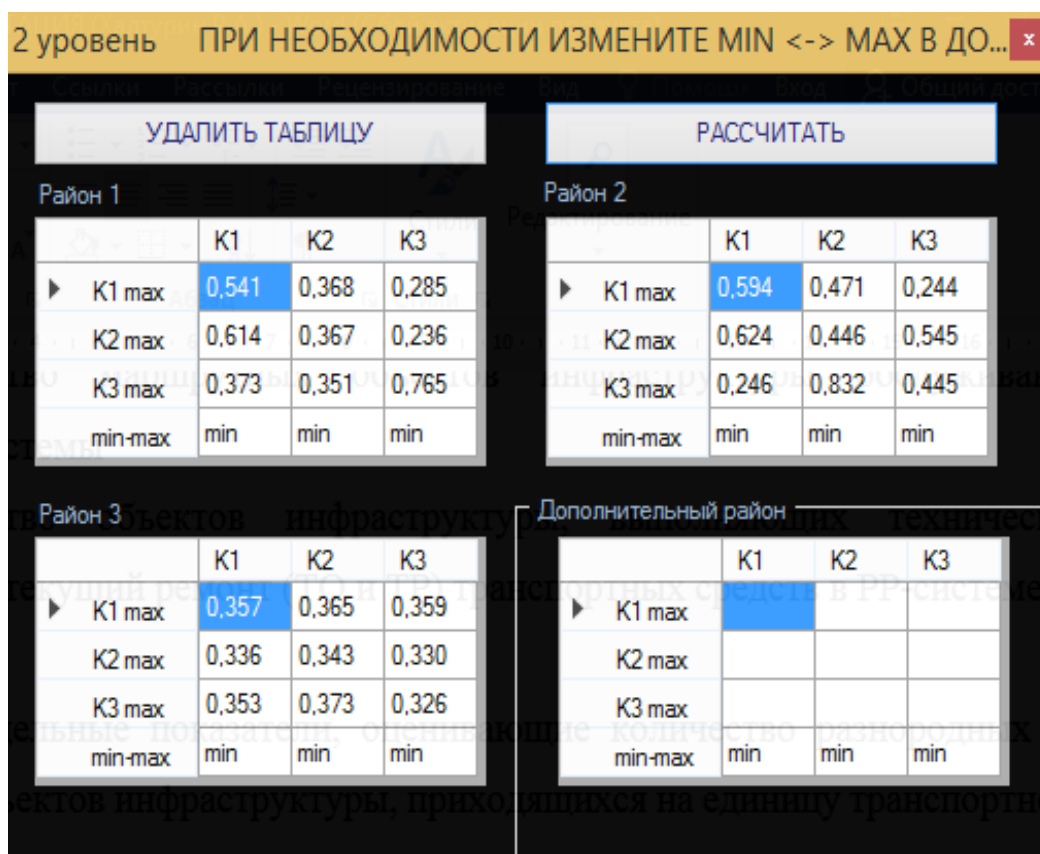


Рисунок 5.9 (а) – Интерфейс ввода дополнительных показателей второго иерархического уровня (формирование окна)

2 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX В ДО...

УДАЛИТЬ ТАБЛИЦУ
РАССЧИТАТЬ

Район 1

	K1	K2	K3
▶ K1 max	0,541	0,368	0,285
K2 max	0,614	0,367	0,236
K3 max	0,373	0,351	0,765
min-max	min	min	min

Район 2

	K1	K2	K3
▶ K1 max	0,594	0,471	0,244
K2 max	0,624	0,446	0,545
K3 max	0,246	0,832	0,445
min-max	min	min	min

Район 3

	K1	K2	K3
▶ K1 max	0,357	0,365	0,359
K2 max	0,336	0,343	0,330
K3 max	0,353	0,373	0,326
min-max	min	min	min

Дополнительный район

	K1	K2	K3
K1 max	0,02	0,11	10,3
K2 max	0,07	0,35	85,5
K3 max	0,19	0,45	93,1
min-max	min	min	max

Рисунок 5.9 (б) – Интерфейс ввода дополнительных показателей второго иерархического уровня (ввод данных и установка целеполагания)

Как и на первом иерархическом уровне, а рамках отдельной страты производится нормирование значений исследуемых показателей и перевод их в относительные единицы с учётом целеполагания. Количество возможных решений и их номенклатур в дополнительной подсистеме идентифицировано с количеством решений, исследуемых на первом иерархическом уровне.

Следующим этапом вычислительного эксперимента является формирование, структуризация и постановка оптимизационной задачи на втором иерархическом уровне, решение которой должно привести к вычислению значений эффективности исследуемых видов транспорта с учётом всех уставленных в РР-системе критериев и оценочного функционала. На рисунке 5.10 приведён интерфейс решения оптимизационной задачи на втором иерархическом уровне, результатом которого является оценочная подсистема третьего иерархического уровня.

2 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX В ДО...

1 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

3 уровень

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВТОРОГО УРОВНЯ

	K1	K2	K3	K4
K1 max	0.541	0.594	0.365	0.719
K2 max	0.614	0.624	0.343	0.452
K3 max	0.765	0.832	0.373	0.493
min-max	max	max	max	max

Рисунок 5.10 – Интерфейс решения оптимизационной задачи на втором иерархическом уровне в РР-системе ГПТОП

Важно отметить, что количество критериев эффективности в оптимизационной задаче второго иерархического уровня является суммой количества подсистем первого иерархического уровня и второго иерархического уровня (в данном случае  $K_n = 4$ ).

Следующим этапом (финальным при заданных границах исследуемой системы) является решение оптимизационной задачи на третьем иерархическом уровне и вывод результатов расчёта на печать. Решение задачи производится при максимизации всех критериев, так как в качестве оценочного функционала в страте третьего уровня принимаются полученные значения эффективности возможных решений на предшествующих уровнях (рисунок 5.11).

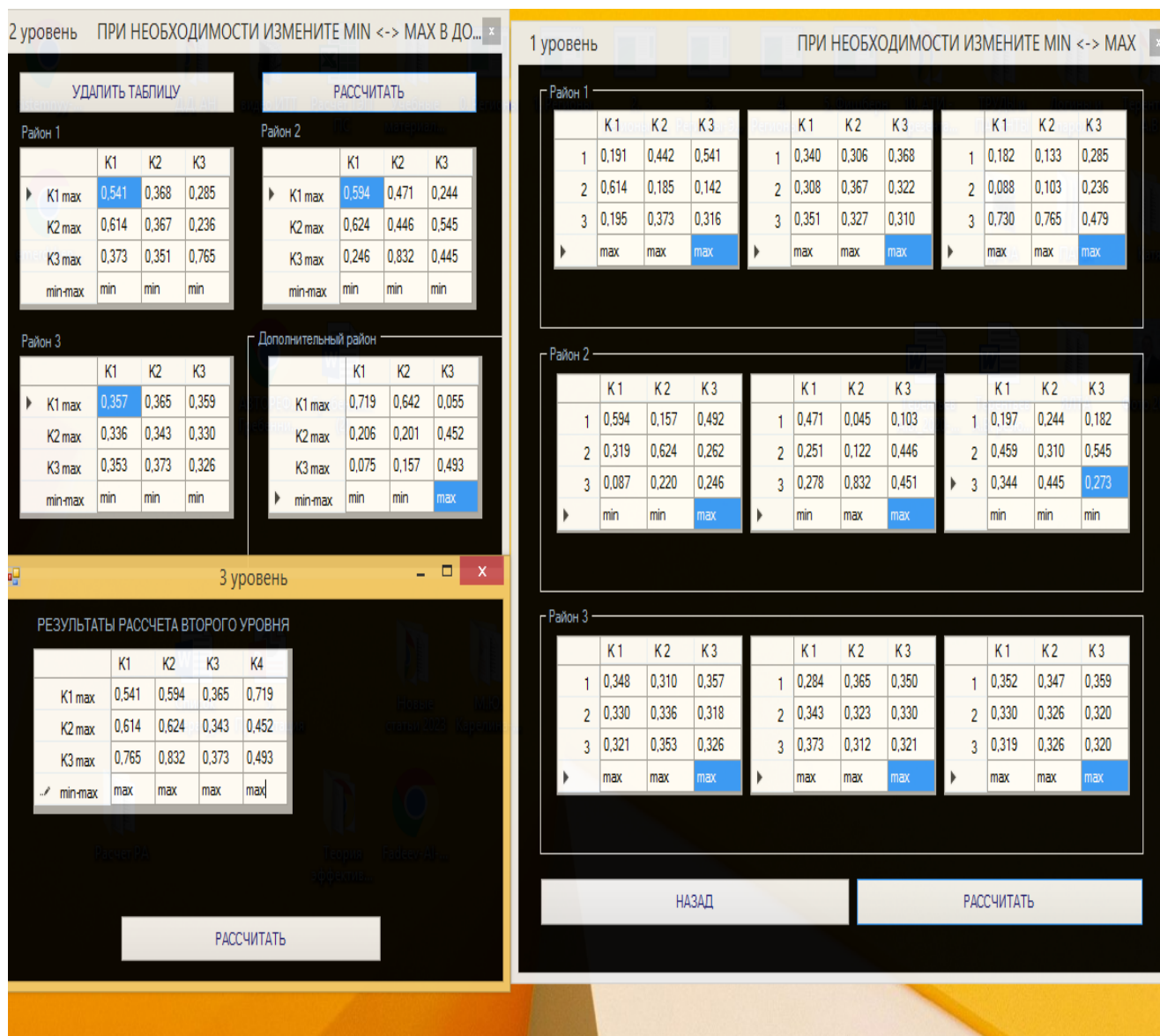


Рисунок 5.11 – Интерфейс СПО, отражающий окончание обработки данных и вывод на печать результатов расчёта

Результаты расчёта выводятся на печать в виде совокупности перестановок предпочтений  $S_n$ :

$$p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_j \geq \dots \geq p_{n-1} \geq p_n, \quad (5.1)$$

где  $S_n = n!$  – количество перестановок предпочтений:

- 1)  $P1 > P2 > P3 > P4$   $D1=0,5548$ ;  $D2=0,6190$ ;  $D3=0,7985$ ; 3
- 2)  $P1 > P2 > P4 > P3$   $D1=0,6180$ ;  $D2=0,6190$ ;  $D3=0,7985$ ; 3
- 3)  $P1 > P3 > P2 > P4$   $D1=0,5548$ ;  $D2=0,5270$ ;  $D3=0,6567$ ; 3

4)	P1>P3>P4>P2	D1=0,5417; D2=0,5083; D3=0,6158;	3
5)	P1>P4>P3>P2	D1=0,6300; D2=0,5083; D3=0,6158;	1
6)	P1>P4>P2>P3	D1=0,6300; D2=0,5633; D3=0,6967;	3
7)	P2>P1>P3>P4	D1=0,5548; D2=0,6240; D3=0,8320;	3
8)	P2>P1>P4>P3	D1=0,6180; D2=0,6240; D3=0,8320;	3
9)	P2>P3>P1>P4	D1=0,5548; D2=0,6240; D3=0,8320;	3
10)	P2>P3>P4>P1	D1=0,5593; D2=0,6240; D3=0,8320;	3
11)	P2>P4>P3>P1	D1=0,6565; D2=0,6240; D3=0,8320;	3
12)	P2>P4>P1>P3	D1=0,6565; D2=0,6240; D3=0,8320;	3
13)	P3>P2>P1>P4	D1=0,5548; D2=0,4835; D3=0,6025;	3
14)	P3>P2>P4>P1	D1=0,5593; D2=0,4835; D3=0,6025;	3
15)	P3>P1>P2>P4	D1=0,5548; D2=0,5270; D3=0,6567;	3
16)	P3>P1>P4>P2	D1=0,5417; D2=0,5083; D3=0,6158;	3
17)	P3>P4>P1>P2	D1=0,5420; D2=0,5083; D3=0,6158;	3
18)	P3>P4>P2>P1	D1=0,5420; D2=0,4730; D3=0,5660;	3
19)	P4>P2>P3>P1	D1=0,7190; D2=0,5380; D3=0,6625;	1
20)	P4>P2>P1>P3	D1=0,7190; D2=0,5380; D3=0,6625;	1
21)	P4>P3>P2>P1	D1=0,7190; D2=0,4730; D3=0,5660;	1
22)	P4>P3>P1>P2	D1=0,7190; D2=0,5083; D3=0,6158;	1
23)	P4>P1>P3>P2	D1=0,7190; D2=0,5083; D3=0,6158;	1
24)	P4>P1>P2>P3	D1=0,7190; D2=0,5633; D3=0,6967;	1

Количество областей, принадлежащих решениям:

$$D1=7 \quad D2=0 \quad D3=17$$

Результаты расчёта будут проанализированы ниже, в пункте данной главы, посвящённой анализу результатов вычислительного эксперимента.

### 5.2.2 Специализированное ПО, реализующее модели, основанные на организационно-технологическом и на функционально-сетевом принципе представления показателей

Интерфейс и последовательность работы СПО, реализующие модель структуры системы распределения ресурсов, основанной на **организационно-технологическом принципе** представления показателей (модель 2) на различных уровнях и модель структуры системы распределения ресурсов, основанной на **функционально-сетевом принципе** (модель 3) представления показателей – практически идентичны. Отличия при проведении вычислительного эксперимента заключаются непосредственно в процедурах расчёта на различных уровнях исследуемой РР-системы ГПТОП исходных данных, при этом исходные данные для всех трёх моделей представления структуры РР-системы – одинаковые и формируются на первом фундаментальном иерархическом уровне. То есть границы исследуемой системы и входы в систему остаются неизменными, но происходит трансформация моделей расчёта, заключающаяся в приближении абстрактной структуры системы распределения к реальной физической и сложившейся на практике системе распределения ресурсов (финансирования) транспортного комплекса общественного транспорта.

В первом случае (2) – это количественная оценка эффективности функционирования отдельного субъекта управления на отдельном виде транспорта, то есть некой совокупности АТП, объединённых по технологическому признаку (трамвай, электробус, автобус).

Во втором случае (3) – это количественная оценка эффективности функционирования отдельного субъекта управления *т-совокупности (т-системой)* видов транспорта, то есть, некой структурой управления результативными показателями совокупности видов транспорта (трамвай, электробус, автобус).

На рисунке 5.12 представлен интерфейс ввода данных на первом иерархическом уровне исследуемой РР-системы.

1 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> ...

**ДОБАВИТЬ МАТРИЦУ**

**Район 1**

	К 1	К 2	К 3
1	0,0053	0,217	1,273
2	0,017	0,091	0,338
3	0,0054	0,183	0,749
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,95	0,45	0,89
2	0,86	0,54	0,78
3	0,98	0,48	0,75
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	898,75	152,2	1,815
2	434,01	117,3	1,503
3	3595,7	877	3,045
▶	max	max	max

**Район 2**

	К 1	К 2	К 3
1	700	60,8	9000
2	1300	15,3	4800
3	4800	43,5	4500
▶	min	min	max

	К 1	К 2	К 3
1	35,3	43	183,1
2	66,3	117	790
3	59,7	795	799,5
▶	min	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	0,007	1,386	0,006
2	0,003	1,076	0,002
▶	0,004	0,750	0,004
▶	min	min	min

**Район 3**

	К 1	К 2	К 3
1	3,9	3,6	4,6
2	3,7	3,9	4,1
3	3,6	4,1	4,2
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	2,9	3,5	3,6
2	3,5	3,1	3,4
3	3,8	3,0	3,3
▶	max	max	max

	К 1	К 2	К 3
1	3,2	3,4	4,6
2	3,0	3,2	4,1
3	2,9	3,2	4,1
▶	max	max	max

НАЗАД
РАССЧИТАТЬ

Рисунок 5.12 – Формирование блока исходных данных в трех подсистемах для трёх страт и трёх вариантов принятия решений: вариант 1 – «Трамвай»; вариант 2 – «Электробус»; вариант 3 – «Автобус (ДВС)»

В соответствии со специфическими особенностями алгоритмов проведения вычислительного эксперимента по моделям №2 и №3 распределения ресурсов в РР-системе дополнительный район (подсистема) исследуемых показателей, имеющих межотраслевое значение, формально вводится на первом иерархическом уровне (рисунок 5.13).

1 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

УДАЛИТЬ МАТРИЦУ

Район 1

	K1	K2	K3
1	0,0053	0,217	1,273
2	0,017	0,091	0,338
3	0,0054	0,183	0,749
	max	max	max

	K1	K2	K3
1	0,95	0,45	0,89
2	0,86	0,54	0,78
3	0,98	0,48	0,75
	max	max	max

	K1	K2	K3
1	898,75	152,2	1,815
2	434,01	117,3	1,503
3	3595,7	877	3,045
	max	max	max

	K1	K2	K3
1			
2			
3			
	min	min	max

Район 2

	K1	K2	K3
1	700	60,8	9000
2	1300	15,3	4800
3	4800	43,5	4500
	min	min	max

	K1	K2	K3
1	35,3	43	183,1
2	66,3	117	790
3	59,7	795	799,5
	min	max	max

	K1	K2	K3
1	0,007	1,386	0,006
2	0,003	1,076	0,002
3	0,004	0,750	0,004
	min	min	min

	K1	K2	K3
1			
2			
3			
	min	min	max

Район 3

	K1	K2	K3
1	3,9	3,6	4,6
2	3,7	3,9	4,1
3	3,6	4,1	4,2
	max	max	max

	K1	K2	K3
1	2,9	3,5	3,6
2	3,5	3,1	3,4
3	3,8	3,0	3,3
	max	max	max

	K1	K2	K3
1	3,2	3,4	4,6
2	3,0	3,2	4,1
3	2,9	3,2	4,1
	max	max	max

	K1	K2	K3
1			
2			
3			
	min	min	max

НАЗАД РАСЧИТАТЬ

Рисунок 5.13 – Интерфейс СПО, в котором производится формирование дополнительной подсистемы на первом иерархическом уровне

Для достижения тождественности влияния показателей дополнительного района между моделями №1 и моделями №2 и №3, необходимо процедуру ввода данных (дополнительного района) повторить для каждого района первого уровня в виде отдельной страты (рисунок 5.14)

1 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

Имя компьютера: PC1580  
Имя пользователя: aterentev  
Инвентарный №: 1013420000010790  
Адрес IP: 192.168.48.200

**Район 1**

	K1	K2	K3
1	0,0053	0,217	1,283
2	0,0017	0,091	0,338
3	0,0054	0,183	0,749
▶	max	max	max

	K1	K2	K3
1	0,95	0,45	0,89
2	0,86	0,54	0,78
3	0,98	0,48	0,75
▶	max	max	max

	K1	K2	K3
1	898,75	152,2	1,815
2	434,01	117,3	1,503
3	3595,7	877	3,045
▶	max	max	max

	K1	K2	K3
1	0,02	0,11	10,3
2	0,07	0,35	85,5
3	0,19	0,45	93,1
▶	min	min	max

**Район 2**

	K1	K2	K3
1	700	60,8	9000
2	1300	15,3	4800
3	4800	43,5	4500
▶	min	min	max

	K1	K2	K3
1	35,3	43	183,1
2	66,3	117	790
3	59,7	795	7995,5
▶	min	max	max

	K1	K2	K3
1	0,007	1,368	0,006
2	0,003	1,076	0,002
3	0,004	0,750	0,004
▶	min	min	min

	K1	K2	K3
1	0,02	0,11	10,3
2	0,07	0,35	85,5
3	0,19	0,45	93,1
▶	min	min	max

**Район 3**

	K1	K2	K3
1	3,9	3,6	4,6
2	3,7	3,9	4,1
3	3,6	4,1	4,2
▶	max	max	max

	K1	K2	K3
1	2,9	3,5	3,6
2	3,5	3,1	3,4
3	3,8	3,0	3,3
▶	max	max	max

	K1	K2	K3
1	3,2	3,4	4,6
2	3,0	3,2	4,1
3	2,9	3,2	4,1
▶	max	max	max

	K1	K2	K3
1	0,02	0,11	10,3
2	0,07	0,35	85,5
3	0,19	0,45	93,1
▶	min	min	max

Рисунок 5.14 – Интерфейс СПО, в котором производится окончательное формирование базы исходных данных на первом иерархическом уровне в РР-системе для моделей №2 и №3

1 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

Имя компьютера: PC1580  
Имя пользователя: aterentev  
Инвентарный №: 1013420000 0790

