

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Андреев Андрей Юрьевич

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ В
ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ ОПЕРАТИВНОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК**

Специальность: **05.22.10** – Эксплуатация автомобильного транспорта

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Терентьев Алексей Вячеславович

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Анализ современных технико-экономических условий и методологической базы маршрутизации грузовых автомобильных перевозок	14
1.1 Состояние и тенденции развития грузовых автомобильных перевозок, определяющих актуальность разработок новых инструментов маршрутизации. 14	
1.2 Анализ научных исследований, посвященных разработке моделей оптимизации маршрутов транспортных средств	28
1.3 Анализ зарубежного опыта маршрутизации перевозок в динамически неустойчивых условиях внешней среды.....	37
1.3.1 Маршрутизатор информации, как основа для разработки протоколов маршрутизации в транспортной сети.....	37
1.3.2 Применение методов информационной маршрутизации в транспортной логистике.....	46
Выводы по первой главе.....	49
2 Разработка научных подходов к определению маршрутов перевозки грузов в гетерогенных динамических автотранспортных системах.....	52
2.1 Методология поиска оптимальных решений в гетерогенных динамических автотранспортных системах.....	52
2.2 Концепция решения многокритериальных задач, удовлетворяющих динамическим условиям работы транспортно-логистических систем	57
2.3 Математическое моделирование процедур принятия решений в социально-технических системах с учётом нечёткости исходной информации и теории принятия решений.....	64

2.4 Методы динамического программирования в применении к дискретно-событийному характеру процессов в сложных транспортно-логистических системах.....	70
Выводы по второй главе	76
3 Разработка алгоритмов и методики определения оптимальных маршрутов при оперативно-производственном планировании перевозок в динамически изменяющихся условиях.....	78
3.1 Разработка алгоритмов формирования оптимальных маршрутов в транспортно-логистических системах	78
3.1.1 Алгоритмизация задачи динамического программирования	78
3.1.2 Алгоритмизация поиска Парето-эффективных решений для дискретных событий в сложной транспортной системе	80
3.2 Аналитическая модель, положенная в основу методики определения оптимальных маршрутов при оперативно-производственном планировании перевозок в динамически изменяющихся условиях.....	86
3.3 Порядок работы протокола маршрутизации на базе разработанной методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях внешней среды перевозок.....	92
Выводы по третьей главе.....	99
4 Апробация методики и программного обеспечения обеспечивающих интеллектуализацию системы оперативного планирования маршрутов ...	101
4.1 Цифровая объектно-ориентированная модель развозочного маршрута при оперативном планировании грузовых перевозках.....	101
4.2 Эффективность применения разработанного маршрутизатора в динамически изменяющихся экономических условиях	111
Выводы по четвёртой главе.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	125

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЯ	139
<i>Приложение А.</i> Листинг программного обеспечения определения оптимальной траектории движения транспортного средства.....	140
<i>Приложение Б.</i> Документы, подтверждающие практическую значимость исследования (акты о внедрении).....	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Решение проблемы эффективной организации процесса грузовых автомобильных перевозок (ГАП) является одной из приоритетных задач, утвержденных в Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [1]. Несмотря на высокий удельный вес автомобильного транспорта (АТ) в транспортной системе РФ, уровень применяемых технологических процессов и методов организации ГАП значительно уступает другим видам транспорта. В большей степени проявляется отставание в уровне применяемых технологических процессов по сравнению с развитыми странами Европы и в США, что негативно сказывается как на объемных, так и на экономических показателях эффективности ГАП. Для сравнения: среднесуточное расстояние перевозки грузов в одном автотранспортном средстве (АТС) в РФ составляет 350...380 км, а, например, в США этот показатель составляет – 1300...1500 км. При этом затраты на перевозки грузов автомобильным транспортом в РФ 1,8...2,5 раза выше, чем в технологически развитых странах. Учитывая, что на АТ занято около 6% работающего населения страны, а основные производственные фонды в транспортной отрасли определяются в размере не менее 11% от всех основных фондов страны, то суммарные издержки на осуществление перевозок грузов, оцениваются в 700 млрд. руб. в год, а это более 10% от ВВП. Задача повышения эффективности ГАП особую актуальность приобретает в современных экономических условиях, определяемых как динамически нестабильные и с высокой долей неопределенности в информационных ситуациях прогнозирования развития отрасли. Ключевым элементом в организации транспортного процесса в ГАП является маршрутизация движения подвижного состава (ПС) как совокупность процедур по выбору оптимальных характеристик пути следования, определяющих эффективность организации маршрутов при оперативном планировании ГАП.

Задача маршрутизации становится особенно актуальной при многовариантности и многоаспектности распределения грузовых потоков в динамически изменяющихся условиях внешней среды. В этом случае задача оптимальной маршрутизации может быть решена только на основе разработки специализированного математического аппарата – аналитического инструмента принятия эффективных решений и программного обеспечения на его основе. Поэтому можно утверждать, что востребованная практикой задача оптимизации процессов маршрутизации в динамически изменяющемся состоянии внешней среды представляет собой задачу, требующую решения не на инженерном уровне, а приложения новых научных знаний. Настоящим диссертационным исследованием должна быть обеспечена разработка методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок, позволяющей системно с учётом многокритериальной и в условиях динамически изменяющихся факторов внешней средой эксплуатации управлять коммерческой эксплуатацией подвижного состава грузовых автотранспортных предприятий (ГАТП).

Степень разработанности проблемы. Еще в советское время транспортные предприятия пользовались достаточно эффективными методиками формирования маршрутов: сборных, маятниковых, развозочных т. д. В последующие годы также проводились многочисленные исследования по организации и планированию перевозок автомобильным транспортом в изменившихся условиях его работы. Вопросы оптимизации процессов управления грузовыми автомобильными перевозками (ГАП) на основе математических методов решения транспортных задач подробно изучался и рассматривался широким кругом ученых и специалистов. Большой научный вклад по исследуемой проблеме внесли: Л. Л. Афанасьев, И. И. Батищев, Л. А. Бронштейн, А.В. Вельможин, Е.Е. Витвицкий, А. Э. Горев, В. А. Гудков, В. С. Лукинский, С. В. Милославская, Л.Б. Миротин, П.Ю. Привалов и др.

Работы перечисленных авторов формировали основу поиска решения поставленных задач исследования при анализе и оценке эффективности

организации ГАП. Тем не менее в современных условиях динамически не стабильных взаимоотношений участников перевозочного процесса применение вышеупомянутых исследований практически не реализуется.

В настоящее время процессы оперативно-производственного планирования грузовых автомобильных перевозок происходят в условиях, когда результативные показатели ГАП могут изменяться в процессе совершения одной ездки автомобиля из-за изменений в информационной среде взаимоотношений «потребитель-перевозчик». В данных условиях возникает необходимость повышения эффективности маршрутизации, заключающейся в возможности изменения схемы маршрута в «он-лайн» режиме с применением управляющих алгоритмов, преобразованных в цифровые форматы. Теоретическая часть исследования при решении задачи динамической многокритериальной оптимизации базировалась на научных трудах отечественных и зарубежных ученых: С. Н. Васильева, Л. Гурвича, М. Зелены, В. Д. Ногина, В.В. Подиновского, Б.Д. Прудовского, Т. Саати, А. В. Терентьева и др.

Решение проблемы при разработке новых методов маршрутизации состоит в том, что понятие объект управления должно переноситься транспортного потока на отдельное транспортное средство или отдельную партию груза. Сегодня данная трансформация объектов в сложных транспортных системах осуществима, но содержит большое количество видов и типов связей, поэтому требует разработки специальных объектно-ориентированных моделей управления, которые формируют оптимальные траектории перемещения автомобилей в транспортной сети. При этом модель управления должна формировать не только описание объектов и критериев, но и методы их взаимодействия и преобразования атрибутов, позволяющих строить производные структуры на основе базовых для более сложных состояний системы, что делает процесс управления более гибким и универсальным.

Целью диссертационной работы является разработка методики определения оптимальных кольцевых развозочных (сборных) маршрутов при оперативно-производственном планировании перевозок грузов в динамически изменяющихся

условиях работы подвижного состава с учётом нескольких критериев эффективности.

Для достижения цели исследования решаются **следующие задачи**:

1. Разработать концепцию системы определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования ГАП, позволяющую системно с учётом многокритериальной среды эксплуатации управлять эксплуатацией подвижного состава грузовых АТП:
2. Разработать аналитическую платформу гетерогенной динамической транспортной системы (ГДТС) на основе задачи динамического программирования и методов многокритериальной оптимизации, позволяющую выполнять обработку больших объемов данных ГДТС по неограниченному количеству критериев или признаков эффективности.
3. Разработать аналитическую модель, алгоритм и ПО для определения оптимальных маршрутов при оперативно-производственном планировании перевозок на основе интеграции в задачу динамического программирования результатов решения задачи многокритериальной оптимизации при выборе управляющего действия для каждого дискретного состояния ГДТС.
4. Разработать методику определения оптимальных кольцевых развозочных (сборных) маршрутов при оперативно-производственном планировании ГАП, состоящую из двух основных элементов: теоретического обеспечения (маршрутизатора) и реализующего его программного обеспечения (протокола маршрутизации).
5. Разработать интегральный показатель экономической эффективности применения протокола маршрутизации в сложной структуре тарифообразования, позволяющий распределять провозные возможности АТП в динамически нестабильных условиях рыночной конъюнктуры.

Объектом исследования система оперативно-производственного планирования перевозок грузов в условиях динамически изменяющихся факторов среды эксплуатации АТС.

Предметом исследования являются модели формирования развозочных (сборных) маршрутов ГАП, основанные на методах динамического программирования и многокритериальной оптимизации при оперативно-производственном планировании перевозок в ГДТС.