УДАЛИТЬ МАТРИЦУ

Район 1

	K1	K2	K3		K1	K2	K3		K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	0,427	0,442	0,541	1	0,340	0,306	0,368	1	0,182	0,133	0,285	1	0,719	0,642	0,055
2	0,137	0,185	0,142	2	0,308	0,367	0,322	2	0,088	0,103	0,236	2	0,206	0,201	0,452
3	0,435	0,373	0,316	3	0,351	0,327	0,310	3	0,730	0,765	0,479	3	0,075	0,157	0,493
	max	max	max		max	max	max		max	max	max		min	min	max

Район 2

	K1	K2	K3		K1	K2	K3		K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	0,594	0,157	0,492	1	0,471	0,045	0,021	1	0,197	0,244	0,182	1	0,719	0,642	0,055
2	0,319	0,624	0,262	2	0,251	0,122	0,088	2	0,459	0,310	0,545	2	0,206	0,201	0,452
3	0,087	0,220	0,246	3	0,278	0,832	0,891	3	0,344	0,445	0,273	3	0,075	0,157	0,493
	min	min	max		min	max	max		min	min	min		min	min	max

Район 3

	K1	K2	K3		K1	K2	K3		K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	0,348	0,310	0,357	1	0,284	0,365	0,350	1	0,352	0,347	0,359	1	0,719	0,642	0,055
2	0,330	0,336	0,318	2	0,343	0,323	0,330	2	0,330	0,326	0,320	2	0,206	0,201	0,452
3	0,321	0,353	0,326	3	0,373	0,312	0,321	3	0,319	0,326	0,320	3	0,075	0,157	0,493
	max	max	max		max	max	max		max	max	max		min	min	max

НАЗАД РАСЧИТАТЬ

2 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО РАЙОНАМ

	K1	K2	K3	K4		K1	K2	K3	K4		K1	K2	K3	K4
P1>P2>P3	1,066	1,027	1,090	1,247	P1>P2>P3	1,250	1,389	1,053	1,247	P1>P2>P3	1,008	1,041	1,005	1,247
P1>P3>P2	1,074	1,037	1,054	1,332	P1>P3>P2	1,162	1,307	1,064	1,332	P1>P3>P2	1,014	1,049	1,007	1,332
P2>P1>P3	1,059	1,044	1,107	1,209	P2>P1>P3	1,184	1,112	1,127	1,209	P2>P1>P3	1,027	1,041	1,007	1,209
P2>P3>P1	1,051	1,033	1,144	1,124	P2>P3>P1	1,271	1,194	1,117	1,124	P2>P3>P1	1,023	1,032	1,004	1,124
P3>P2>P1	1,079	1,042	1,143	1,417	P3>P2>P1	1,103	1,224	1,117	1,417	P3>P2>P1	1,024	1,025	1,007	1,417
P3>P1>P2	1,071	1,031	1,179	1,332	P3>P1>P2	1,191	1,307	1,107	1,332	P3>P1>P2	1,018	1,017	1,006	1,332
	min	min	min	min		min	min	min	min		min	min	min	min

НАЗАД РАСЧИТАТЬ

14:31  
20.05.2024

Рисунок 5.15 – Интерфейс решения оптимизационной задачи на втором иерархическом уровне в РР-системе, после проведения процедуры нормирования и перевода показателей в относительные единицы с учётом установленного целеполагания

1 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

УДАЛИТЬ МАТРИЦУ

Район 1

	K1	K2	K3		K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	0,427	0,442	0,541	1	0,340	0,306	0,368	1	0,182	0,13	
2	0,137	0,185	0,142	2	0,308	0,367	0,322	2	0,088	0,10	
3	0,435	0,373	0,316	3	0,351	0,327	0,310	3	0,730	0,76	
	max	max	max		max	max	max		max	max	

Район 2

	K1	K2	K3		K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	0,594	0,157	0,492	1	0,471	0,045	0,021	1	0,197	0,2	
2	0,319	0,624	0,262	2	0,251	0,122	0,088	2	0,459	0,3	
3	0,087	0,220	0,246	3	0,278	0,832	0,891	3	0,344	0,4	
	min	min	max		min	max	max		min	min	

Район 3

	K1	K2	K3		K1	K2	K3		K1	K2	K3
1	0,348	0,310	0,357	1	0,284	0,365	0,350	1	0,352	0,3	
2	0,330	0,336	0,318	2	0,343	0,323	0,330	2	0,330	0,3	
3	0,321	0,353	0,326	3	0,373	0,312	0,321	3	0,319	0,3	
	max	max	max		max	max	max		max	max	

НАЗАД

3 уровень РЕЗУЛЬТАТЫ РАССЧЕТА ВТОРОГО УРОВНЯ

	K1	K2	K3
P1>P2>P3>P4	1,170	1,320	1,118
P1>P2>P4>P3	1,179	1,320	1,155
P1>P3>P2>P4	1,170	1,271	1,118
P1>P4>P3>P2	1,213	1,271	1,149
P1>P4>P2>P3	1,248	1,271	1,221
P2>P1>P3>P4	1,170	1,389	1,118
P2>P1>P4>P3	1,179	1,389	1,155
P2>P3>P1>P4	1,170	1,389	1,118
P2>P3>P4>P1	1,201	1,389	1,150
P2>P4>P3>P1	1,230	1,389	1,221
P2>P4>P1>P3	1,230	1,389	1,221
P3>P2>P1>P4	1,170	1,234	1,118
P3>P2>P4>P1	1,201	1,253	1,150
P3>P1>P2>P4	1,170	1,234	1,118
P3>P1>P4>P2	1,213	1,235	1,149
P3>P4>P1>P2	1,280	1,267	1,212
P3>P4>P2>P1	1,280	1,267	1,212
P4>P2>P3>P1	1,417	1,417	1,417
P4>P2>P1>P3	1,417	1,417	1,417
P4>P3>P2>P1	1,417	1,417	1,417
P4>P3>P1>P2	1,417	1,417	1,417

РАССЧИТАТЬ

2 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

РЕЗУЛЬТАТЫ РАССЧЕТОВ ПО РАЙОНАМ

	K1	K2	K3	K4		K1	K2	K3	K4		K1	K2	K3	K4
P1>P2>P3	1,066	1,027	1,090	1,247	P1>P2>P3	1,250	1,389	1,053	1,247	P1>P2>P3	1,008	1,041	1,005	1,247
P1>P3>P2	1,074	1,037	1,054	1,332	P1>P3>P2	1,162	1,307	1,064	1,332	P1>P3>P2	1,014	1,049	1,007	1,332
P2>P1>P3	1,059	1,044	1,107	1,209	P2>P1>P3	1,184	1,112	1,127	1,209	P2>P1>P3	1,027	1,041	1,007	1,209
P2>P3>P1	1,051	1,033	1,144	1,124	P2>P3>P1	1,271	1,194	1,117	1,124	P2>P3>P1	1,023	1,032	1,004	1,124
P3>P2>P1	1,079	1,042	1,143	1,417	P3>P2>P1	1,103	1,224	1,117	1,417	P3>P2>P1	1,024	1,025	1,007	1,417
P3>P1>P2	1,071	1,031	1,179	1,332	P3>P1>P2	1,191	1,307	1,107	1,332	P3>P1>P2	1,018	1,017	1,006	1,332
	min	min	min	min		min	min	min	min		min	min	min	min

НАЗАД

РАССЧИТАТЬ

14:32 20.05.2024

Рисунок 5.16 – Интерфейс решения оптимизационной задачи на третьем иерархическом уровне в исследуемой РР-системе

ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX
3 уровень

Результаты расчета программы представлены в файле Результаты.txt

OK

**Район 2**

	K 1	K 2	K 3
1	0,594	0,157	0,492
2	0,319	0,624	0,262
3	0,087	0,220	0,246
max	min	min	max

**Район 3**

	K 1	K 2	K 3
1	0,348	0,310	0,357
2	0,330	0,336	0,318
3	0,321	0,353	0,326
max	max	max	max

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАССЧЕТА ВТОРОГО УРОВНЯ**

	K1	K2	K3
P1>P2>P3>P4	1,170	1,320	1,118
P1>P2>P4>P3	1,179	1,320	1,155
P1>P3>P2>P4	1,170	1,271	1,118
P1>P3>P4>P2	1,213	1,271	1,149
P1>P4>P3>P2	1,248	1,271	1,221
P1>P4>P2>P3	1,248	1,295	1,221
P2>P1>P3>P4	1,170	1,389	1,118
P2>P1>P4>P3	1,179	1,389	1,155
P2>P3>P1>P4	1,170	1,389	1,118
P2>P3>P4>P1	1,201	1,389	1,150
P2>P4>P3>P1	1,230	1,389	1,221
P2>P4>P1>P3	1,230	1,389	1,221
P3>P2>P1>P4	1,170	1,234	1,118
P3>P2>P4>P1	1,201	1,253	1,150
P3>P1>P2>P4	1,170	1,234	1,118
P3>P1>P4>P2	1,213	1,235	1,149
P3>P4>P1>P2	1,280	1,267	1,212
P3>P4>P2>P1	1,280	1,267	1,212
P4>P2>P3>P1	1,417	1,417	1,417
P4>P2>P1>P3	1,417	1,417	1,417
P4>P3>P2>P1	1,417	1,417	1,417
P4>P3>P1>P2	1,417	1,417	1,417

НАЗАД
РАССЧИТАТЬ

2 уровень ПРИ НЕОБХОДИМОСТИ ИЗМЕНИТЕ MIN <-> MAX

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАССЧЕТОВ ПО РАЙОНАМ**

	K1	K2	K3	K4
P1>P2>P3	1,066	1,027	1,090	1,247
P1>P3>P2	1,074	1,037	1,054	1,332
P2>P1>P3	1,059	1,044	1,107	1,209
P2>P3>P1	1,051	1,033	1,144	1,124
P3>P2>P1	1,079	1,042	1,143	1,417
P3>P1>P2	1,071	1,031	1,179	1,332
min	min	min	min	min

	K1	K2	K3	K4
P1>P2>P3	1,250	1,389	1,053	1,247
P1>P3>P2	1,162	1,307	1,064	1,332
P2>P1>P3	1,184	1,112	1,127	1,209
P2>P3>P1	1,271	1,194	1,117	1,124
P3>P2>P1	1,103	1,224	1,117	1,417
P3>P1>P2	1,191	1,307	1,107	1,332
min	min	min	min	min

	K1	K2	K3	K4
P1>P2>P3	1,008	1,041	1,005	1,247
P1>P3>P2	1,014	1,049	1,007	1,332
P2>P1>P3	1,027	1,041	1,007	1,209
P2>P3>P1	1,023	1,032	1,004	1,124
P3>P2>P1	1,024	1,025	1,007	1,417
P3>P1>P2	1,018	1,017	1,006	1,332
min	min	min	min	min

НАЗАД
РАССЧИТАТЬ

ENG 14:33 20.05.2024

Рисунок 5.17 – Результаты расчёта оптимизационной задачи на третьем иерархическом уровне в исследуемой РР-системе (начало)

На рисунках 5.15, 5.16 и 5.17 последовательно представлены процедуры расчёта по решению оптимизационной задачи распределения ресурсов, а также форма выведения результатов расчёта в исследуемой РР-системе. Как уже отмечалось выше, интерфейсы расчёта в СПО по модели №2 и модели №3 практически не отличаются. Интерфейс СПО, в котором производится окончательное формирование базы исходных данных на первом иерархическом уровне в РР-системе для моделей №2 и №3, будет одинаковым.

Отличительными особенностями расчёта по моделям №2 и №3 являются аналитические модели, по которым производится расчёт на втором и третьем иерархических уровнях, поэтому содержание таблиц в интерфейсах на рисунках 5.15 и 5.16, как и результатов расчёта, естественно, будут различными.

В модели №2 мы получаем на втором уровне набор подмножеств ИС полного информационного пространства решений, полученного в результате расчёта данных 1-го уровня (**по отдельным видам транспорта**). На физическом уровне представления РР-системы ГПТОП – это количественная оценка эффективности функционирования отдельного субъекта управления на отдельном виде транспорта, то есть, некой совокупности АТП, объединённых по технологическому признаку.

В модели №3 мы получаем на втором уровне набор подмножеств ИС полного информационного пространства решений, полученного в результате расчёта данных 1-го уровня (**по совокупности видов транспорта**). На физическом уровне представления системы распределения ресурсов – это количественная оценка эффективности функционирования отдельного субъекта управления *т-совокупности* видов транспорта, то есть некой структуры управления результативными показателями совокупности видов транспорта, то есть оценка, представляющая интерес структур, курирующих формирование информационно-аналитической платформы ИТС. Ниже мы приведём результаты вычислительного эксперимента, как наиболее перспективной с точки зрения актуальных задач развития транспортных систем крупных городов.

Результаты вычислительного эксперимента и анализ полученных данных определяют объективную, полученную на основании аналитических расчётов, то есть оптимальную в границах исследуемой системы, структуру весовых коэффициентов, что позволит достичь цели исследования – разработки методологии распределения ресурсов в сложных многоуровневых пассажирских транспортных системах с многокритериальным целеполаганием на основе методов теории принятия решений в условиях неопределённости

### **5.3. Метод распределения ресурсов в сложных многоуровневых пассажирских транспортных системах с многокритериальным целеполаганием**

#### **5.3.1 Результаты проведения вычислительного эксперимента в РР-системе, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей**

Результаты проведения вычислительного эксперимента в РР-системе, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей, представлены в формах 5.1 ... 5.5. Данные формы получены извлечением из полного объёма полученных данных в объёме, необходимом для представления метода распределения РР-системы:

- Форма 5.1 – результаты расчёта весовых коэффициентов на первом иерархическом уровне для всех случаев предпочтений между исследуемыми подсистемами показателей и для каждой из страт в отдельной подсистеме;
- Форма 5.2 – результаты расчёта весовых коэффициентов на первом иерархическом уровне (дополнительная страта) для всех случаев предпочтений между исследуемыми подсистемами, а также рассчитанная эффективность по номерам исследуемых вариантов (видам транспорта).

<b>Форма 5.1 - Первый иерархический уровень – весовые коэффициенты</b>									
Предпочтение	Подсистема 1								
	Страта 1			Страта 2			Страта 3		
1) P1>P2>P3	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333
	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000
2) P1>P3>P2:	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333
3) P2>P1>P3:	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333
	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000
4) P2>P3>P1:	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000
	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000
5) P3>P2>P1:	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
6) P3>P1>P2:	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333
	Подсистема 2								
1) P1>P2>P3	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000
	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333
	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
2) P1>P3>P2:	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333
	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333
3) P2>P1>P3:	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000
	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333
	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000
4) P2>P3>P1:	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000
	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000
5) P3>P2>P1:	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000
	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000
6) P3>P1>P2:	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333
	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000
	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333
	Подсистема 3								
1) P1>P2>P3	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333
	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000
2) P1>P3>P2:	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333
3) P2>P1>P3:	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333
	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000
	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000
4) P2>P3>P1:	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000
	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000
5) P3>P2>P1:	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
6) P3>P1>P2:	1,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333

<b>Форма 5.2 – Первый (второй) иерархический уровень (дополнительная страта)</b>				
Предпочтение	Весовые коэффициенты			Эффективность решения/номер варианта (вид транспорта)
1) P1>P2>P3	1,000	0,000	0,000	D1=0,719; D2=0,286; D3=0,242; 1
	0,333	0,333	0,333	
	0,333	0,333	0,333	
2) P1>P3>P2:	1,000	0,000	0,000	D1=0,719; D2=0,329; D3=0,284; 1
	0,500	0,500	0,000	
	0,500	0,500	0,000	
3) P2>P1>P3:	0,500	0,500	0,000	D1=0,681; D2=0,286; D3=0,242; 1
	0,333	0,333	0,333	
	0,333	0,333	0,333	
4) P2>P3>P1:	0,333	0,333	0,333	D1=0,472; D2=0,327; D3=0,325; 1
	0,500	0,500	0,000	
	0,500	0,500	0,000	
5) P3>P2>P1:	0,333	0,333	0,333	D1=0,472; D2=0,452; D3=0,493; 3
	1,000	0,000	0,000	
	1,000	0,000	0,000	
6) P3>P1>P2:	0,500	0,500	0,000	D1=0,387; D2=0,452; D3=0,493; 3
	1,000	0,000	0,000	
	1,000	0,000	0,000	

– Форма 5.3 – результаты расчёта эффективности возможных решений на втором иерархическом уровне для всех возможных предпочтений между исследуемыми подсистемами первого иерархического уровня. В качестве вариантов решений в данном случае рассматриваются значения суммированных количественных оценок эффективности различных видов транспорта в подсистемах первого уровня, то есть характеризующие эффективность функционирования подсистем показателей для совокупности видов транспорта (транспортных систем).

– Форма 5.4 – результаты расчёта весовых коэффициентов на втором иерархическом уровне для страты 2.1. Результаты расчёта для страты 2.3 и 2.4 аналогичны.

– Форма 5.5 – результаты расчёта весовых коэффициентов и эффективности возможных решений на третьем иерархическом уровне для всех возможных предпочтений между исследуемыми подсистемами второго иерархического уровня.

Форма 5.3 - Второй иерархический уровень – эффективность решения/номер варианта												
п/с	Страта 1				Страта 2				Страта 3			
1	P1>P2>P3	D1=0,200; D2=0,142; D3=0,748;	3	P1>P2>P3	D1=0,338; D2=0,338; D3=0,351;	3	P1>P2>P3	D1=0,200; D2=0,142; D3=0,748;	3			
	P1>P3>P2	D1=0,234; D2=0,162; D3=0,658;	3	P1>P3>P2	D1=0,354; D2=0,332; D3=0,351;	1	P1>P3>P2	D1=0,234; D2=0,162; D3=0,658;	3			
	P2>P1>P3	D1=0,200; D2=0,142; D3=0,765;	3	P2>P1>P3	D1=0,338; D2=0,367; D3=0,339;	2	P2>P1>P3	D1=0,200; D2=0,142; D3=0,765;	3			
	P2>P3>P1	D1=0,209; D2=0,170; D3=0,765;	3	P2>P3>P1	D1=0,337; D2=0,367; D3=0,329;	2	P2>P3>P1	D1=0,209; D2=0,170; D3=0,765;	3			
	<b>P3&gt;P2&gt;P1</b>	<b>D1=0,285; D2=0,236; D3=0,622;</b>	<b><u>3</u></b>	<b>P3&gt;P2&gt;P1</b>	<b>D1=0,368; D2=0,345; D3=0,329;</b>	<b><u>1</u></b>	<b>P3&gt;P2&gt;P1</b>	<b>D1=0,285; D2=0,236; D3=0,622;</b>	<b><u>3</u></b>			
	P3>P1>P2	D1=0,285; D2=0,236; D3=0,658;	3	P3>P1>P2	D1=0,368; D2=0,332; D3=0,331;	1	P3>P1>P2	D1=0,285; D2=0,236; D3=0,658;	3			
2	P1>P2>P3	D1=0,594; D2=0,472; D3=0,184;	1	P1>P2>P3	D1=0,471; D2=0,251; D3=0,667;	3	P1>P2>P3	D1=0,221; D2=0,438; D3=0,395;	2			
	P1>P3>P2	D1=0,594; D2=0,402; D3=0,167;	1	P1>P3>P2	D1=0,471; D2=0,251; D3=0,585;	3	P1>P3>P2	D1=0,208; D2=0,502; D3=0,354;	2			
	P2>P1>P3	D1=0,376; D2=0,624; D3=0,184;	2	P2>P1>P3	D1=0,258; D2=0,187; D3=0,667;	3	P2>P1>P3	D1=0,244; D2=0,438; D3=0,445;	3			
	P2>P3>P1	D1=0,414; D2=0,624; D3=0,233;	2	P2>P3>P1	D1=0,179; D2=0,154; D3=0,862;	3	P2>P3>P1	D1=0,244; D2=0,428; D3=0,445;	3			
	<b>P3&gt;P2&gt;P1</b>	<b>D1=0,414; D2=0,443; D3=0,246;</b>	<b><u>2</u></b>	<b>P3&gt;P2&gt;P1</b>	<b>D1=0,179; D2=0,154; D3=0,891;</b>	<b><u>3</u></b>	<b>P3&gt;P2&gt;P1</b>	<b>D1=0,213; D2=0,545; D3=0,359;</b>	<b><u>2</u></b>			
	P3>P1>P2	D1=0,543; D2=0,402; D3=0,246;	1	P3>P1>P2	D1=0,246; D2=0,170; D3=0,891;	3	P3>P1>P2	D1=0,208; D2=0,545; D3=0,354;	2			
3	P1>P2>P3	D1=0,338; D2=0,333; D3=0,337;	1	P1>P2>P3	D1=0,325; D2=0,343; D3=0,373;	3	P1>P2>P3	D1=0,353; D2=0,330; D3=0,323;	1			
	P1>P3>P2	D1=0,353; D2=0,328; D3=0,333;	1	P1>P3>P2	D1=0,333; D2=0,343; D3=0,373;	3	P1>P3>P2	D1=0,356; D2=0,330; D3=0,322;	1			
	P2>P1>P3	D1=0,338; D2=0,336; D3=0,353;	3	P2>P1>P3	D1=0,365; D2=0,333; D3=0,343;	1	P2>P1>P3	D1=0,353; D2=0,328; D3=0,326;	1			
	P2>P3>P1	D1=0,334; D2=0,336; D3=0,353;	3	P2>P3>P1	D1=0,365; D2=0,332; D3=0,335;	1	P2>P3>P1	D1=0,353; D2=0,325; D3=0,326;	1			
	<b>P3&gt;P2&gt;P1</b>	<b>D1=0,357; D2=0,327; D3=0,340;</b>	<b><u>1</u></b>	<b>P3&gt;P2&gt;P1</b>	<b>D1=0,358; D2=0,332; D3=0,335;</b>	<b><u>1</u></b>	<b>P3&gt;P2&gt;P1</b>	<b>D1=0,359; D2=0,325; D3=0,323;</b>	<b><u>1</u></b>			
	P3>P1>P2	D1=0,357; D2=0,328; D3=0,333;	1	P3>P1>P2	D1=0,333; D2=0,337; D3=0,347;	3	P3>P1>P2	D1=0,359; D2=0,325; D3=0,322;	1			

Форма 5.4 - Второй иерархический уровень – весовые коэффициенты									
Страта 2.1									
Предпочтение	Весовые коэффициенты				Предпочтение	Весовые коэффициенты			
1) P1>P2>P3>P4:	0,250	0,250	0,250	0,250	7) P2>P1>P3>P4:	0,250	0,250	0,250	0,250
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
2) P1>P2>P4>P3:	0,333	0,333	0,333	0,000	8) P2>P1>P4>P3:	0,333	0,333	0,333	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
3) P1>P3>P2>P4:	0,250	0,250	0,250	0,250	9) P2>P3>P1>P4:	0,250	0,250	0,250	0,250
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
4) P1>P3>P4>P2:	0,333	0,333	0,333	0,000	10) P2>P3>P4>P1:	0,333	0,333	0,333	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
5) P1>P4>P3>P2:	0,500	0,500	0,000	0,000	11) P2>P4>P3>P1:	0,500	0,500	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,000		0,333	0,333	0,333	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000
6) P1>P4>P2>P3:	0,500	0,500	0,000	0,000	12) P2>P4>P1>P3:	0,500	0,500	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000
	0,250	0,250	0,250	0,250		0,250	0,250	0,250	0,250
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,000		0,500	0,500	0,000	0,000

Форма 5.4 (окончание)					Окончание табл.			
13) P3>P2>P1>P4:	0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 1,000 0,000 0,000 0,000 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250	19) P4>P2>P3>P1:	1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000					
14) P3>P2>P4>P1:	0,333 0,333 0,333 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000			20) P4>P2>P1>P3:	1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 0,250 0,250 0,250 0,250 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000			
15) P3>P1>P2>P4:	0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 1,000 0,000 0,000 0,000 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250 0,250				21) P4>P3>P2>P1:	1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000		
16) P3>P1>P4>P2:	0,333 0,333 0,333 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000					22) P4>P3>P1>P2:	1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000	
17) P3>P4>P1>P2:	0,500 0,500 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000						23) P4>P1>P3>P2:	1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 0,333 0,333 0,333 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000
18) P3>P4>P2>P1:	0,500 0,500 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000 1,000 0,000 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000 0,500 0,500 0,000 0,000							24) P4>P1>P2>P3:



### **5.3.2. Синтез оптимальной структуры распределения ресурсов в системе наземного пассажирского транспорта в г. Москве**

Синтезирование оптимальной структуры распределения ресурсов в системе наземного пассажирского транспорта в г. Москве базируется на результатах анализа вычислительного эксперимента в РР-системе, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей.

Основной принцип (технология) получения оптимальной структуры РР-системы заключается в выполнении следующих основных операций, производимых на каждом уровне РР-системы.

1) Выявление максимально возможных количественных оценок эффективности в исследуемых ЛО или стратах на каждом иерархическом уровне в каждой подсистеме.

2) Определение соответствующей максимально возможной количественной оценки эффективности предпочтения в структуре критериев целеполагания. Обязательным условием проведения вычислительного и, соответственно, технологии синтеза оптимальной РР-системы, является расчёт всех возможных предпочтений в рамках границ исследования.

3) Выполнение двух первых операций последовательно, начиная с высшего уровня иерархической структуры исследуемой структуры и заканчивая низшим фундаментальным уровнем текущих результативных показателей функционирования транспортных систем.

4) Определение всех значений весовых коэффициентов на низшем уровне исследуемой системы, соответствующих максимально возможному состоянию эффективности и тождественных по физическому смыслу значениям коэффициентов распределения ресурсов (КРР).

5) Синтезирование оптимальной структуры РР-системы, состоящей из набора КРР, соответствующих отдельным элементам в стратах низшего (первого) иерархического уровня.

Выполним последовательно перечисленные операции применительно к результатам проведённого вычислительного эксперимента.

**Выявление максимально возможных количественных оценок эффективности на третьем иерархическом уровне для возможных предпочтений, то есть на всём пространстве информационного состояния, в условиях неопределённости. Необходимое максимальное значение выделено жирным шрифтом**

1)  $P1 > P2 > P3$   $D1=1,245; D2=1,250; D3=1,221; D4=1,242; D5=1,260; D6=1,272; D7=1,280; D8=1,284; D9=1,280; D10=1,295; D11=1,310; D12=1,310; D13=1,202; D14=1,227; D15=1,202; D16=1,224; D17=1,280; D18=1,280; \underline{D19=1,417}; D20=1,417; D21=1,417; D22=1,417; D23=1,417; D24=1,417;$  **Вариант - 19**

2)  $P1 > P3 > P2$   $D1=1,203; D2=1,218; D3=1,186; D4=1,211; D5=1,247; D6=1,255; D7=1,226; D8=1,241; D9=1,226; D10=1,247; D11=1,280; D12=1,280; D13=1,174; D14=1,201; D15=1,174; D16=1,199; D17=1,280; D18=1,280; \underline{D19=1,417}; D20=1,417; D21=1,417; D22=1,417; D23=1,417; D24=1,417;$  **Вариант - 19**

3)  $P2 > P1 > P3$   $D1=1,320; D2=1,320; D3=1,271; D4=1,271; D5=1,271; D6=1,295; D7=1,389; D8=1,389; D9=1,389; D10=1,389; D11=1,389; D12=1,389; D13=1,234; D14=1,253; D15=1,234; D16=1,235; D17=1,274; D18=1,274; \underline{D19=1,417}; D20=1,417; D21=1,417; D22=1,417; D23=1,417; D24=1,417;$  **Вариант - 19**

4)  $P2 > P3 > P1$   $D1=1,320; D2=1,320; D3=1,271; D4=1,271; D5=1,271; D6=1,295; D7=1,389; D8=1,389; D9=1,389; D10=1,389; D11=1,389; D12=1,389; D13=1,234; D14=1,253; D15=1,234; D16=1,235; D17=1,253; D18=1,253; \underline{D19=1,417}; D20=1,417; D21=1,417; D22=1,417; D23=1,417; D24=1,417;$  **Вариант - 19**

5)  $P3 > P2 > P1$   $D1=1,219; D2=1,238; D3=1,195; D4=1,210; D5=1,246; D6=1,258; D7=1,254; D8=1,272; D9=1,254; D10=1,270; D11=1,305; D12=1,305; D13=1,176; D14=1,202; D15=1,176; D16=1,192; D17=1,253; D18=1,253; \underline{D19=1,417}; D20=1,417; D21=1,417; D22=1,417; D23=1,417; D24=1,417;$  **Вариант - 19**

6)  $P3 > P1 > P2$   $D1=1,203; D2=1,218; D3=1,186; D4=1,211; D5=1,247; D6=1,255; D7=1,226; D8=1,241; D9=1,226; D10=1,247; D11=1,280; D12=1,280; D13=1,174; D14=1,201; D15=1,174; D16=1,199; D17=1,246; D18=1,246; \underline{D19=1,417}; D20=1,417; D21=1,417; D22=1,417; D23=1,417; D24=1,417;$  **Вариант - 19**

Полученные данные свидетельствуют об однозначном результате – максимально возможное состояние эффективности исследуемой системы соответствует 19-му (из 24 вариантов решений), сформированному на втором уровне иерархической системы. Данный однозначный результат не является обязательным, он определяется оценочным функционалом текущего состояния системы НППТ. При различных вариантах достижения максимального эффективного решения изменится траектория синтеза оптимальной структуры РР-системы при переходе от уровня к уровню. В нашем случае данный результат будет означать, что на втором уровне исследуемой системы необходимо выявить структуры, соответствующие 19-му варианту распределения информационных состояний.

**Для определения соответствующей максимально возможной количественной оценки эффективности предпочтения в структуре критериев целеполагания** к результатам расчёта всех возможных значений эффективности системы на втором иерархическом уровне и соответствующим им значениям распределения весовых коэффициентов для 19-го варианта решения (форма 5.4 - выделено шрифтом и подчёркиванием.). В форме 5.4 приведены результаты расчёта весовых коэффициентов для 24-х информационных состояний, соответствующих набору предпочтений (по критериям эффективности) только для страты 2.1. Результаты расчёта весовых коэффициентов для страт №2.2 и 2.3 не столь аналогичны и не приводятся, так как для дальнейшего продвижения по технологии синтеза оптимальной структуры РР на втором иерархическом уровне важно определить, какому варианту соответствует наилучшее значение эффективности системы.

Ниже приведен полный расчёт возможных эффективностей системы на втором иерархическом уровне для страт №2.1, 2.2 и 2.3. В них необходимо выявить варианты эффективного состояния системы, соответствующие 19-ому информационному состоянию, как наиболее эффективному на высшем уровне системы.

**Подсистема 2.1**

- 1) P1>P2>P3>P4 D1=1,108; D2=1,124; D3=1,105; D4=1,076; D5=1,170; D6=1,153;  
5
- 2) P1>P2>P4>P3 D1=1,113; D2=1,148; D3=1,104; D4=1,088; D5=1,179; D6=1,145;  
5
- 3) P1>P3>P2>P4 D1=1,108; D2=1,124; D3=1,105; D4=1,098; D5=1,170; D6=1,153;  
5
- 4) P1>P3>P4>P2 D1=1,134; D2=1,153; D3=1,125; D4=1,098; D5=1,213; D6=1,194;  
5
- 5) P1>P4>P3>P2 D1=1,157; D2=1,203; D3=1,134; D4=1,106; D5=1,248; D6=1,202;  
5
- 6) P1>P4>P2>P3 D1=1,157; D2=1,203; D3=1,134; D4=1,088; D5=1,248; D6=1,202;  
5
- 7) P2>P1>P3>P4 D1=1,108; D2=1,124; D3=1,105; D4=1,076; D5=1,170; D6=1,153;  
5
- 8) P2>P1>P4>P3 D1=1,113; D2=1,148; D3=1,104; D4=1,088; D5=1,179; D6=1,145;  
5
- 9) P2>P3>P1>P4 D1=1,108; D2=1,124; D3=1,105; D4=1,089; D5=1,170; D6=1,153;  
5
- 10) P2>P3>P4>P1 D1=1,121; D2=1,141; D3=1,120; D4=1,089; D5=1,201; D6=1,181;  
5
- 11) P2>P4>P3>P1 D1=1,137; D2=1,185; D3=1,127; D4=1,100; D5=1,230; D6=1,182;  
5
- 12) P2>P4>P1>P3 D1=1,137; D2=1,185; D3=1,127; D4=1,088; D5=1,230; D6=1,182;  
5
- 13) P3>P2>P1>P4 D1=1,108; D2=1,124; D3=1,105; D4=1,144; D5=1,170; D6=1,153;  
5
- 14) P3>P2>P4>P1 D1=1,121; D2=1,141; D3=1,120; D4=1,144; D5=1,201; D6=1,181;  
5
- 15) P3>P1>P2>P4 D1=1,108; D2=1,124; D3=1,105; D4=1,144; D5=1,170; D6=1,153;  
5
- 16) P3>P1>P4>P2 D1=1,134; D2=1,153; D3=1,125; D4=1,144; D5=1,213; D6=1,194;  
5
- 17) P3>P4>P1>P2 D1=1,169; D2=1,193; D3=1,158; D4=1,144; D5=1,280; D6=1,256;  
5
- 18) P3>P4>P2>P1 D1=1,169; D2=1,193; D3=1,158; D4=1,144; D5=1,280; D6=1,256;  
5
- 19) **P4>P2>P3>P1 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,100; D5=1,417; D6=1,332;**  
**Вариант №5**
- 20) P4>P2>P1>P3 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,088; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 21) P4>P3>P2>P1 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,134; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 22) P4>P3>P1>P2 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,134; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 23) P4>P1>P3>P2 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,106; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 24) P4>P1>P2>P3 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,088; D5=1,417; D6=1,332;  
5

**Подсистема 2.2**

- 1) P1>P2>P3>P4 D1=1,320; D2=1,216; D3=1,158; D4=1,271; D5=1,215; D6=1,234;  
1
- 2) P1>P2>P4>P3 D1=1,320; D2=1,267; D3=1,168; D4=1,271; D5=1,248; D6=1,277;  
1
- 3) P1>P3>P2>P4 D1=1,231; D2=1,216; D3=1,158; D4=1,271; D5=1,215; D6=1,234;  
4
- 4) P1>P3>P4>P2 D1=1,235; D2=1,186; D3=1,173; D4=1,271; D5=1,212; D6=1,210;  
4
- 5) P1>P4>P3>P2 D1=1,235; D2=1,247; D3=1,197; D4=1,271; D5=1,260; D6=1,262;  
4
- 6) P1>P4>P2>P3 D1=1,295; D2=1,247; D3=1,197; D4=1,271; D5=1,260; D6=1,262;  
1
- 7) P2>P1>P3>P4 D1=1,389; D2=1,216; D3=1,158; D4=1,233; D5=1,215; D6=1,234;  
1
- 8) P2>P1>P4>P3 D1=1,389; D2=1,267; D3=1,168; D4=1,233; D5=1,248; D6=1,277;  
1
- 9) P2>P3>P1>P4 D1=1,389; D2=1,216; D3=1,158; D4=1,194; D5=1,215; D6=1,234;  
1
- 10) P2>P3>P4>P1 D1=1,389; D2=1,234; D3=1,149; D4=1,177; D5=1,253; D6=1,249;  
1
- 11) P2>P4>P3>P1 D1=1,389; D2=1,320; D3=1,161; D4=1,177; D5=1,321; D6=1,320;  
1
- 12) P2>P4>P1>P3 D1=1,389; D2=1,320; D3=1,161; D4=1,196; D5=1,321; D6=1,320;  
1
- 13) P3>P2>P1>P4 D1=1,221; D2=1,216; D3=1,158; D4=1,194; D5=1,215; D6=1,234;  
6
- 14) P3>P2>P4>P1 D1=1,221; D2=1,234; D3=1,149; D4=1,177; D5=1,253; D6=1,249;  
5
- 15) P3>P1>P2>P4 D1=1,231; D2=1,216; D3=1,158; D4=1,194; D5=1,215; D6=1,234;  
6
- 16) P3>P1>P4>P2 D1=1,235; D2=1,186; D3=1,173; D4=1,194; D5=1,212; D6=1,210;  
1
- 17) P3>P4>P1>P2 D1=1,235; D2=1,198; D3=1,168; D4=1,171; D5=1,267; D6=1,220;  
5
- 18) P3>P4>P2>P1 D1=1,230; D2=1,198; D3=1,168; D4=1,177; D5=1,267; D6=1,220;  
5
- 19) **P4>P2>P3>P1 D1=1,318; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,177; D5=1,417; D6=1,332;**  
**Вариант №5**
- 20) P4>P2>P1>P3 D1=1,318; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,196; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 21) P4>P3>P2>P1 D1=1,230; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,177; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 22) P4>P3>P1>P2 D1=1,235; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,171; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 23) P4>P1>P3>P2 D1=1,235; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,198; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 24) P4>P1>P2>P3 D1=1,295; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,198; D5=1,417; D6=1,332;

**Подсистема 2.3**

- 1) P1>P2>P3>P4 D1=1,075; D2=1,101; D3=1,071; D4=1,046; D5=1,118; D6=1,093;  
5
- 2) P1>P2>P4>P3 D1=1,099; D2=1,132; D3=1,092; D4=1,060; D5=1,155; D6=1,122;  
5
- 3) P1>P3>P2>P4 D1=1,075; D2=1,101; D3=1,071; D4=1,046; D5=1,118; D6=1,093;  
5
- 4) P1>P3>P4>P2 D1=1,087; D2=1,118; D3=1,081; D4=1,050; D5=1,149; D6=1,119;  
5
- 5) P1>P4>P3>P2 D1=1,128; D2=1,173; D3=1,118; D4=1,074; D5=1,221; D6=1,175;  
5
- 6) P1>P4>P2>P3 D1=1,128; D2=1,173; D3=1,118; D4=1,074; D5=1,221; D6=1,175;  
5
- 7) P2>P1>P3>P4 D1=1,075; D2=1,101; D3=1,071; D4=1,046; D5=1,118; D6=1,093;  
5
- 8) P2>P1>P4>P3 D1=1,099; D2=1,132; D3=1,092; D4=1,060; D5=1,155; D6=1,122;  
5
- 9) P2>P3>P1>P4 D1=1,075; D2=1,101; D3=1,071; D4=1,046; D5=1,118; D6=1,093;  
5
- 10) P2>P3>P4>P1 D1=1,098; D2=1,129; D3=1,086; D4=1,053; D5=1,150; D6=1,118;  
5
- 11) P2>P4>P3>P1 D1=1,144; D2=1,191; D3=1,125; D4=1,078; D5=1,221; D6=1,175;  
5
- 12) P2>P4>P1>P3 D1=1,144; D2=1,191; D3=1,125; D4=1,078; D5=1,221; D6=1,175;  
5
- 13) P3>P2>P1>P4 D1=1,075; D2=1,101; D3=1,071; D4=1,046; D5=1,118; D6=1,093;  
5
- 14) P3>P2>P4>P1 D1=1,098; D2=1,129; D3=1,086; D4=1,053; D5=1,150; D6=1,118;  
5
- 15) P3>P1>P2>P4 D1=1,075; D2=1,101; D3=1,071; D4=1,046; D5=1,118; D6=1,093;  
5
- 16) P3>P1>P4>P2 D1=1,087; D2=1,118; D3=1,081; D4=1,050; D5=1,149; D6=1,119;  
5
- 17) P3>P4>P1>P2 D1=1,126; D2=1,170; D3=1,108; D4=1,064; D5=1,212; D6=1,169;  
5
- 18) P3>P4>P2>P1 D1=1,126; D2=1,170; D3=1,108; D4=1,064; D5=1,212; D6=1,169;  
5
- 19) **P4>P2>P3>P1 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,124; D5=1,417; D6=1,332;**  
**Вариант №5**
- 20) P4>P2>P1>P3 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,124; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 21) P4>P3>P2>P1 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,124; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 22) P4>P3>P1>P2 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,124; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 23) P4>P1>P3>P2 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,124; D5=1,417; D6=1,332;  
5
- 24) P4>P1>P2>P3 D1=1,247; D2=1,332; D3=1,209; D4=1,124; D5=1,417; D6=1,332;  
5

Анализ результатов расчёта на втором иерархическом уровне показывает, что наиболее эффективным предпочтением (информационных ситуаций, соответствующих максимальной эффективности в системе) во всех трёх подсистемах является вариант №3. Но общий результат уже не столь однозначен, например, в подсистеме №2.3 возможны альтернативные варианты: №1,4,3, и 6, близкие по эффективности варианту №5. Тем не менее, при переходе к низшему иерархическому уровню (выполнение двух первых операций последовательно, начиная с высшего уровня иерархической структуры исследуемой структуры и заканчивая низшим фундаментальным уровнем текущих результативных показателей функционирования транспортных систем) мы должны опираться в данном случае на решение №5.

Следующей операцией является определение всех значений весовых коэффициентов на низшем уровне исследуемой системы, соответствующих максимально возможному состоянию эффективности и тождественных по физическому смыслу значениям коэффициентов распределения ресурсов. Как и в предыдущих случаях мы выделяем решение, соответствующие наиболее предпочтительному информационному состоянию, выявленному на предшествующем уровне. Распределение весовых коэффициентов на 1-ом уровне приведено в таблице 5.1 и в целом в РР-системе ГПТОП на рисунке 5.18.

Таблица 5.1 – Распределение ВК на 1-ом иерархическом уровне

Распределение весовых коэффициентов									
	Страта 1			Страта 2			Страта 3		
Подсистема 1 5) P3>P2>P1:	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000
	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
Подсистема 2 5) P3>P2>P1:	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333	1,000	0,000	0,000
	1,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000
Подсистема 3 5) P3>P2>P1:	1,000	0,000	0,000	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000	0,000
	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
	0,500	0,500	0,000	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	0,000
Подсистема 4 5) P3>P2>P1:				0,333	0,333	0,333			
				1,000	0,000	0,000			
				1,000	0,000	0,000			

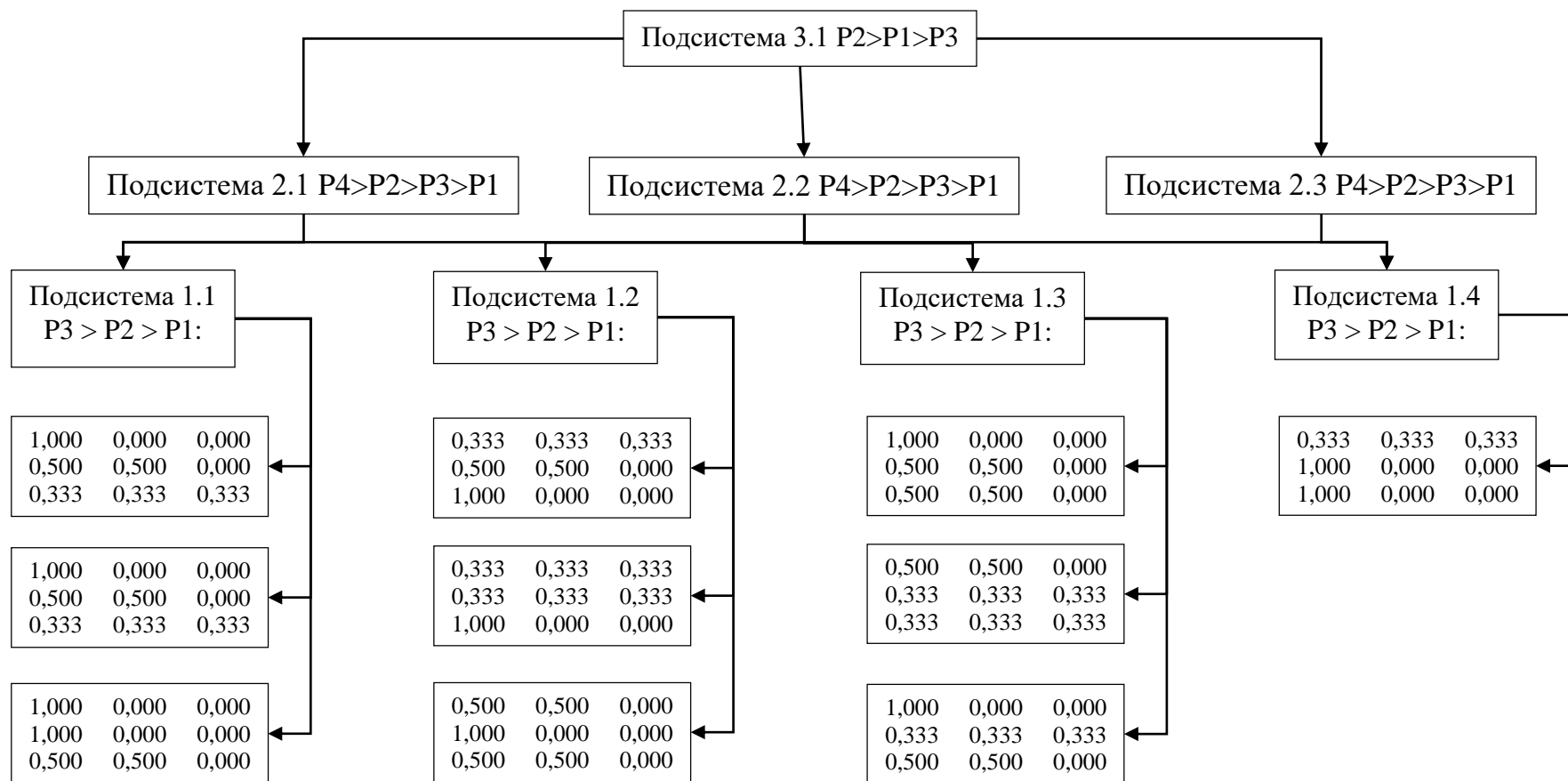


Рисунок 5.18 – Модель распределения ВК в РР-структуре, основанная на функционально-сетевом принципе исследования показателей (выбор и финансирование субъектов управления ИТС)



На рисунке 5.19 приведена схема распределений значений коэффициентов распределения ресурсов (КРР) в РР-системе ГПТОП, основанной на функционально-сетевом принципе исследования показателей оценочного функционала в г. Москве. Значения КРР рассчитаны для всех элементов РР-системы ГПТОП с учётом полного комплекса возможных взаимодействий и взаимовлияния, как между отдельными стратами в подсистемах, так и взаимовлияния между подсистемами различных уровней (эшелонами). Базовой структурой, определяющей эффективность функционирования всей системы ГПТОП является 1-ый эшелон, состоящий из 3-х районов (подсистем) показателей, каждый из которых состоит из трёх отдельных страт:

1. Подсистема 1.1 – удельные результативные показатели эксплуатации ТС, оценивающие эффективность видов транспорта в исследуемой РР-системе ГПТОП.

2. Подсистема 1.2. – количественные показатели эксплуатации транспортных средств и инфраструктуры обслуживания с учётом степени износа основных фондов в РР-системе ГПТОП.

3. Подсистема 1.3 – показатели удовлетворённости потребительских свойств, требуемые для обеспечения в соответствии с ГОСТ «Услуги транспортные. Пассажирские перевозки. Номенклатура показателей качества»

4. Отдельно следует выделить подсистему 1.4 «Показатели экологической безопасности, безопасности дорожного движения и обеспечения передвижения маломобильных граждан». В разработанной структуре РР-системы ГПТОП формально (из-за специфической процедуры вычислений в ПО) принадлежит к 1-му эшелону, но оценка её влияния производится для каждой из подсистем 1-го эшелона. Поэтому объективно подсистема 1.4 является подсистемой 2-го эшелона. Это обстоятельство было учтено при проведении вычислительного эксперимента.

Важно отметить, что КРР – тождественный по своим значениям величинам ВК, но имеют иную физическую интерпретацию. Например, если значение ВК равно «0» в системе аналитического решения, тогда оценочный функционал обращается также в «0». В РР-системе ГПТОП значение КРР равное «0» означает, что при распределении ресурсов отсутствует необходимость, что данный функционал в границах исследуемой системы и установленного целеполагания не требует дополнительно финансирования.

Рассмотрим методику применения РР-системы для г. Москвы по отдельному показателю для отдельной подсистемы 2.2 - Количественные показатели эксплуатации транспортных средств и инфраструктуры обслуживания с учётом степени износа основных фондов. На развитие транспортной системы г. Москвы в рамках принятого трехлетнего бюджета (2026-2028 гг.) предполагается выделить 3,2 трлн рублей, то есть около 1,067 трлн руб. ежегодно. В соответствии с разработанной методологией можно определить КРР в РР-системе и сравнить текущие значение эффективности по отдельным показателям для любой подсистемы в исследуемой структуре ГПТОП (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Сравнение количественных показателей эксплуатации транспортных средств

Вид транспорта	КРР-текущее значение	КРР-система	Показатель эффективности, кол-во ТС	Выработка на 1 пассажира-место	Сумма распределения - текущие значение, млн. руб.	Сумма распределения, млн. руб.	Провозная способность парка ТС, текущее значение, тыс. пасс.	Провозная способность парка ТС, РР-система, тыс. пасс.
трамвай	0,0068	0,0111	700	0,83	21760	35520	6 300	10 089
электробус	0,0075	0,0055	1300	0,78	21440	17600	6240	8 486
автобус (ДВС)	0,0063	0,0037	4800	0,75	21760	11840	21 600	15 789
					64960	64960	34 140	34 364

Анализ данных, приведенных в таблице 5.2 показывает, что при внедрении РР-системы в практику распределения ресурсов в транспортной системе при обеспечении нормативных значений комфортабельности, безопасности и экологических требований к подвижному составу и в рамках бюджета г. Москвы возможно увеличение провозной возможности парка транспортных средств на 220 тыс. пассажиров. При действующем расписании движения транспортных средств потенциальный пассажиропоток на всех видах транспорта увеличится на 1 254 000 пассажиров ежедневно.

В целом можно констатировать, что в процессе проведения вычислительного эксперимента были апробированы аналитические инструменты распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах ГПТОП, созданные на основе теории принятия решений и позволяющие в условиях неопределённости синтезировать оптимальную структуру распределения ресурсов в системах наземного пассажирского транспорта.

### **Выводы по пятой главе**

В пятой главе диссертационного исследования был реализован комплексный вычислительный эксперимент, направленный на апробацию разработанной методологии управления распределением ресурсов в пассажирской транспортной системе города Москвы. Проведенный эксперимент позволил подтвердить практическую применимость теоретических положений, сформулированных в предыдущих главах работы, и продемонстрировать эффективность предложенного инструментария для решения задач оптимизации ресурсораспределения в условиях многофакторной неопределённости.

Методологическую основу вычислительного эксперимента составил принцип определения неизвестных из системы соотношений, заданных в общей форме при незавершённой параметризации. Данный подход оказался особенно продуктивным в условиях, когда структура системы известна, целеполагание

установлено, но конкретные значения параметров могут варьироваться в определённых диапазонах. Такая постановка задачи соответствует реальным условиям функционирования городского пассажирского транспорта, характеризующимся динамическими изменениями пассажиропотоков, вариативностью технико-эксплуатационных показателей и неопределённостью внешних факторов воздействия.

В процессе вычислительного эксперимента моделирование РР-системы ГПТОП было основано на принципе определения неизвестных из системы соотношений, известных лишь в общей форме, то есть когда её параметризация не завершена, но установлено целеполагание, позволяющее решать входящие в систему уравнения при различных значениях параметров, управляющих процессом. Было разработано три модели представления РР-системы ГПТОП, построенных на едином принципе формирования для отдельных блоков морфологических матриц выбора сценариев с учетом показателей эффективности или оценочного функционала.

**Вариант №1.** Модель структуры РР-системы ГПТОП, основанная на технологическом принципе представления показателей. В данном случае моделирование структуры предполагает, что ЛО второго иерархического уровня формируется из наилучших показателей эффективности ЛО первого уровня.

**Вариант № 2.** Модель структуры РР-системы ГПТОП, основанная на организационно-технологическом принципе представления показателей на различных уровнях реализуется принцип формирования матрицы логических операторов (ЛО) второго уровня в виде набора подмножеств информационных состояний (ИС) полного информационного пространства возможных решений, полученного в результате расчёта ЛО 1-го уровня.

**Вариант 3.** Модель структуры РР-системы ГПТОП, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей. Принципиально модель опирается на исследование полной совокупности возможных решений в пределах одного ЛО взаимоисключающих ИС, но должна быть сформирована с учетом многомерного целеполагания.

Далее были разработаны три алгоритма и ПО на их основе, реализующие три проблемно-ориентированные стратегии вычислительного эксперимента, разработанные на различных формах представления РР-системы ГПТОП пассажирского транспортного комплекса:

1. Алгоритм исследования эффективности функционирования отдельных видов транспорта в РР-системе ГПТОП.

2. Алгоритм исследования эффективности действий фактических субъектов управления, отвечающих за организацию функционирования отдельных локаций транспортных систем.

3. Алгоритм исследования эффективности функционирования транспортных систем как совокупности отдельных видов транспорта в информационно-аналитических платформах.

Описание вычислительно эксперимента производилось по 3-ему алгоритму. Оно представляет собой законченную последовательность операций (технология) метода синтезирования оптимальной структуры распределения ресурсов в системе наземного пассажирского транспорта:

1) выявление максимально возможных количественных оценок эффективности в исследуемых ЛО или стратах на каждом иерархическом уровне в каждой подсистеме;

2) определение соответствующего максимального, возможной количественной оценки эффективности, предпочтения в структуре критериев целеполагания;

3) выполнение двух первых операций последовательно начиная с высшего уровня иерархической структуры исследуемой структуры и заканчивая низшим фундаментальным уровнем текущих результативных показателей функционирования транспортных систем;

4) определение всех значений весовых коэффициентов на низшем уровне исследуемой системы, соответствующих максимально возможному состоянию эффективности и тождественных по физическому смыслу значениям коэффициентов распределения ресурсов (КРР);

5) синтезирована оптимальная структура РР-системы ГПТОП, состоящая из набора коэффициентов распределения ресурсов, соответствующих отдельным элементам во всех подсистемах на всех иерархических уровнях исследуемой пассажирской транспортной системы.

Результатом проведения вычислительного эксперимента является подтверждение эффективности применения аналитических инструментов распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах, созданных на основе теории принятия решений и позволяющие в условиях неопределенности, синтезировать оптимальные структуры распределения ресурсов в системах наземного пассажирского транспорта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе диссертационного исследования был вскрыт ряд проблем научного характера, являющихся первопричиной неэффективности применяемых на практике методов распределения ресурсов в ГПТОП. Ключевой из них является научная проблема, связанная с отсутствием адекватного сложным задачам управления в многоуровневых и функционирующих в условиях неопределённости структурам ГПТОП математического аппарата, что приводит к необходимости использования при решении названных задач множества разнородных математических и интуитивных методов, и, как правило, субъективных методов, основанных на моделях экспертного оценивания. Для решения обозначенной проблемы на основе выполненных теоретико-методологических и научно-методических исследований были решены следующие задачи.

1. Разработаны основные научные положения логистики управления структурой многоуровневой системы с противоречивым целеполаганием и функционирующей в условиях неопределённости, в области методов определения эффективного распределения ресурсов, позволяющие реализовать концепцию сбалансированного развития транспортного комплекса.

2. Выявлено, что структура ГПТОП является неоднородной по принципам её организации в зависимости от распределения функционала между субъектами управления и разработаны три основных варианта представления её структуры, построенных на едином принципе формирования морфологических матриц выбора сценариев с учётом показателя эффективности или оценочного функционала.

3. Разработаны научные подходы, основанные на энтропийном подходе и позволяющие объективно выполнять функцию распределения ресурсов в ГПТОП, когда оценочный функционал дифференцирован в зависимости от технологических и организационных принципов построения исследуемой, исключающей необходимость экспертного оценивания показателей

(вероятностных характеристик, оценочных данных влияния внутреннего и внешнего факторного пространства и т.д.) на исследуемые процессы.

4. Разработан комплекс математических моделей и алгоритмов, соответствующих трём вариантам представления системы распределения ресурсов для автоматического поиска оптимальных решений в условиях неопределённости, как функции ценности, ожидание которой представляет отношение нестрогого предпочтения на множестве вероятностных распределений.

5. Разработано исследовательское программное обеспечение, позволяющее выполнять расчёты в комплексе математических моделей и алгоритмов поиска оптимальных решений на полном пространстве информационных состояний, то есть на всем спектре возможных решений распределения вероятностей  $0 \leq p_j \leq 1; \sum_{j=1}^n p_j = 1; j = \overline{1, n}$ , где  $n$  – количество критериев целеполагания может быть достаточно большим и варьируемым в зависимости от условий работы ГПТОП. Произведён вычислительный эксперимент, позволивший апробировать методологию управления распределением ресурсов в пассажирской транспортной системе (РР-системе ГПТОП) г. Москвы. Моделирование РР-системы ГПТОП было основано на принципе определения неизвестных из системы соотношений, известных лишь в общей форме, то есть, когда её параметризация не завершена, но установлено целеполагание, позволяющее решать входящие в систему уравнения при различных значениях параметров, управляющих процессом.

6. Выполнен анализ результатов численного эксперимента: определены максимально возможные количественные оценки эффективности предпочтения в структуре критериев целеполагания, начиная с высшего уровня иерархической структуры исследуемой структуры и заканчивая низшим фундаментальным уровнем текущих результативных показателей функционирования транспортных систем; определены все значения весовых коэффициентов на низшем уровне исследуемой системы, соответствующих максимально возможному состоянию эффективности и тождественных по физическому смыслу значениям коэффициентов распределения ресурсов (КРР).

7. Синтезирована оптимальная структура РР-системы ГПТОП г. Москвы, состоящая из набора коэффициентов распределения ресурсов, соответствующих отдельным элементам во всех подсистемах на всех иерархических уровнях исследуемой городской пассажирской транспортной системы.

Достоверность решения поставленных задач подтверждается теоретическими исследованиями – сравнением результатов расчёта по разработанным моделям с известными и широко апробированными методами решения данного класса задач на основе энтропийного подхода. Как правило, в данной информационной ситуации вводится в рассмотрение мера неопределённости второго рода. Необходимость использования энтропии второго рода обусловлена тем обстоятельством, что она является чувствительной в отличие от энтропии Шеннона при решении экстремальных задач, а её максимум для простого отношения порядка достигается на оценках Фишберна.

В диссертационном исследовании доказано, что разработанные методы получения оптимальных решений распределения ресурсов в ГПТОП позволяют повысить эффективность решений на 15-20% по отношению к современным практическим методам, а внедрение РР-системы в практику распределения ресурсов в транспортной системе при обеспечении нормативных значений комфортабельности, безопасности и экологических требований к подвижному составу и в рамках бюджета г. Москвы позволит увеличить провозные возможности парка транспортных средств на 220 тыс. пассажиров. В этом случае при действующем расписании движения транспортных средств потенциальный пассажиропоток на всех видах транспорта увеличится на 1 254 000 пассажиров ежедневно.

Можно констатировать, что выполненное исследование позволяет преодолеть существующую проблему, обозначенную в обновленной «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» – повышения эффективности использования капитальных вложений в развитие транспортного комплекса РФ в целом и ГПТОП, как её основной ресурсоёмкой подсистемы за счёт создания комплексной и

универсальной системы распределения ресурсов. Выполненное диссертационное исследование в совокупности полученных теоретических и практических результатов можно квалифицировать как новое крупное научное достижение, направленное на решение теоретико-прикладной проблемы повышения эффективности транспортного комплекса РФ и имеющее важное хозяйственное значение для развития экономики России.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

АСУ ТК – автоматическая система управления транспортным комплексом

АТП - автотранспортное предприятие

БПП – баланс пассажирских перевозок

ВК – весовой коэффициент

ГПТ – городской пассажирский транспорт

ГПТОП – городской пассажирский транспорт общего пользования

ИС – информационное состояние

КОВ – коэффициент относительной важности

КРР – коэффициенты распределения ресурсов

ЛО – логический оператор

ЛПР – лицо принимающее решение

НГПТ – наземный городской пассажирский транспорт

ПО – программное обеспечение

РАТ – Российская академия транспорта

РР – распределение ресурсов

СВС – состояние внешней среды

СМО – система массового обслуживания

СМПР – специальные методы принятия решений

СМРР – специальные методы распределения ресурсов

СПО – специализированное программное обеспечение

СПР – стратегия принятия решения

ТЭБ – транспортно-экономический баланс

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Евсюков, М. Автомобильный транспорт – важнейшая отрасль экономики России / М.Евсюков // Автомобильный транспорт. – 2002. № 4. – С . 9-14.
2. Транспортная система - мощный катализатор экономического роста страны // Автомобильный транспорт. – 2000. № 1. – С. 5-6.
3. Бутов, А. Транспорт влияет на все аспекты жизни общества / А. Бутов// Автомобильный транспорт. – 2000. № 1. – С.10-11.
4. Интеллектуальные транспортные системы. Цифровые инструменты управления транспортом. Материалы III Международная научно-практическая конференция ТРАНСПОРТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЕ БУДУЩЕЕ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТОМ 24 и 25 мая 2018 г., Москва, МАДИ.
5. Федеральная служба государственной статистики. Транспорт. Перевозки пассажиров. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport>. Дата обращения 20.12.2013 г.
6. Эффективность городского пассажирского общественного транспорта: Монография / А.В. Вельможин, В.А. Гудков, А.В. Куликов, А.А. Сериков; Волгоград, гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2002. – 256 с.
7. Носов, А.Л. Оценка качества работы городского пассажирского транспорта/А.Л. Носов // Вопросы новой экономики. – 2014. № 4(32). – С. 80-86.
8. Носов, А.Л. Сравнительная характеристика мониторинга качества предоставления государственных и муниципальных услуг в 2013 и 2014 гг. / А.Л. Носов, М.А. Макаркина // Научно-методический электронный журнал «Концепт». - 2015. № 10. – С. 11-15.
9. Макаркина, М.А. Пути оптимизации проведения мониторинга качества и доступности предоставления государственных и муниципальных услуг / М.А. Макаркина, А.Л. Носов // Проблемы и перспективы социально-экономического

развития регионов: материалы Всерос. науч.-практ. конф.: в 2 т. – Киров, 2015. – С. 50-52.

10. Халтурин, Р.А. Концепция управления пассажирским транспортом в целях сбалансированного развития / Р.А. Халтурин, М.Ю. Карелина // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18, № 8. – С. 61-67.

11. Мишарин, А.С. Актуализация Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 год / А.С. Мишарин, О.В. Евсеёв//«Транспорт Российской Федерации». – 2013. № 2 (45). – С 4-13.

12. Сагинова, О.В. Методологические аспекты управления качеством транспортного обслуживания / О.В. Сагинова, И.В. Спирин, Н.Б. Завьялова, Р.Р. Сидорчук // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). – 2016. Т. 7. № 2. С. 28-37. Doi: 10.18184/2079-4665.2016.7.2.28.37

13. Колмагоров, А.Н. Теория функций действительного переменного // Математика в СССР за 15 лет лет. М.; Л., 1932. С. 37-48.

14. Анохин, П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем / П.К.Анохин. – Москва: Директ-Медиа, 2008. – 131 с.

15. Канторович, Л.В. Математика в экономике: достижения, трудности, перспективы / Л.В. Канторович. – Ростов-на-Дону : Мапрекон, 2010. – 19 с.

16. Шаталин, С.С. Пропорциональность общественного производства: (Очерк теории и методологии планирования)/ С.С. Шаталин – М.: Экономика, 1968. – 215 с.

17. Шаталин, С.С. Принципы и проблемы оптимального планирования народного хозяйства. / С.С. Шаталин – М., 1971.

18. Шаталин, С.С. Интенсивный тип социалистического расширенного воспроизводства. / С.С. Шаталин – М.: о-во Знание РСФСР, 1978. – 45 с.

19. Шаталин, С.С. Экономика СССР – единый народнохозяйственный комплекс. / С.С. Шаталин – М.: Знание, 1980.

20. Методы народнохозяйственного прогнозирования/А.И. Анчишкин, Ю.В. Яременко, [и др.]; под ред. Н.П. Федоренко [и др.]. М.: Наука, 1985 г. – 472 с.

21. Архипов, В.М. Стратегическое планирование/В.М. Архипов. – СПб, изд-во СПуУЭФ, 1992.
22. Стратегический менеджмент: учеб. пособие / В.М. Архипов, О.Р. Верховская, М.А. Соловьев – СПб., изд-во СПуУЭФ, 2004. – 276 с.
23. Указ Президента Российской Федерации от 13 мая 2017 г. №208 «О Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года». Электронный ресурс. Режим доступа: Дата обращения 05.11.2023 г.
24. Горев, А.Э. Проектирование систем городского пассажирского транспорта / А.Э. Горев, Д.Т. Оспанов. Серия «Библиотека транспортного инженера». СПб.: «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2018. – 256 с.
25. Шеремет, А.Д. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия: учебник/А.Д. Шеремет, – М.: Инфра-М, 2008 г.
26. Каплан, Р.С. Стратегическая система показателей. От стратегии к действию/Р.С. Каплан, Д.П. Нортона. Пер. с англ. – М.: Олимп-бизнес, 2004. 210 с.
27. Каплан, Р.С. Стратегические карты. Трансформация нематериальных активов в материальные результаты /Р.С. Каплан, Д.П. Нортона. Пер. с англ. – М.: Олимп-бизнес, 2005. 512 с.
28. Подиновский, В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 256 с.
29. Подиновский, В.В. Эффективные планы в многокритериальных задачах принятия решений в условиях неопределённости. – В кн.: Многокритериальные задачи принятия решений / В.В. Подиновский. – М.: Машиностроение, 1978 г. С. 102-113.
30. Ногин, В.Д. Критерии существования решений в конечномерной задаче многоцелевой оптимизации / В.Д. Ногин. Вестник ЛГУ, сер. Математика механика и астрономия. 1980 г. № 7. – С.27-32.
31. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 395 с.

32. Черноруцкий, И.Г. Методы принятия решений / И.Г. Черноруцкий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
33. Эрроу, К. Дж. Допустимые точки выпуклых множеств. – В кн.: Матричные игры / К.Дж. Эрроу, Е.В. Баранкин, Д. Блекуэлл. – М.: Физматгиз, 1961 г. С. 274-280.
34. Халтурин, Р.А. Управление состоянием эффективности в сложных транспортных системах / Р.А. Халтурин, А.А. Акулов, В.Д. Кутков // Транспортное дело России. – 2025. № 3. – С. 107-111.
35. Пугачев, И.Н. Методология развития эффективного и безопасного функционирования транспортных систем городов: Монография / И.Н. Пугачев. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 260 с.
36. Комаров, В.В. Архитектура и стандартизация телематических и интеллектуальных транспортных систем. Зарубежный опыт и отечественная практика/ В.В. Комаров, С.А. Гараган // – М.: НТБ «Энергия», 2012. – 352 с. ISBN 978-5-903954-06-3
37. Комаров, В.В. Методические особенности разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем / В.В. Комаров // Известия Московского государственного технического университета (МАМИ). – 2012. №1. Том.1 – с. 130-138.
38. Беллман, Р. Некоторые вопросы математической теории процессов управления : пер. с англ. В.В. Величенко и ЛА. Тененбаума / Р. Беллман, И. Гликсберг, О. Гросс; под ред. М. А. Айзермана, Р.В. Гамкрелидзе. – М.: Изд-воиностр. лит., 1962. – 336 с.
39. Вильсон, А. Энтропийные методы моделирования сложных систем: пер. с англ. / А.Вильсон. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. – 248 с.
40. Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений/ Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

41. Мартин, Н. Математическая теория энтропии: пер. с англ. В.А. Каймановича / Н. Мартин, Д. Ингленд; под ред. А.М. Вершина. – М.: Мир, 1988. – 350 с.
42. Мушик, Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер. Пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 208 с.
43. Подиновский, В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 326 с.
44. Ногин, В.Д. Основы теории оптимизации / В.Д. Ногин. И.О. Протодьяконов, И.И. Евлампиев. – М.: Высшая школа, 1986. – 383 с.
45. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
46. Саати, Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Томас Л. Саати. Пер. с англ., науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 360 с.
47. Таха, Введение в исследование операций / Таха, А. Хэмди. – М.: Мир, 2001, – С. 354-370.
48. Таха, Введение в исследование операций / Таха, Хемди А. – М.: ИД «Вильямс», 2005. – 912 с.
49. Калашников, В.В. Качественный анализ поведения сложных систем методом пробных функций. / В.В. Калашников. Серия «Теория и методы системного анализа». – М.: Гл. ред. физ. мат. лит-ры изд-ва «Наука», 1978 г. – 248 с.
50. Хованов, Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците / Н.В. Хованов // СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. – 196 с.
51. Хованов, Н.В. Модели учета неопределённости при построении сводных показателей эффективности деятельности сложных производственных систем. / Н.В. Хованов, Ю.В. Федотов / Научные доклады № 28 (R) – 2006, Изд-во СПб.: НИИ менеджмента СПбГУ, 2006. – 37 с.

52. Богданова, Д.Р. Модели и методы анализа эмоционально окрашенной информации для поддержки принятия решений в сфере услуг с использованием технологии аффективных решений: дис. ... д-та. техн. наук: 2.3.4. Управление в организационных системах / Богданова Диана Радиковна. – Уфа, 2022. – 355 с.

53. Вилисов, В.Я. Модели, методы, и алгоритмы информационно-аналитической поддержки принятия решений по распределению сил и средств при ликвидации пожаров в чрезвычайных ситуациях: дис. ... д-та. техн. наук: 2.3.4. Управление в организационных системах / Вилисов Валерий Яковлевич. – Москва, 2012. – 433 с.

54. Климовцев, В.М. Распределение системы поддержки принятия решений в управлении Государственной противопожарной службой/В.М. Климовцев// Материалы II международной конференции «Системы безопасности – 2002». – М.: АГПС МЧС России. 2002. – С. 145-146.

55. Топольский, Н.Г. Определение ранга пожара на объекте по диаграммам/ состояния / Н.Г. Топольский, Ю.В. Прус, В.М. Климовцев // 13 международная конференция «Системы безопасности» СБ-2004. – М.: АГПС МЧС России. 2002. – С. 297-299.

56. Оуэн, Г. Теория игр / Г. Оуэн. – М.: Мир, 1971. – 230 с.

57. Моррис, У. Наука об управлении. Байесовский подход / У. Моррис. – М.: Мир, 1971. – 304 с.

58. Рындин, Н.А. Управление процессами принятия решений в организационных системах на основе многовариантности структурной оптимизации: дис. ... д-та. техн. наук: 2.3.4. Управление в организационных системах / Рындин Никита Александрович. – Воронеж, 2023. – 236 с.

59. Закиева, Е.Ш. Методология поддержки принятия решений при управлении социетальной системой на основе динамического моделирования и интеллектуальных технологий: дис. ... д-та. техн. наук: 2.3.4. Управление в организационных системах/ Закиева Елена Шавкатовна. – Уфа, 2022. – 310 с.

60. Karlis A.D., Kottas T.L., Boutalis Y.S. A novel maximum power point tracking method for PV systems using fuzzy cognitive networks (FCN) // *Electric Power Systems Research*. – 2007. № 77. – P. 315-327.
61. Martynov V.V., Sakál P., Skuratov A., Filosofova E.I., Zaytseva A.A., Zakieva E.Sh. Chapter 11: CSRP-System design technology of training information support of competent professionals. *Handbook of research on engineering education in a global context*. – IGI Global, 2019. – P. 115-125.
62. Zhang J.Y., Liu Z.-Q., Zhou S. Quotient FCMs – a decomposition theory for fuzzy cognitive maps // *IEEE Transactions on fuzzy systems*. – 2006. – Vol. 11, № 5. – P. 593-604.
63. Федулов А.С. Нечеткие реляционные когнитивные карты / А.С. Федулов // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2005. № 1. – С. 120-132.
64. Borisov V.V., Fedulov A.S. Generalized rule-based fuzzy cognitive maps: structure and dynamics model // *Lecture notes in computer science*. – 2004. – V. 3316. – P. 918-922.
65. Carvalho J.P., Tomé J.A. Rule based fuzzy cognitive maps – qualitative systems dynamics // *Proceedings of the 19th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS'2000)*. – Atlanta, 2000.
66. Kosko B. Fuzzy cognitive maps // *International Journal of Man-Machine Studies*. – 1986. – Vol. 24. – P. 65-75
67. Макаров, В.Л. Современные методы прогнозирования последствий управленческих решений/ В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин // *Управленческое консультирование*. – 2015. №7. – С. 12-24.
68. Макаров, В.Л. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели) / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин. – М.: Экономика, 2013. – 295 с.
69. Макаров, В.Л. Разработка агенториентированной демографической модели России и её суперкомпьютерная реализация / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин.

Е.Д. Сушко // Вычислительные методы и программирование. – 2018. – Т.19. № 4. – С. 368-378.

70. Сушко, Е.Д. Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация: препринт # WP/2012/292. / Е.Д. Сушко. – М.: ЦЭМИ РАН, 2012. – 54 с.

71. Зимин, А.В. Развитие теоретических основ и методов конкурентного управления жизненным циклом сервисов ИТ-провайдера: дис. ... д-та. техн. наук: 05.13.10 Управление в социальных и экономических системах / Зимин Алексей Валерьевич. – Новокузнецк, 2021. – 284 с.

72. Гермейер, Ю.Б. Введение в теорию исследования операций / Ю.Б. Гермейер. – М.: Наука, 1971. – 384 с.

73. Пономарев, В.А. Теоретико-игровые модели распределения ресурсов / В.А. Пономарев // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2018. № 4. – С. 98-105.

74. Поспелов, А.Б. Методы многокритериальной целочисленной оптимизации / А.Б. Поспелов. – USA: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 232 с.

75. Моисеева, Т.В. Методологические основы поддержки принятия решений по управлению инновационным развитием социотехнических объектов на основе интересубъективного подхода: дис. ... д-та. техн. наук: 2.3.4. Управление в организационных системах / Моисеева Татьяна Владимировна. – Самара, 2022. – 359 с.

76. Kenny, V. There's Nothing Like the Real Thing. Revisiting the Need for a Third-Order Cybernetics / V. Kenny // Constructivist Foundations. – 2009. № 4 (2). – Pp. 100-111.

77. Mancilla, R. Introduction to Sociocybernetics (Part 1): Third Order Cybernetics and a Basic Framework for Society / R. Mancilla // Journal of Sociocybernetics. – 2011. – Vol. 42, № 9. – Pp. 35-56.

78. Umpleby, S. The Science of Cybernetics and the Cybernetics of Science / S. Umpleby // Cybernetics and Systems. – 1990. – Vol. 21, № 1. – P. 109-121.

79. Верзилин, Д.Н. Неокибернетика: состояние исследований и перспективы развития / Д.Н. Верзилин, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // SAEC. –2019. №1. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/neokibernetika-sostoyanie-issledovani-i-perspektivy-razvitiya>. Дата обращения 12.05.2024 г.

80. Соколов, Б.В. Неокибернетика в современной структуре системных знаний / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. № 2 (3). – С. 3-10.

81. Теслер, Г.С. Новая кибернетика. / Г.С. Теслер. – Киев: Логос, 2004. – 404 с.

82. Самарин, И.В. Методы, модели и алгоритмы автоматизации организационного управления пожаровзрывобезопасностью объектов топливно-энергетического комплекса: дис. ... д-та. техн. наук: 2.3.4 Управление в организационных системах, 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами/ Самарин Илья Владимирович. – Москва, 2022. – 446 с.

83. Ларичев, О.И. Выявление экспертных знаний / О.И. Ларичев, А.И. Мечитов, Е.М. Мошкович, Е.М. Фуремс. – М.: Наука, 1989. – 128 с.

84. Ларичев, О.И. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений / О.И. Ларичев, Е.М. Мошкович. – М.: Наука, Физматлит, 1996. – 208 с.

85. Литвак, Б.Г. Разработка управленческого решения: учебник / Б.Г. Литвак. – 3-е изд., испр. – М.: Дело, 2002. – 392 с.

86. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе /Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. –278 с.

87. Данеёв, А.В. Алгоритм управления сложными организационно-техническими системами / А.В. Данеёв, А.А. Воробьев, Д.М. Лебедев // Известия ИГЭА. 2010. № 4 (72). – С 83-86.

88. Хомяков, Д.А. Методика интеллектуальной поддержки принятия решений в системе управления производственными подразделения / Д.А. Хомяков, С.К. Демин, Д.Ю. Семизоров // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12. Ч.2. 2012. – С. 255-261.

89. Энгель, Е.А. Модели и методы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений / Е.А. Энгель // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетникова. 2011. – С. 106-112.

90. Рындин, Н.А. Компонентная оптимизация развивающейся цифровой среды управления в организационных системах / Н.А. Рындин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. №10 (2). – С. 1-9.

91. Халтурин, Р.А. Методы оценки эффективности в многоуровневых логистических системах транспортного производства / Р.О. Судоргин, Р.А. Халтурин, А.А. Акулов // Транспортное дело России. 2025. № 6. – С. 198-200.

92. Терентьев, А.В. Методы принятия решений в условиях неопределённого состояния «внешней среды» / А.В. Терентьев, Б.Д. Прудовский // Транспортное планирование и моделирование: сб. трудов Международной научно-практической конференции (26-27 мая 2016 г.) СПбГАСУ. – СПб., 2016. – С. 145-149.

93. Терентьев, А.В. Развитие метода районирования / А.В. Терентьев // Материалы 4-ой международной научно-практической конференции. Инновации на транспорте и в машиностроении. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. – С. 127-130.

94. Халтурин, Р.А. Модель снятия неопределенности в сложных системах распределения ресурсов / Р.А. Халтурин, Р.О. Судоргин, М.Ю. Карелина // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18, № 9. – С. 41-47.

95. Вагнер, Г. Основы исследования операций / Г. Вангер // Т. 3. – М.: Мир, 1973. – 501 с.

96. Янг, С. Системное управление организацией / С. Янг // М.: Советское радио, 1972. – 455.

97. Иберла, К. Факторный анализ / К. Иберла – М.: Статистика, 1980. – 398 с.
98. Черноруцкий, И.Г. Методы принятия решений / И.Г. Черноруцкий // СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
99. Guiasu, S. and Shenitzer, A. The principle of maximum entropy. *The Mathematical Intelligencer*, № 7 (1), 1985. – Pp. 42-48.
100. Harremoës, P. and Topsøe, F. Maximum Entropy Fundamentals, *Entropy*, № 3(3), 2001. – Pp. 191-226.
101. Shannon, Claude E.: Prediction and entropy of printed English/ *The Bell System Technical Journal*, 30:50-64. – 1950.
102. Shannon, Claude E.: A Mathematical Theory of Communication/ *Bell System Technical Journal* / 1948. Vol. 27. – Pp. 379-423, 623-656.
103. Fishburn, P.C. Analysis of Decisions with Incomplete Knowledge of Probabilities // *Operations Research*. 1965. – Vol. 13. № 2. – Pp. 217-237.
104. Fishburn, P.C. *Decision and Value Theory*. – N. Y.: John Wiley & Sons, 1964. – 451 p.
105. Fishburn, P.C. Independence in Utility Theory with Whole Product Sets // *Operations Research*. – 1965. Vol. 13. № 1. – Pp. 28-45.
106. Fishburn, P.C. *Utility Theory for Decision Making*. – N. Y.: John Wiley & Sons, 1970. – 234 p.
107. Arimoto S. Information-theoretical considerations on estimation problems. *Information and Control*. – October 1971. Vol. 19. № 3. – Pp. 181–194.
108. Arimoto S. On the converse to the coding theorem for discrete memoryless channels. *IEEE Trans. Information Theory*. – May 1973. Vol. 19. № 3. – Pp. 357-359.
109. Arimoto S. \ Information measures and capacity of order  $\alpha$  for discrete memoryless channels. In *Topics in Information Theory – 2nd Colloquium*, Keszthely, Hungary, 1975, *Colloquia Mathematica Societatis Janos Bolyai* (I. Csisz ' ar and P. Elias editors). 'Amsterdam, the Netherlands: North Holland. – Vol. 16. – Pp. 41-52.

110. Сомов, В.Л.. Методы определения коэффициентов весоности динамических интегральных показателей / В.Л. Сомов, М.Н Толмачев // Вопросы статистики. 2017. № 6. – С. 74-79.

111. Трухаев, Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределённости // Р.И. Трухаев – М.: Наука, 1981. – 258 с.

112. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 года № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731> Дата обращения 04.09.2023 г.

113. Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской федерации на период до 2030 года». Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45726> Дата обращения 22.11.2023 г.

114. Халтурин, Р.А. Методы снятия неопределенности в сложных логистических системах при распределении ресурсов по объектам инфраструктуры / Р.А. Халтурин, А.В. Терентьев // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 3-1 (90). – С. 116-123. DOI 10.33979/2073-7432-2025-3-1(90)-116-123

115. Халтурин, Р.А. Концепция проектирования многоуровневой иерархической структуры управления ресурсами в пассажирской транспортной системе / Р.А. Халтурин, Р.О. Судоргин // Транспорт и информационные технологии. 2025. – Т. 15. № 3. – С. 222-243.

116. Месарович, М. Общая теория систем: математические основы / М. Месаревич, И. Такахара – М.: Мир, 1978.

117. Халтурин, Р.А. Особенности проектирования моделей управления ресурсами в сложных транспортных системах / Р.А. Халтурин // Транспортное дело России. – 2025. № 3. – С. 16-19.

118. Мильнер, Б.З. Тория организации: учебник, 2-изд. перераб. и доп. / Б.З. Мильнер. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 480 с.

119. Рапопорт, В.С. Методы совершенствования организационных структур управления. / В.С. Рапопорт, М.З. Дулькин. – М.: АНХ, 1987 г. – 126 с.
120. Виханский, О.С. Стратегическое управление. 2-изд. перераб. и доп. / О.С. Виханский. – М.: Гардарика, 2000 г. – 296 с.
121. Гордина, Ю.В. Теоретические аспекты формирования методик управления городским пассажирским транспортом / Ю.В. Гордина, М.А. Серебрякова // Известия Иркутской государственной экономической академии. Проблемы теории и практика управления. 2014. №5. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-aspekty-formirovaniya-metodik-upravleniya-gorodskim-passazhirskim-transportom> Дата обращения 11.10.2023 г.
122. Национальная концепция устойчивых городских транспортных систем / Юн О. Джунг [и др.]. — М. : Алекс, 2013. — 192 с.
123. Чумакова, А.И. Тенденции развития пассажирского автомобильного транспорта города Омска в современных социально-экономических условиях/ А.И. Чумакова, Т.А. Левтеёва // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2017. № 3 (23). – С 54-61.
124. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2016: Стат. сб. / Росстат. – М., 2016. – 1326 с.
125. Корягин, М.Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов / М.Е. Корягин. — Новосибирск: Наука, 2011. — 140 с.
126. Якунина, Н.В. Методология повышения качества перевозок пассажиров общественным автомобильным транспортом: монография / Н.В. Якунина, Н.Н. Якунин. — Оренбург: ОООИПК» Университет», 2013. – 289с.
127. Шмарин, А.А. Оптимизация модели взаимодействия участников рынка пассажирских перевозок (на примере Оренбурга) / А.А. Шмарин, А.П. Шмарин // Региональные исследования. 2014. № 2 (44). – С. 45-50.
128. Якунин, Н.Н. Моделирование экономической мотивации качественных перевозок пассажиров автомобильным транспортом по городским регулярным

маршрутам / Н.Н. Якунин, А.А. Шмарин, А.П. Шмарин // Экономика и управление в сфере услуг. 2017. №13. – С. 198-201.

129. Якунин, Н.Н. Анализ положений Федерального закона Российской Федерации от 13.07.2015 г. № 220 с позиции методологии повышения качества перевозок пассажиров автомобильным транспортом / Н.Н. Якунин, Н.В. Якунина, А.В. Спириин // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. №2. – С. 128-132.

130. Пономарева, М.С. Согласование интересов перевозчиков на сегменте региональных пассажирских перевозок / М.С. Пономарева // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015. Том 7. № 5. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/151EVN515.pdf>. DOI: 10.15862/151EVN51 Дата обращения 21.08.2023 г.

131. Брусянин, Д.А. Обоснование транспортных средств на маршрутной сети регулярных автомобильных и железнодорожных пассажирских перевозок / Д.А. Брусянин, В.М. Сай, С.В. Вихарев // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2013. № 1 (17). – С. 50-64.

132. Брусянин, Д.А. Экономические механизмы регулирования транспортного комплекса региона / Д.А. Брусянин, М.С. Пономарева, Я.В. Хоменко // Казанская наука. 2014. №4. – С. 63-69.

133. Брусянин, Д.А. Классификация маршрутных схем с учётом размещения транспортно-пересадочных узлов» / Д. Брусянин, С. Шавзис, С. Вихарев // Логистика. 2015. №4. – С. 36-43.

134. Брусянин, Д.А. Оптимизация региональной маршрутной сети пригородных и междугородных пассажирских перевозок с использованием логистических принципов» / Д.А. Брусянин, А.Л. Казаков, А.М. Маслов // Транспорт Урала. 2012. №1 (32). – С. 106-109.

135. Брусянин, Д.А. Подход к формированию оптимальной маршрутной сети пассажирского общественного транспорта на региональном уровне / Д.А. Брусянин // Транспорт Урала. 2015. № 1 (44). – С. 31-34.

136. Брусянин, Д.А. Оптимизация региональной маршрутной сети пригородных и междугородных пассажирских перевозок с использованием

логистических принципов/ Д.А. Брюсянин, А.Л. Казаков, А.М. Маслов // Транспорт Урала, 2012. № 1 (32). – С. 106-109.

137. Вакуленко, С.П. Теоретические аспекты механизмов взаимодействия в транспортных системах / С.П. Вакуленко, О.Н. Ларин, С.Б. Лёвин // Мир транспорта, 2014. № 6. – С. 14-27.

138. Васильев, А.Г. Повышение эффективности пригородных и междугородных пассажирских перевозок на базе АСУ: автореферат диссертации канд. техн. наук: 05.22.10 / Васильев Александр Геннадьевич – Екатеринбург, 2012, – 20 с.

139. Волкова, Е.М. Формирование системы взаимодействия железнодорожной компании с субъектами рынка пригородных пассажирских перевозок: автореферат диссертации канд. эконом. наук: 08.00.05 / Волкова Елена Михайловна. – СПб, 2013. – 24 с.

140. Новоселов, В.И. Повышение эффективности использования подвижного состава муниципального пассажирского транспорта: автореферат диссертации канд. эконом. наук: 08.00.05 / Новоселов Валерий Иванович. – Новосибирск. 2000. – 25 с.

141. Сай, В.М. Образование, функционирование и распад организационных сетей: монография / В.М. Сай, С.В. Сизый. – Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 270 с.

142. US Public Law 105-178 Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA-21), 1998.

143. Григорьев, Л.И. Экспертные системы и их применение (на примере нефтегазовой геологии) / Л.И. Григорьев, М.С. Арабаджи, И.Т. Гасымов – М.: Газпром, 1993. – 69 с.

144. Брюсянин, Д.А. Модель взаимовыгодного сотрудничества перевозчиков на сегменте внутрирегиональных пассажирских перевозок / Д.А. Брюсянин, М.С. Пономорева // ВЕСТНИК Оренбургского государственного университета. 2015. № 9 (184). – С. 137-143.

145. Халтурин, Р.А. Модель структуры системы распределения ресурсов, основанной на функционально-сетевом принципе представления показателей / Р.А. Халтурин, И.Ю. Каштанов, В.Д. Кутков, Н.С. Акиншин // *International Journal of Advanced Studies*. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 234-251.
146. Смейл, С. Глобальный анализ и экономика. I. Оптимум по Парето и обобщенная теория Морса. УМН. – 1972. Т. 27. Вып. 3 (165).– С. 177-187.
147. Сидняев, Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособие / Н.И. Сидняев, Н.Т. Вилисова – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 463 с.
148. Корчагин, В.А. Модель функционирования транспортно-логистической системы региона / В.А. Корчагин, Ю.Н. Ризаева, Т.В. Корчагина // Киев: Вестник НТУ. 2012. № 25. – С. 310-313.
149. Халтурин, Р.А. Аналитические модели управления в системе распределения ресурсов транспортного комплекса / Р.А. Халтурин, М.Г. Плетнев, И.Ю. Каштанов // *Транспорт и информационные технологии*. 2025. Т. 15, № 3. – С. 203-221.
150. Халтурин, Р.А. Оценка эффективности применения аналитических методов снятия неопределенности в системах управления пассажирским транспортом / Р.А. Халтурин, А.А. Акулов, Д.С. Талдыкин // *Транспортное дело России*. 2025. № 6. – С. 182-186.
151. Халтурин, Р.А. Цифровое моделирование системы распределения ресурсов в пассажирском транспортном комплексе / Р.А. Халтурин, Д.В. Никитин, И.Ю. Каштанов // *Техник транспорта: образование и практика*. 2025. Т. 6, № 3. – С. 301-308.
152. Хемди, А. Таха Введение в исследование операций / Хемди А. Таха. – М.: ИД «Вильямс», 2005. – 912 с.
153. Евсюков, М. Автомобильный транспорт – важнейшая отрасль экономики России / М.Евсюков // *Автомобильный транспорт*. 2002. № 4. – С. 9-14.
154. Транспортная система – мощный катализатор экономического роста страны // *Автомобильный транспорт*. 2000. № 1. – С. 5-6.

155. Бутов, А. Транспорт влияет на все аспекты жизни общества / А. Бутов // Автомобильный транспорт. 2000. № 1. – С.10-11.
156. Криницкий, Е. Модернизация транспортного комплекса России / Е. Криницкий // Автомобильный транспорт. – 2001. – № 10. – С. 3-6.
157. Вельможин, А.В. и др. Теория организации и управления автомобильными перевозками: логистический аспект формирования перевозочных процессов / Вельможин А.В., Гудков В.А., Миротин Л.Б. – Волгоград: РПК «Политехник», 2001. – 177 с.
158. Государственная транспортная политика Российской Федерации. Концепция // Автомобильный транспорт. 1998. № 1. – С. 65-72.
159. Государственная транспортная политика Российской Федерации. Концепция // Автомобильный транспорт. 1998. № 2. – С. 34-41.
160. Дмитриев, Е. Пути повышения эффективности перевозок / Е. Дмитриев // Автомобильный транспорт. 2001. № 3. – С. 26-29.
161. Евсюков, М. Надо работать над системой управления автотранспортом / М. Евсюков // Автомобильный транспорт. 2001. № 3. – С. 15- 16.
162. Златин, П.А. На пороге XXI века / П.А. Златин // Автомобильный транспорт. 2000. № 1. – С. 15-16.
163. Златин, П. Автотранспорт на рубеже XXI века / П.А. Златин // Автомобильный транспорт. 2000. № 8. – С. 6-8.
164. Федеральный закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации». Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38630> Дата обращения 14.12.2023 г.
165. Указ Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449> Дата обращения 07.07.2021 г.
166. Синергия концептов развития транспортных систем в условиях современной урбанизации России: моногр. / И.Н. Пугачев, Ю.И. Куликов, А.Э. Горев, Г.Я. Маркелов, Т.Е. Кондратенко. – СПб.: СПбГАСУ, 2019. – 212 с.

167. Стратегия развития транспортных систем городов России: монография / И.Н. Пугачев, Ю.И. Куликов, Г.Я. Маркелов, Т.Е. Кондратенко. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. Гос. Ун-та, 2017. – 148 с.
168. Гличев, А.В. Прикладные вопросы квалиметрии / А.В. Гличев, О.Г. Рабинович, М.И. Примаков, М.М. Синицин. – М.: Издательство стандартов, 1983. – С 136.
169. Кудж, С.А. Многоаспектность рассмотрения сложных систем/ С.А. Кудж // Перспективы науки и образования. 2014, №1. – С. 38-43
170. Луман, Н. Введение в системную теорию / Н. Луман // Изд-во «Логос», 2007. – 360 с.
171. Сурмин, Ю.П. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие / Ю.П. Сурмин. – Киев: МАУП, 2003. – 368 с.
172. Теория систем и системный анализ в управлении организациями. Справочник: учеб. пособие / под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 848 с.
173. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион. пер. с англ. под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Издательство «Мир», 1980. – 610 с.
174. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2001. – 479 с.
175. Гудков, В.А. Математическое моделирование муниципальных автотранспортных пассажирских перевозок / В.А. Гудков, М.С. Турпищева, Е.Р. Нургалиев // Автотранспортное предприятие. 2010. № 4. – С. 35-37.
176. Турпищева, М.С. Методика оценки качества системы пассажирских автоперевозок / М.С. Турпищева, Е.Р. Нургалиев // Вестн. Астрахан. Гос. техн. ун-та. 2014. № 1 (57). – С. 42-46.
177. Герами, В.Д. Методология формирования системы городского пассажирского общественного транспорта / В.Д. Герами. – М.: Транспорт, 2001. – 311 с.

178. Шабаршова, Э.В. Система пассажирского транспорта города и агломерации / Э.В. Шабаршова. – Рига: Зинатне, 1981. – 279 с.

179. Шабанов, А.В. Региональные логистические системы общественного транспорта: методология формирования и механизмы управления / А.В. Шабанов. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 205 с.

180. Сагинова, О.В. Методологические аспекты управления качеством транспортного обслуживания / О.В. Сагинова, И.В. Спирин, Н.Б. Завьялова, Р.Р. Сидорчук // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2016. Т. 7. № 2. – С. 28-37.

181. Корчагин, В.А. Сбалансированное взаимодействие общества и биосферы при использовании автомобилей / В.А. Корчагин, Ю.Н. Ризаева // Проблемы качества и эксплуатации АТС: матер. III межд. науч. конф., Пенза. – 2004. – С. 252-263.

182. Рассоха, В.И. Ситуационное управление автотранспортными системами (Ч. 1. Системная эффективность эксплуатации автомобильного транспорта) / В.И. Рассоха // Вестник Оренбургского государственного университета (ОГУ). – 2009. – № 9. – С. 148-153.

183. Рассоха, В.И. Ситуационное управление автотранспортными системами (Ч. 2. Синтез системы управления) / В.И. Рассоха // Вестник ОГУ. – 2009. – № 10. – С. 144-150.

184. Литвак, Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений / Б.Г. Литвак. – М.: Патент, 1996. – 271 с.

185. Литвак, Б.Г. Экспертные технологии в управлении / Б.Г. Литвак. – М.: Дело, 2004. – 400 с.

186. Литвак, Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа / Б.Г. Литвак. – Изд. 2-е, стер. – М.: Исслед. центр проблем качества подгот. специалистов, 2009. – 223 с.

187. Романовская, О.А. Организационно-техническая система управления / О.А. Романовская // ВЕСТНИК ИНСТИТУТА. №1. 2009 г. – С. 57-60.

188. Ларин, С.Н. Особенности принятия многокритериальных решений в условиях вероятностной неопределённости экономическими субъектами сферы жилищно-коммунального хозяйства / С.Н. Ларин, Л.Ю. Лазарева, Н.Н. Юртына // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 3. – С. 194-202.

189. Билятдинов, К.З. Оценка качества управления организационно-техническими системами / К.З. Билятдинов, Е.А. Кривчун// Записки Горного института. 2014. Т.209. – С. 152-154.

190. Зырянова, Ю.Т. Планирование профилактики в организационно-технических системах / Ю.Т. Зырянов, К.А. Малыков // Вестник ТГТУ. Том 10. №2. 2004. – С. 410-420.

191. Бурков, В.Н. Проблемы комплексирования и декомпозиция механизмов управления организационно-техническими системами / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков // Проблемы управления. Управление в социально-экономических системах. 2016. №5. – С. 14-23.

192. Большаков, А.А. Синтез интеллектуальных организационно-технических систем управления / А.А. Большаков // Вестник ТГТУ. 2004. Том. 10. № 4 А. – С. 954-959.

193. Терентьев, А.В. Векторная оптимизация / А.В. Терентьев, Б.Д. Прудовский // Материалы 2-й международной научно-практической конференции. Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2014. – С. 64-66.

194. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. — М.: Высшее образование. 2005.

195. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases / Daniel Kahneman, et al. – 21st. – Cambridge University Press, 2005. – 555p.

196. Елфимов, Г.М. Понятие «нового» в теории эмергентной эволюции. / Г.М. Елфимов // Управленческое консультирование. СПб. 2009. № 1. – С.187-222.

197. Эшби, У.Р. Принципы самоорганизации / У.Р. Эшби – Москва: Мир, 1966. – 332 с.
198. Цветков, В.Я. Прикладные системы / В.Я. Цветков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 3. – С. 76-85.
199. Цветков, В.Я. Сложные технические системы / В.Я. Цветков // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 3. – С. 86-92.
200. Перегудов, Ф.И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко – М.: Высшая школа, 1989. – 368 с.
201. Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир. – М.: Радио и связь, 1990. – 539 с.
202. Попов, Э.В. Статические и динамические экспертные системы / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель, М.Д. Шапот – М.: Финансы и статистика, 1996.
203. Сурмин, Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учеб. Пособие / Ю.П. Сурмин – К.: МАУП, 2003. – 368 с.
204. Купер, Дж. Вероятностные методы анализа сигналов и систем / Дж. Купер, М. Макгиллем – М.: Мир, 1989. – 376 с.
205. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов / Р. Отнес, Л. Эноксон – М.: Мир, 1982. – 428 с.
206. Поспелов, Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика / Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1986.
207. Тарасенко, Ф.П. Прикладной системный анализ (Наука и искусство решения проблем): Учебник / Ф.П. Тарасенко. – Томск: Изд-во Том.ун-та, 2004. – 186 с.
208. Мотузка, Д.А. Управление распределением финансовых средств между пассажирским автомобильным транспортом различного типа / Д.А. Мотузка, В.П. Белокуров, В.А. Мотузка // Экономика и управление предприятием. Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 4 – С. 139-142.
209. Белокуров, В.П. Оптимальное моделирование маршрутной сети на основе анализа параметров формирования городского пассажирского транспорта /

В.П. Белокуров, С.В. Белокуров, Д.В. Лихачев // Бюллетень транспортной информации: информационно-практ. журн. 2009. № 10 (172). – с. 33 - 35 .

210. Сай, В.М. Оценка методом линейной сверстки частных критериев вариантов маршрутной сети пассажирских перевозок / В.М. Сай, Д.А. Брусаянин // Экономика железных дорог. 2014. № 10. – с. 63-72.

211. Рачек, С.В. «Инновационные подходы к совершенствованию технологий транспортного обслуживания» / С.В. Рачек // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2007. №19. – с. 84-89.

212. Integrated arterial and freeway operation control strategies for IVHS advanced traffic management // The university of Texas at Austin, 1998.

213. ITMS Operational Test of Advanced Traffic Management and Traveler Information Systems in the Twin Cities Metropolitan Area // Minnesota Department of Transportation, 1992.

214. Ma J. An efficiency-Equity Solution to The Integrated Transportation Corridor Control Design Problem // University of California, 2008.

215. Integration of Off-ramp and Arterial Signal Controls to Minimize the Recurrent Congestion on the I-495 Capital Beltway // Department of Civil and Environmental Engineering University of Maryland, 2010.

216. Coordination of Freeway Ramp Meters and Arterial Traffic Signals Field Operational Test // Institute of Transportation Studies, California PATH Program, 2013.

217. Ефимова, О.Ю. Адаптивная модель управления качеством городского пассажирского транспорта / О.Ю. Ефимова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. 2016, № 1 (41) – С. 48-54.

218. Знаменский, Д.Н. Построение комплексной модели оптимизации маршрутной сети городского транспорта / Д.Н. Знаменский, М.П. Федоров // Научно-технические ведомости. ИННОВАТИКА. СПбГПУ. 2011. № 3. – с. 154-158.

219. Подиновский, В.В. Применение процедуры максимизации основного локального критерия для решения задач теории векторной оптимизации / В.В. Подиновский // Управляемые системы. 1970. Вып. 6. – с. 17-22.

220. Подиновский, В.В. О решении многокритериальной задачи, как задачи оптимизации по одному критерию в условиях неопределённости / В.В. Подиновский // Автоматика и вычислительная техника. 1976. № 3, – с. 45-49.

221. Подиновский, В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1982. – 256 с.

222. Саати, Томас Л. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. Пер. с англ. – М.: Радио и связь. 1991. - 224 с.

223. Саати, Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Томас Л. Саати. Пер. с англ., науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: Изд-во ЛКИ. 2008. – 360 с.

224. Терентьев, А.В. Развитие метода районирования / А.В. Терентьев // Материалы 4-ой международной научно-практической конференции. Инновации на транспорте и в машиностроении. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. – с. 127-130.

225. Терентьев, А.В. Методы решения автотранспортных задач / А.В. Терентьев // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/125-19863> Дата обращения 25.01.2024 г.

226. Терентьев, А.В. Методы определения множества Парето в некоторых задачах линейного программирования / А.В. Терентьев, Б.Д. Прудовский // Записки Горного института. Том 211. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2015. – с. 89-90.

227. Терентьев, А.В. Методы районирования, как методы оптимизации автотранспортных процессов / Ефименко Д.Б., Карелина М.Ю. // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). – с. 291 - 294.

228. A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle / Terentyev A., Evtiukov S., Karelina M. // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 36. – Pp. 149-156.

229. Enhancement of economic efficiency of transport performance using multi-criteria estimation / Moiseev V.V., Terentiev A.V., Stroev V.V., Karelina M.Yu. // *Advances in Economics, Business and Management Research*. 2018. Vol. 61. – Pp. 167-171.

230. Development of Zoning Method for Solving Economic Problems of Optimal Resource Allocation to Objects of Various Importance in Context of Incomplete Information / Terentiev A.V., S.S Yevtukov, E.A. Karelina // *Advances in Economics, Business and Management Research*. V. 128. International Scientific Conference «Far East Con» (ISCFEC 2020). Pp 765-772.

231. Digital object-oriented control models in automobile-road complex systems / A.V. Terentyev, M.Yu. Karelina, T.Yu. Cherepnina, D.A Linnik, V.A. Demin // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 832, 012058 (2020).

232. Methods of optimization of motor transportation processes / Alexey Terentyev, Sergey Evtyukov, Maria Karelina // *MATEC Web of Conferences* 334, 01020 (2021).

233. Сканмаркет. Маркетинговые исследования пассажирского городского транспорта. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://scanmarket.ru/markets-detail/urban-transport-research/> Дата обращения: 12.04.2024 г.

234. Аналитический отчет. Троллейбусный транспорт в России. Состояние и перспективы рынка. – Москва. 2022 г. – 122 с.

235. Транспорт в России. 2022: Статистический сборник / Росстат. – М.: Федеральная служба государственной статистики. 2023. – 101 с.

236. Руководство по устойчивой городской мобильности и территориальному планированию. Содействие активной мобильности / Публикация ЕЭК ООН. – Женева. 2020. – 201 с.

237. Халтурин, Р.А. Развитие транспортной инфраструктуры: проблемы и возможности / Р.А. Халтурин // *Вестник Института экономики Российской академии наук*. – 2012. – № 6. – С. 101-107.

238. Халтурин, Р.А. Система государственного управления транспортом в России / Р.А. Халтурин // Вестник Института экономики Российской академии наук. – 2015. – № 3. – С. 64-72.

239. Халтурин, Р.А. Теоретическое обоснование модели поиска оптимальных решений в сложных системах управления ресурсами / Р.А. Халтурин, Р.О. Судоргин, Н.С. Акинъшин // International Journal of Advanced Studies. 2025. Т. 15, № 1. – с. 214-233.

240. Халтурин, Р.А. Цифровое моделирование системы распределения ресурсов в пассажирском транспортном комплексе / Р.А. Халтурин, Д.В. Никитин, И.Ю. Каштанов // Техник транспорта: образование и практика. 2025. Т. 6, № 3. – С. 301-308.

241. Халтурин, Р.А. Спектральный анализ и теоретико-игровое моделирование взаимодействия распределенных терминальных сетей в идемпотентных векторных пространствах / А.В. Мальшаков, Р.А. Халтурин, С.Д. Шагунов // Транспортное дело России. 2025. № 8. – с. 254-258.

242. Халтурин, Р.А. Аналитическое моделирование распределения ресурсов в инфраструктуре пассажирских систем / Р.А. Халтурин // Научные исследования и разработки 2026: сборник статей VII Международной научно-практической конференции, состоявшейся 5 июня 2026 г. в г. Пензе: в 2 ч. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2026. – Ч. 1. – С. 39-43.

243. Халтурин, Р.А. Метод распределения ресурсов в сложных логистических пассажирских системах / Р.А. Халтурин // актуальные вопросы современной науки: сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции, состоявшейся 5 июня 2026 г. в г. Пензе: в 3 ч. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2026. – Ч. 1. – С. 71-75.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

### Финансовый потенциал развития ГПТОП в городах РФ.

Города с наименьшим дефицитом финансирования. Источник: «Исследование финансового потенциала развития городского пассажирского транспорта», РАТ, 2023-2024 гг.

№ п/п	Регионы	Город	Бюджет на ПТОП млрд.	Билетная выручка млрд. руб.	Ресурсы всего (норматив) млрд. руб.	НМЦК (норматив) млрд. руб.	Свободные ресурсы (превышение над НМЦК) млрд. руб.	Ресурсы на инвест. на 8 лет млрд. руб.	Предельная полная стоимость проекта, сумма млрд. руб.	Отношение ресурсов за срок проекта к стоимости проекта %
	2	2	9	9	10	10	11	12	13	13
1	Республика Саха (Як)	Якутск	4,19	3,83	8,03	5,18	2,84	22,74	10,83	210%
2	Ханты-Мансийский а	Сургут	3,97	4,94	8,91	6,32	2,59	20,76	12,21	170%
3	Ханты-Мансийский а	Нижневартовск	2,75	2,91	5,66	4,06	1,60	12,78	8,61	148%
4	Мурманская область	Мурманск	2,43	2,88	5,31	3,89	1,43	11,43	8,02	142%
5	Санкт-Петербург	Санкт-Петербур	40,12	62,99	103,12	82,60	20,51	164,11	168,00	98%
6	Московская область	Коломна	0,96	1,25	2,21	1,81	0,40	3,19	3,99	80%
7	Тюменская область б	Тюмень	5,93	7,58	13,51	11,39	2,12	16,97	25,67	66%
8	Московская область	Мытищи	1,71	2,49	4,20	3,59	0,61	4,86	7,99	61%
9	Московская область	Химки	1,52	2,79	4,31	3,77	0,55	4,39	7,71	57%
10	Московская область	Люберцы	1,43	2,17	3,60	3,13	0,47	3,74	6,90	54%
11	Красноярский край	Ачинск	0,59	0,93	1,52	1,34	0,18	1,45	3,00	48%
12	Свердловская област	Верхняя Пышма	0,47	0,55	1,03	0,91	0,12	0,96	2,21	43%
13	Архангельская облас	Архангельск	1,82	2,43	4,25	3,80	0,46	3,64	8,96	41%
14	Вологодская область	Череповец	1,84	2,47	4,31	3,86	0,45	3,63	9,03	40%
15	Красноярский край	Красноярск	7,39	9,84	17,23	15,44	1,79	14,32	35,91	40%
16	Республика Коми	Сыктывкар	1,43	1,55	2,98	2,68	0,30	2,38	6,60	36%
17	Московская область	Видное	0,57	0,98	1,55	1,42	0,13	1,04	3,12	33%
18	Иркутская область	Иркутск	3,42	5,31	8,73	7,98	0,76	6,06	18,34	33%
19	Московская область	Королёв	1,21	2,14	3,35	3,09	0,26	2,07	6,81	30%
20	Иркутская область	Братск	1,24	1,84	3,08	2,86	0,22	1,73	6,64	26%
21	Иркутская область	Усолье-Сибирск	0,41	0,61	1,02	0,95	0,07	0,57	2,21	26%
22	Московская область	Балашиха	2,72	4,96	7,68	7,18	0,50	4,03	15,81	25%
23	Московская область	Подольск	1,61	2,94	4,55	4,25	0,30	2,38	9,37	25%
24	Иркутская область	Усть-Илимск	0,44	0,65	1,09	1,01	0,07	0,58	2,35	25%
25	Кемеровская область	Кемерово	3,20	4,21	7,41	6,91	0,50	4,00	16,48	24%

### Финансовый потенциал развития ГПТОП в городах РФ.

Города с переходом из (+) в (-) финансирования. Источник: «Исследование финансового потенциала развития городского пассажирского транспорта», РАТ, 2023-2024 гг.

№ п/п	Регионы	Город	Бюджет на ПТОП млрд.	Билетная выручка млрд. руб.	Ресурсы всего (норматив) млрд. руб.	НМЦК (норматив) млрд. руб.	Свободные ресурсы (превышение над НМЦК) млрд. руб.	Ресурсы на инвест. на 8 лет млрд. руб.	Предельная полная стоимость проекта, сумма млрд. руб.	Отношение ресурсов за срок проекта к стоимости проекта %
	2	2	9	9	10	10	11	12	13	13
26	Вологодская область	Вологда	1,90	1,99	3,89	3,65	0,24	1,89	9,35	20%
27	Приморский край	Владивосток	2,96	5,62	8,59	8,13	0,45	3,60	17,92	20%
28	Амурская область	Благовещенск	1,33	1,80	3,14	2,96	0,17	1,37	7,22	19%
29	Кемеровская область	Осинники	0,22	0,30	0,51	0,49	0,02	0,20	1,19	17%
30	Иркутская область	Ангарск	1,14	1,81	2,95	2,82	0,13	1,00	6,55	15%
31	Кемеровская область	Ленинск-Кузнец	0,49	0,68	1,17	1,12	0,05	0,40	2,71	15%
32	Кемеровская область	Новокузнецк	2,82	3,96	6,78	6,51	0,26	2,12	16,01	13%
33	Хабаровский край	Комсомольск-на	1,21	1,92	3,13	3,02	0,11	0,90	7,08	13%
34	Краснодарский край	Сочи	2,43	3,03	5,46	5,28	0,18	1,42	13,40	11%
35	Калининградская обл	Калининград	2,64	3,32	5,96	5,78	0,18	1,42	14,69	10%
36	Хабаровский край	Хабаровск	2,92	5,47	8,39	8,18	0,21	1,69	18,52	9%
37	Новосибирская облас	Новосибирск	8,47	12,40	20,87	20,40	0,47	3,73	49,06	8%
38	Свердловская област	Нижний Тагил	1,84	2,11	3,94	3,87	0,07	0,58	10,03	6%
39	Свердловская област	Красногурьинск	0,27	0,42	0,69	0,69	0,01	0,04	1,67	3%
40	Забайкальский край	Чита	1,64	2,47	4,12	4,09	0,03	0,26	10,01	3%
41	Республика Карелия	Петрозаводск	1,20	1,66	2,86	2,87	-0,01	-0,11	7,07	-2%
42	Свердловская област	Екатеринбург	7,07	12,66	19,72	19,87	-0,15	-1,22	46,18	-3%
43	Краснодарский край	Новороссийск	1,24	1,94	3,18	3,21	-0,03	-0,25	7,85	-3%
44	Республика Хакасия	Абакан	0,91	1,29	2,20	2,23	-0,03	-0,25	5,56	-4%
45	Оренбургская област	Новотроицк	0,38	0,47	0,84	0,86	-0,02	-0,12	2,25	-6%
46	Нижегородская облас	Нижний Новгород	5,56	9,10	14,66	14,96	-0,30	-2,39	36,40	-7%
47	Краснодарский край	Краснодар	4,94	8,50	13,44	13,93	-0,49	-3,91	33,64	-12%
48	Республика Бурятия	Улан-Удэ	2,12	2,79	4,91	5,13	-0,22	-1,74	13,08	-13%
49	Кемеровская область	Прокопьевск	0,76	1,31	2,07	2,17	-0,10	-0,78	5,25	-15%
50	Пермский край	Пермь	4,29	7,62	11,91	12,53	-0,63	-5,00	30,81	-16%

### Финансовый потенциал развития ГПТОП в городах РФ.

Наиболее дефицитные по финансированию города. Источник: «Исследование финансового потенциала развития городского пассажирского транспорта», РАТ, 2023-2024 гг.

№ п/п	Регионы	Город	Бюджет на ПТОП	Билетная выручка	Ресурсы всего (норматив)	НМЦК (норматив)	Свободные ресурсы (превышение над НМЦК)	Ресурсы на инвест. на 8 лет	Предельная полная стоимость проекта, сумма	Отношение ресурсов за срок проекта к стоимости проекта
			млрд.	млрд. руб.	млрд. руб.	млрд. руб.	млрд. руб.	млрд. руб.	млрд. руб.	млрд. руб.
	2	2	9	9	10	10	11	12	13	13
106	Пензенская область	Пенза	1,63	2,75	4,38	5,45	-1,07	-8,58	14,77	-58%
107	Волгоградская область	Волгоград	3,44	5,81	9,25	11,54	-2,29	-18,28	30,77	-59%
108	Ульяновская область	Ульяновск	1,99	3,48	5,46	6,86	-1,39	-11,15	18,40	-61%
109	Чувашская Республика	Чебоксары	1,63	2,85	4,49	5,62	-1,14	-9,10	14,89	-61%
110	Республика Башкортостан	Салават	0,45	0,94	1,39	1,73	-0,34	-2,74	4,42	-62%
111	Саратовская область	Саратов	2,58	5,47	8,06	10,15	-2,09	-16,72	26,76	-62%
112	Республика Крым	Алушта	0,10	0,17	0,26	0,34	-0,07	-0,57	0,91	-63%
113	Республика Крым	Ялта	0,23	0,40	0,63	0,80	-0,17	-1,38	2,19	-63%
114	Самарская область	Тольятти	2,15	3,88	6,03	7,64	-1,62	-12,94	20,24	-64%
115	Ивановская область	Иваново	1,22	1,81	3,03	3,90	-0,87	-6,94	10,82	-64%
116	Республика Адыгея	Майкоп	0,46	0,68	1,14	1,48	-0,35	-2,76	4,19	-66%
117	Чувашская Республика	Новочебоксарск	0,36	0,69	1,05	1,35	-0,30	-2,43	3,60	-67%
118	Алтайский край	Бийск	0,58	0,93	1,51	1,98	-0,47	-3,77	5,45	-69%
119	Алтайский край	Рубцовск	0,40	0,64	1,04	1,36	-0,33	-2,60	3,74	-70%
120	Волгоградская область	Волжский	0,92	1,79	2,71	3,55	-0,83	-6,68	9,50	-70%
121	Краснодарский край	Армавир	0,49	1,18	1,67	2,15	-0,49	-3,89	5,53	-70%
122	Карачаево-Черкесская Республика	Черкесск	0,34	0,56	0,90	1,20	-0,30	-2,44	3,38	-72%
123	Республика Мордовия	Саранск	0,96	1,57	2,52	3,38	-0,85	-6,81	9,37	-73%
124	Ставропольский край	Ставрополь	1,55	3,16	4,71	6,21	-1,50	-12,03	16,50	-73%
125	Тамбовская область	Тамбов	0,73	1,30	2,03	2,78	-0,75	-6,00	7,76	-77%
126	Саратовская область	Балаково	0,46	1,04	1,49	2,05	-0,56	-4,46	5,48	-81%
127	Республика Башкортостан	Стерлитамак	0,62	1,78	2,40	3,28	-0,88	-7,01	8,38	-84%
128	Кабардино-Балкарская Республика	Нальчик	0,69	1,10	1,79	2,58	-0,79	-6,34	7,38	-86%
129	Саратовская область	Энгельс	0,49	1,27	1,75	2,51	-0,75	-6,02	6,70	-90%
130	Республика Северная Осетия-Алания	Владикавказ	0,70	1,31	2,01	3,08	-1,07	-8,54	8,79	-97%
131	Республика Дагестан	Махачкала	1,24	2,73	3,98	6,48	-2,51	-20,06	18,68	-107%

**Листинг программного обеспечения, автоматизирующего расчёты в РР-системе, основанной функционально-сетевом принципе представления показателей**

```

namespace ResourceDistributionSystem
{
    public static class SystemConfiguration
    {
        public static int TotalRegions { get; set; }
        public static int CriteriaPerRegion { get; private set; } = 3;
        public static int FirstRegionMatrices { get; set; }
        public static int SecondRegionMatrices { get; set; }
        public static int ThirdRegionMatrices { get; set; }
        public static bool IsFirstRegionNormalized { get; set; }
        public static bool IsSecondRegionNormalized { get; set; }
        public static bool IsThirdRegionNormalized { get; set; }
        public static bool IsThirdRegionProcessed { get; set; }
        public static bool MatrixCountVerified { get; set; }
    }
}

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.IO;
using System.Linq;
using System.Windows.Forms;

namespace ResourceDistributionSystem
{
    public partial class HierarchyLevelForm : Form
    {
        private ComputationEngine calculationEngine = new
ComputationEngine();
        private DataGridView[] gridViewCollection = new DataGridView[12];

        public HierarchyLevelForm()
        {
            InitializeComponent();
            ConfigureFormLayout();
            InitializeSystemParameters();
        }

        private void ConfigureFormLayout()
        {
            this.Width = 645;
            this.BackButton.Location = new Point(22, 530);
            this.ComputeButton.Location = new Point(336, 530);
        }

        private void InitializeSystemParameters()
        {
            SystemConfiguration.FirstRegionMatrices = 3;
            SystemConfiguration.SecondRegionMatrices = 3;
            SystemConfiguration.ThirdRegionMatrices = 3;
            SystemConfiguration.IsFirstRegionNormalized = false;
            SystemConfiguration.IsSecondRegionNormalized = false;
            SystemConfiguration.IsThirdRegionNormalized = false;
        }
    }
}

```

```

public DataGridView this[int index]
{
    get => gridViewCollection[index];
    set => gridViewCollection[index] = value;
}

private void NavigateBack_Click(object sender, EventArgs e)
{
    RegionSelectionForm regionForm = new RegionSelectionForm();
    regionForm.Show();
    CloseCurrentForms();
}

private void CloseCurrentForms()
{
    this.Hide();
    for (int i = Application.OpenForms.Count - 1; i >= 0; i--)
        if (Application.OpenForms[i].Name != "RegionSelectionForm")
            Application.OpenForms[i].Hide();
}

private void HierarchyLevelForm_FormClosing(object sender,
FormClosingEventArgs e)
{
    if (e.CloseReason == CloseReason.UserClosing)
    {
        e.Cancel = true;
        if (ConfirmExit())
            Application.Exit();
    }
}

private bool ConfirmExit()
{
    return MessageBox.Show("Завершить работу программы?",
"Подтверждение выхода",
    MessageBoxButtons.YesNo, MessageBoxIcon.Question) ==
    DialogResult.Yes;
}

private void ComputeButton_Click(object sender, EventArgs e)
{
    int regionCount = SystemConfiguration.TotalRegions;
    int matrixCount = SystemConfiguration.FirstRegionMatrices;

    calculationEngine.ConfigureParameters(3, 3);
    InitializeGridCollection();

    if (!ValidateInputData())
        return;

    ResultForm resultForm = new ResultForm();
    ConfigureResultForm(resultForm, regionCount);

    ClearOutputFile();
    ProcessRegionalCalculations(resultForm, regionCount,
matrixCount);
}

private void InitializeGridCollection()
{
    gridViewCollection[0] = Grid11;
}

```

```

        gridViewCollection[1] = Grid12;
        gridViewCollection[2] = Grid13;
        gridViewCollection[3] = Grid14;
        gridViewCollection[4] = Grid21;
        gridViewCollection[5] = Grid22;
        gridViewCollection[6] = Grid23;
        gridViewCollection[7] = Grid24;
        gridViewCollection[8] = Grid31;
        gridViewCollection[9] = Grid32;
        gridViewCollection[10] = Grid33;
        gridViewCollection[11] = Grid34;
    }

    private bool ValidateInputData()
    {
        if (SystemConfiguration.FirstRegionMatrices == 3)
            return ValidateGrids(Grid11, Grid12, Grid13);

        if (SystemConfiguration.FirstRegionMatrices == 4)
            return ValidateGrids(Grid11, Grid12, Grid13, Grid14);

        return true;
    }

    private bool ValidateGrids(params DataGridView[] grids)
    {
        foreach (var grid in grids)
            if (!VerifyGridData(grid))
                return false;
        return true;
    }

    private void ConfigureResultForm(ResultForm form, int regionCount)
    {
        if (regionCount == 1)
            form.Text = "Итоговые результаты";
    }

    private void ClearOutputFile()
    {
        using (StreamWriter writer = new
StreamWriter("Coefficients.txt"))
        {
            writer.WriteLine("");
        }
    }

    private void ProcessRegionalCalculations(ResultForm resultForm, int
regionCount, int matrixCount)
    {
        switch (regionCount)
        {
            case 1:
                ProcessSingleRegion(resultForm, matrixCount);
                break;
            case 2:
                ProcessDoubleRegion(resultForm);
                goto case 1;
            case 3:
                ProcessTripleRegion(resultForm);
                goto case 2;
        }
    }
}

```

```

        private void ProcessSingleRegion(ResultForm resultForm, int
matrixCount)
        {
            resultForm.Show();
            PrepareResultTable(resultForm.FirstRegionGrid);

            int matrixLimit = matrixCount == 3 ? 3 : 4;

            if (!SystemConfiguration.IsFirstRegionNormalized)
                NormalizeMatrices(0, matrixLimit);

            CalculateRegionCoefficients(resultForm.FirstRegionGrid, 0,
matrixLimit, 1);

            if (matrixCount == 3)
                resultForm.FirstRegionGrid.Columns.RemoveAt(3);

            SystemConfiguration.IsFirstRegionNormalized = true;
            UpdateGridHeaders(resultForm.FirstRegionGrid);
        }

        private void ProcessDoubleRegion(ResultForm resultForm)
        {
            if (!ValidateSecondRegionData())
                return;

            resultForm.Width = SystemConfiguration.IsThirdRegionProcessed ?
resultForm.Width : 644;
            PrepareResultTable(resultForm.SecondRegionGrid);
            resultForm.SecondRegionGrid.Visible = true;

            int matrixLimit = SystemConfiguration.SecondRegionMatrices == 3 ?
7 : 8;

            if (!SystemConfiguration.IsSecondRegionNormalized)
                NormalizeMatrices(4, matrixLimit);

            CalculateRegionCoefficients(resultForm.SecondRegionGrid, 4,
matrixLimit, 2);

            if (SystemConfiguration.SecondRegionMatrices == 3)
                resultForm.SecondRegionGrid.Columns.RemoveAt(3);

            SystemConfiguration.IsSecondRegionNormalized = true;
            UpdateGridHeaders(resultForm.SecondRegionGrid);
        }

        private void ProcessTripleRegion(ResultForm resultForm)
        {
            if (!ValidateThirdRegionData())
                return;

            resultForm.Width = 950;
            PrepareResultTable(resultForm.ThirdRegionGrid);
            resultForm.ThirdRegionGrid.Visible = true;

            int matrixLimit = SystemConfiguration.ThirdRegionMatrices == 3 ?
11 : 12;

            if (!SystemConfiguration.IsThirdRegionNormalized)
                NormalizeMatrices(8, matrixLimit);

```

```

        CalculateRegionCoefficients(resultForm.ThirdRegionGrid, 8,
matrixLimit, 3);

        if (SystemConfiguration.ThirdRegionMatrices == 3)
            resultForm.ThirdRegionGrid.Columns.RemoveAt(3);

        SystemConfiguration.IsThirdRegionNormalized = true;
        SystemConfiguration.IsThirdRegionProcessed = true;
        UpdateGridHeaders(resultForm.ThirdRegionGrid);
    }

    private bool ValidateSecondRegionData()
    {
        int matrixCount = SystemConfiguration.SecondRegionMatrices;
        return matrixCount == 3
            ? ValidateGrids(Grid21, Grid22, Grid23)
            : ValidateGrids(Grid21, Grid22, Grid23, Grid24);
    }

    private bool ValidateThirdRegionData()
    {
        int matrixCount = SystemConfiguration.ThirdRegionMatrices;
        return matrixCount == 3
            ? ValidateGrids(Grid31, Grid32, Grid33, Grid21, Grid22,
Grid23)
            : ValidateGrids(Grid31, Grid32, Grid33, Grid34, Grid21,
Grid22, Grid23, Grid24);
    }

    private void NormalizeMatrices(int startIndex, int endIndex)
    {
        for (int i = startIndex; i < endIndex; i++)
            PerformNormalization(gridViewCollection[i]);
    }

    private void CalculateRegionCoefficients(DataGridView targetGrid, int
startIndex,
        int endIndex, int regionNumber)
    {
        for (int i = startIndex; i < endIndex; i++)
        {
            WriteMatrixHeader(regionNumber, i - startIndex + 1);
            ExecuteCalculationWithLogging(gridViewCollection[i]);

            double[] rowSums = calculationEngine.ComputeRowSums(
                calculationEngine.GetDecisionMatrix());

            for (int j = 0; j <
calculationEngine.GetDecisionMatrix().GetLength(0); j++)
                targetGrid[i - startIndex, j].Value =
rowSums[j].ToString("F3");
        }
    }

    private void WriteMatrixHeader(int region, int matrix)
    {
        using (StreamWriter writer = new StreamWriter("Coefficients.txt",
true))
        {
            writer.WriteLine(new string('-', 60));
            writer.WriteLine($"Регион {region} Матрица {matrix}:");
        }
    }

```

```

private void ExecuteCalculationWithLogging(DataGridView grid)
{
    LoadGridData(grid);
    calculationEngine.ExecuteWithLogging();
}

private void LoadGridData(DataGridView grid)
{
    double[,] dataMatrix = new double[3, 3];
    for (int i = 0; i < grid.RowCount - 1; i++)
        for (int j = 0; j < grid.ColumnCount; j++)
            dataMatrix[i, j] = double.Parse(grid[j,
i].Value.ToString());

    calculationEngine.SetInputData(dataMatrix);
}

private void PrepareResultTable(DataGridView grid)
{
    grid.Rows.Clear();
    grid.RowCount = 7;
    grid.ColumnCount = 4;

    for (int i = 0; i < grid.ColumnCount; i++)
        grid.Columns[i].HeaderCell.Value = $"K{i + 1}";

    for (int i = 0; i < grid.ColumnCount; i++)
        grid[i, grid.RowCount - 1].Value = "min";

    grid.RowHeadersWidth = 80;
    grid.AutoSizeColumnsMode =
DataGridViewAutoSizeColumnsMode.ColumnHeader;
}

public bool VerifyGridData(DataGridView grid)
{
    if (!ValidateMinMaxRow(grid))
        return false;

    try
    {
        ValidateNumericData(grid);
        return true;
    }
    catch (FormatException)
    {
        ShowError("Допустимы только числовые значения с разделителем-
запятой");
        return false;
    }
    catch (NullReferenceException)
    {
        ShowError("Обнаружены пустые ячейки");
        return false;
    }
    catch (ArgumentNullException)
    {
        ShowError("Обнаружены пустые ячейки");
        return false;
    }
}

```

```

private bool ValidateMinMaxRow(DataGridView grid)
{
    for (int i = 0; i < grid.ColumnCount; i++)
    {
        string value = grid[i, grid.RowCount - 1].Value.ToString();
        if (value != "max" && value != "min")
        {
            ShowError("Последняя строка должна содержать только 'min'
или 'max'");
            return false;
        }
    }
    return true;
}

private void ValidateNumericData(DataGridView grid)
{
    for (int i = 0; i < grid.ColumnCount; i++)
        for (int j = 0; j < grid.RowCount - 1; j++)
            double.Parse(grid[i, j].Value.ToString());
}

private void ShowError(string message)
{
    MessageBox.Show(message, "Ошибка валидации",
        MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
}

private void PerformNormalization(DataGridView grid)
{
    ValidateNumericData(grid);

    for (int columnIndex = 0; columnIndex < grid.ColumnCount;
columnIndex++)
    {
        double extremeValue = FindExtremeValue(grid, columnIndex);
        double totalSum = NormalizeColumn(grid, columnIndex,
extremeValue);

        if (totalSum > 0)
            FinalizeNormalization(grid, columnIndex, totalSum);
    }
}

private double FindExtremeValue(DataGridView grid, int columnIndex)
{
    string optimization = grid[columnIndex, grid.RowCount -
1].Value.ToString();
    double extremeValue = optimization == "max" ? 0 : int.MaxValue;

    for (int rowIndex = 0; rowIndex < grid.RowCount - 1; rowIndex++)
    {
        double currentValue = double.Parse(grid[columnIndex,
rowIndex].Value.ToString());

        if (optimization == "max" && currentValue > extremeValue)
            extremeValue = currentValue;
        else if (optimization == "min" && currentValue <
extremeValue)
            extremeValue = currentValue;
    }

    return extremeValue;
}

```

```

    }

    private double NormalizeColumn(DataGridView grid, int columnIndex,
double extremeValue)
    {
        string optimization = grid[columnIndex, grid.RowCount -
1].Value.ToString();
        double sum = 0;

        if (optimization == "max")
            sum = NormalizeMaximization(grid, columnIndex, extremeValue);
        else
            sum = NormalizeMinimization(grid, columnIndex, extremeValue);

        return sum;
    }

    private double NormalizeMaximization(DataGridView grid, int
columnIndex, double maxValue)
    {
        double sum = 0;

        if (maxValue > 0)
        {
            for (int rowIndex = 0; rowIndex < grid.RowCount - 1;
rowIndex++)
            {
                double normalizedValue = double.Parse(grid[columnIndex,
rowIndex].Value.ToString()) / maxValue;
                grid[columnIndex, rowIndex].Value =
normalizedValue.ToString("F3");
                sum += normalizedValue;
            }
        }
        else
        {
            for (int rowIndex = 0; rowIndex < grid.RowCount - 1;
rowIndex++)
                grid[columnIndex, rowIndex].Value =
maxValue.ToString("F3");
        }

        return sum;
    }

    private double NormalizeMinimization(DataGridView grid, int
columnIndex, double minValue)
    {
        double sum = 0;

        if (minValue > 0)
        {
            for (int rowIndex = 0; rowIndex < grid.RowCount - 1;
rowIndex++)
            {
                double normalizedValue = minValue /
double.Parse(grid[columnIndex, rowIndex].Value.ToString());
                grid[columnIndex, rowIndex].Value =
normalizedValue.ToString("F3");
                sum += normalizedValue;
            }
        }
        else
    }

```

```

        {
            sum = HandleZeroMinimum(grid, columnIndex);
        }

        return sum;
    }

    private double HandleZeroMinimum(DataGridView grid, int columnIndex)
    {
        double sum = 0;
        double adjustedMin = 0.1;

        for (int rowIndex = 0; rowIndex < grid.RowCount - 1; rowIndex++)
        {
            if (double.Parse(grid[columnIndex,
rowIndex].Value.ToString()) == 0)
                grid[columnIndex, rowIndex].Value =
adjustedMin.ToString();
        }

        for (int rowIndex = 0; rowIndex < grid.RowCount - 1; rowIndex++)
        {
            double normalizedValue = adjustedMin /
double.Parse(grid[columnIndex, rowIndex].Value.ToString());
            grid[columnIndex, rowIndex].Value =
normalizedValue.ToString("F3");
            sum += normalizedValue;
        }

        return sum;
    }

    private void FinalizeNormalization(DataGridView grid, int
columnIndex, double sum)
    {
        for (int rowIndex = 0; rowIndex < grid.RowCount - 1; rowIndex++)
        {
            double finalValue = double.Parse(grid[columnIndex,
rowIndex].Value.ToString()) / sum;
            grid[columnIndex, rowIndex].Value =
finalValue.ToString("F3");
        }
    }

    private void UpdateGridHeaders(DataGridView grid)
    {
        int[,] probabilityMatrix =
calculationEngine.GetProbabilityDistribution();
        int criteriaCount = 3;

        for (int i = 0; i < grid.RowCount - 1; i++)
        {
            string headerText = BuildHeaderText(probabilityMatrix, i,
criteriaCount);
            grid.Rows[i].HeaderCell.Value = headerText;
        }

        grid.AutoSizeRowHeadersWidth(0,
DataGridViewRowHeadersWidthSizeMode.AutoSizeToAllHeaders);
    }

    private string BuildHeaderText(int[,] probabilityMatrix, int
rowIndex, int criteriaCount)

```

```

{
    string text = "";
    for (int j = 0; j < criteriaCount; j++)
        text += $"P{probabilityMatrix[rowIndex, j]}>";

    return text.TrimEnd('>');
}

private void HierarchyLevelForm_Load(object sender, EventArgs e)
{
    int regionCount = SystemConfiguration.TotalRegions;
    InitializeAllGrids();
    ConfigureVisibilityByRegionCount(regionCount);
}

private void InitializeAllGrids()
{
    foreach (GroupBox groupBox in this.Controls.OfType<GroupBox>())
    {
        foreach (DataGridView grid in
groupBox.Controls.OfType<DataGridView>())
        {
            SetupGrid(grid);
        }
    }
}

private void SetupGrid(DataGridView grid)
{
    grid.Rows.Clear();
    grid.RowCount = 4;
    grid.ColumnCount = 3;
    grid.Visible = false;

    ConfigureGridHeaders(grid);
    ConfigureGridDefaults(grid);
}

private void ConfigureGridHeaders(DataGridView grid)
{
    for (int i = 0; i < grid.RowCount - 1; i++)
        grid.Rows[i].HeaderCell.Value = $"{i + 1}";

    for (int i = 0; i < grid.ColumnCount; i++)
        grid.Columns[i].HeaderCell.Value = $"K{i + 1}";
}

private void ConfigureGridDefaults(DataGridView grid)
{
    for (int i = 0; i < grid.ColumnCount; i++)
        grid[i, grid.RowCount - 1].Value = "min";

    grid.AutoSizeColumnsMode =
DataGridViewAutoSizeColumnsMode.ColumnHeader;
    grid.RowHeadersWidth = 45;
}

private void ConfigureVisibilityByRegionCount(int regionCount)
{
    switch (regionCount)
    {
        case 1:
            ConfigureSingleRegionView();
    }
}

```

```

        break;
    case 2:
        ConfigureDoubleRegionView();
        break;
    case 3:
        ConfigureTripleRegionView();
        break;
    }
}

private void ConfigureSingleRegionView()
{
    groupBox1.Visible = true;
    ShowGroupGrids(groupBox1);

    this.Width = 645;
    this.Height = 330;
    this.BackButton.Location = new Point(22, 250);
    this.ComputeButton.Location = new Point(337, 250);

    Grid14.Visible = false;
}

private void ConfigureDoubleRegionView()
{
    this.Width = 645;
    this.Height = 505;

    groupBox1.Visible = true;
    groupBox2.Visible = true;

    ShowGroupGrids(groupBox1);
    ShowGroupGrids(groupBox2);

    Grid14.Visible = false;
    Grid24.Visible = false;
}

private void ConfigureTripleRegionView()
{
    BackButton.Location = new Point(22, 605);
    ComputeButton.Location = new Point(336, 605);

    groupBox1.Visible = true;
    groupBox2.Visible = true;
    groupBox3.Visible = true;

    ShowGroupGrids(groupBox1);
    ShowGroupGrids(groupBox2);
    ShowGroupGrids(groupBox3);

    Grid14.Visible = false;
    Grid24.Visible = false;
    Grid34.Visible = false;
}

private void ShowGroupGrids(GroupBox groupBox)
{
    foreach (DataGridView grid in
        groupBox.Controls.OfType<DataGridView>())
        grid.Visible = true;
}

```

```
private void AddMatrixButton_Click(object sender, EventArgs e)
{
    ExpandMatrixView();
    SystemConfiguration.FirstRegionMatrices = 4;
    SystemConfiguration.SecondRegionMatrices = 4;
    SystemConfiguration.ThirdRegionMatrices = 4;
    SystemConfiguration.MatrixCountVerified = true;

    Grid14.Visible = true;
    Grid24.Visible = true;
    Grid34.Visible = true;
}

private void RemoveMatrixButton_Click(object sender, EventArgs e)
{
    CollapseMatrixView();
    SystemConfiguration.FirstRegionMatrices = 3;
    SystemConfiguration.SecondRegionMatrices = 3;
    SystemConfiguration.ThirdRegionMatrices = 3;
    SystemConfiguration.MatrixCountVerified = false;

    Grid14.Visible = false;
    Grid24.Visible = false;
    Grid34.Visible = false;
}

private void ExpandMatrixView()
{
    Width = 870;
    AddMatrix3.Visible = false;
    AddMatrix1.Visible = false;
    DeleteMatrix1.Visible = true;
    AddMatrix2.Visible = false;
}

private void CollapseMatrixView()
{
    if (SystemConfiguration.SecondRegionMatrices == 3 &&
        SystemConfiguration.ThirdRegionMatrices == 3)
        this.Width = 645;

    AddMatrix1.Visible = true;
    DeleteMatrix1.Visible = false;
}
}
```

## Документы, подтверждающие практическую значимость исследования



По требованию

**АКТ о внедрении  
результатов диссертационного исследования**

Результаты диссертационного исследования Халтурина Романа Александровича на тему «Методология распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах на основе теории принятия решений в условиях неопределенности», представленного на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.9.9. Логистические транспортные системы, использовались в работе ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта» (ОАО «НИИАТ») для совершенствования технологий и систем организации перевозок на пассажирском транспорте.

Разработанное программное обеспечение позволяет выполнять расчёты в комплексе математических моделей и алгоритмов поиска оптимальных решений в логистических транспортных системах распределения ресурсов в условиях неопределенности.

Разработана методология синтеза оптимальной структуры распределения ресурсов при управлении логистическими системами городского пассажирского транспорта как последовательность представления, математического описания и анализа многоуровневой сложной системы на основе теории принятия решений в условиях неопределенности, исключающая необходимость экспертного оценивания значимости оценочного функционала. Данная методология позволяет организациям объективно распределять ресурсы на транспорте.

В.В. Машков



ООО «Группа Компаний «Альтекс»  
423800, Россия, РТ, г.Набережные Челны  
Индустриальный проезд, 15  
Тел.(8552) 55-10-50, 92-18-01 факс 55-10-50  
E-mail: [info@altecs.ru](mailto:info@altecs.ru) www.altecs.ru  
ОКПО90003812 ОГРН111168200044  
ИНН1639044483 КПП165001001

**АКТ о внедрении  
результатов диссертационного исследования**

Результаты диссертационного исследования Халтурина Романа Александровича на тему «Методология распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах на основе теории принятия решений в условиях неопределенности», представленного на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.9.9. Логистические транспортные системы, использовались в работе ООО ГК «Альтекс» для совершенствования системы распределения ресурсов при организации перевозок.

В исследовании была разработана концепция, структурно систематизирующая систему распределения ресурсов на транспорте, как совокупность возможных моделей представления структуры распределения ресурсов в сложных многоуровневых структурах. Данная концепция может быть апробирована на практике транспортными организациями для объективного распределения ресурсов.

Исполнительный директор



Л.И.Уразбахтин

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
«ПРЯМЫЕ ДОРОГИ»**

450009, Республика Башкортостан, г. Уфа,  
пр. Октября 14

тел. 8 (8552) 44-34-22, факс 44-34-94

E-mail: [gruz-tnp@yandex.ru](mailto:gruz-tnp@yandex.ru)

ОКПО 70870056, ОГРН 1131650014110  
ИНН 1650268840, КПП 027801001

По требованию

**АКТ о внедрении  
результатов диссертационного исследования**

Результаты диссертационного исследования Халтурина Романа Александровича на тему «Методология распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах на основе теории принятия решений в условиях неопределенности», представленного на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.9.9. Логистические транспортные системы, использовались в работе ООО «ПРЯМЫЕ ДОРОГИ» для совершенствования системы организации перевозок.

Модель структуры системы распределения ресурсов, основанная на организационно-технологическом принципе представления показателей на различных уровнях, позволяет сделать количественную оценку эффективности функционирования отдельного субъекта управления на отдельном виде транспорта. Данная модель может быть использована организациями для объективного распределения ресурсов на транспорте.

Директор



Р.Р. Тазеев

УТВЕРЖДАЮ

Проректор федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения выс-  
шего образования «Государственный  
университет управления», к.э.н., доцент



*[Handwritten signature]*

Д.Ю.Брюханов

« 08 »

*[Handwritten signature]*

2026 г.

**СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ  
результатов диссертационного исследования  
в учебный процесс**

Основные положения и методические разработки диссертационного исследования Халтурина Романа Александровича на тему «Методология распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах на основе теории принятия решений в условиях неопределенности», представленного на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.9.9. - Логистические транспортные системы, внедрены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет управления».

Результаты диссертационной работы были использованы при преподавании дисциплин «Управление транспортными потоками и системами» (направление подготовки 38.04.02 «Менеджмент», образовательная программа «Транспорт и логистика»), «Управление бизнес-процессами в автомобильном бизнесе» (направление подготовки 38.04.02 «Менеджмент», образовательная программа «Управление производством в автомобилестроении»).

Д.э.н., профессор кафедры  
логистики и транспортно-технологических систем

*[Handwritten signature]*

А.А. Степанов

зам.

*[Handwritten signature]*  
Исполнитель

УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник отдела кадров Департамента кадровых  
и административных отношений

*[Handwritten signature]*





**СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ  
результатов диссертационного исследования  
в учебный процесс**

Основные положения и методические разработки диссертационного исследования Халтурина Романа Александровича на тему: «Методология распределения ресурсов в пассажирских транспортных системах на основе теории принятия решений в условиях неопределенности», представленного на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.9.9. «Логистические транспортные системы», внедрены в учебный процесс федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта».

Результаты диссертационной работы были использованы в процессе разработки рабочих программ учебных дисциплин по образовательной программе подготовки бакалавров по специальности 23.05.04. «Эксплуатация железных дорог» и направлению 23.03.01 «Технология транспортных процессов», а также при преподавании дисциплин в учебном процессе при чтении курса лекций, проведении практических и лабораторных занятий, а также в курсовом проектировании по следующим дисциплинам образовательных программ: логистика, теория принятия решений в условиях неопределенности, математическое моделирование на транспорте, взаимодействие видов транспорта, транспортный бизнес.

Заведующий кафедрой  
«Управление транспортным бизнесом  
и интеллектуальные системы»



С.П. Вакуленко