Научная новизна исследования заключается в:

1. Разработке аналитической модели, алгоритмов и программного обеспечения для определения оптимальных развозочных (сборных) маршрутов при оперативно-производственном планировании перевозок в динамически изменяющихся условиях, базирующиеся на интеграции в задачу динамического программирования результатов решения задачи многокритериальной оптимизации при выборе управляющего действия для каждого дискретного состояния ГДТС.
2. Разработке интегрального показателя экономической эффективности ГАП для условий сложной структуры тарифообразования, когда применяются различные тарифы в зависимости от расстояния перевозок, времени или объёма перевозок, позволяющий определить эффективность распределения провозных возможностей АТП по типам заявок в динамически нестабильных условиях рыночной конъюнктуры.
3. Разработке методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок, состоящей из двух основных элементов: теоретического обеспечения (маршрутизатора) и его реализующего программного обеспечения (протокола маршрутизации), располагающая следующими уникальными свойствами:
 - аналитический аппарат маршрутизатора предполагает возможность выбора эффективного действия при наличии стохастической неопределённости, когда отсутствует информация, гарантирующая обоснованное применение известных законов распределения случайных величин (нормальный, логарифмически нормальный и др.);

- при формировании исходного для расчётов графа исследуемой системы в качестве дискретных состояний могут и должны рассматриваться не только участки, где АТС прекращает движение в связи с необходимыми процедурами грузопереработки, но состояния сети, где происходит резкое изменение режимов движения АТС. Например, в силу загруженности «пробки» на том или ином участке сети, что особенно важно в условиях мегаполисов;

- методика работает с неограниченным количеством входов в систему (показателей), поэтому в базы данных могут и должны быть включены не только результативные показатели АТС (пробег, объем перевозки, грузооборот и т.д.), но и результативные показатели грузоперерабатывающих пунктов (производительность ПРР, время ожидания при ПРР и т.д.).

Теоретическая значимость работы заключается в разработке метода маршрутизации ГАП, применимого в условиях значительной степени влияния многочисленных факторов технико-эксплуатационного и экономического характера, то есть позволяющего решать объективно задачи маршрутизации в условиях значительной степени неопределенности стохастической природы факторов. Разработанный аналитический аппарат данного метода и программное обеспечение на его основе позволяют в автоматизированном режиме формировать оптимальные развозочные, сборные и развозочно-сборные маршруты в динамические нестабильных внешних условиях и с учетом неограниченного количества критериев эффективности.

Практическая значимость заключается в возможности применения в АТП разработанной и реализованной в ПО методике при маршрутизации ГАП в сложных гетерогенных динамических транспортных системах (транспортные системы ГАП в мегаполисах) с максимальной степенью эффективности. Разработанное ПО позволяет в автоматизированном режиме формировать оптимальные развозочные, сборные и развозочно-сборные маршруты в динамические нестабильных внешних условиях и с учетом неограниченного количества критериев эффективности.

Применение разработанной методики позволяют повысить достоверность оперативно-производственного планирования грузовых перевозок, исключить субъективные ошибки, определяемые наличием «человеческого фактора» и создать автоматизированную интеллектуальную систему управления перевозками в АТП или транспортно-логистической компании (ТЛК).

Методология и методы исследования основываются на системном анализе, теории принятия решений в условиях различных состояний внешней среды «игры с природой», методов динамического и линейного программирования, теории вероятностей, статистических методов обработки и анализа экспериментальных данных и аналитических методов решения многокритериальных задач.

Область исследования соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта:

- П2. Оптимизация планирования, организации и управления перевозками пассажиров и грузов, технического обслуживания, ремонта и сервиса автомобилей, использования программно-целевых и логистических принципов.

- П15. Развитие новых информационных технологий при перевозках.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая модель (маршрутизатор) определения оптимальных маршрутов при оперативно-производственном планировании грузовых перевозок.
2. Алгоритмы и ПО (протокол маршрутизации) определения оптимальных маршрутов развозочных маршрутов в ГДТС мегаполиса.
3. Методика применения цифровой объектно-ориентированной модели управления оперативным планированием грузовых перевозок на развозочном (сборном) маршруте
4. Интегральный показатель экономической эффективности применения протокола маршрутизации в сложной структуре тарифообразования.

Личный вклад автора заключается в разработке основных положений методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок (ГАП).

Все основные идеи и разработки, положенные в основу новой аналитической модели формирования развозочных (сборных) маршрутов ГАП, основанной на методах динамического программирования и многокритериальной оптимизации при оперативно-производственном планировании перевозок в гетерогенных динамических транспортных системах принадлежат автору.

Степень достоверности обоснована применением методов системного анализа, теории моделирования, теорий вероятностей и теории принятия решений, методов динамического программирования и векторной оптимизации, отсутствием противоречий с ранее проводимыми исследованиями другими учеными по тематике организации и управления ГАП и принятию решений в сложных организационно-технических системах; подтверждена публикациями в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК РФ и в изданиях, индексируемых в международной базе научного цитирования Scopus и WoS; обеспечена применением современных средств программного обеспечения, разработанных на основе методов динамического программирования и векторной оптимизации.

Материалы исследования применялись при выполнении научно-технической работы «Разработка цифровых объектно-ориентированных моделей управления в транспортно-логических системах и прототипов программного обеспечения на их основе», ФГБОУ ВО «СПбГАСУ», 2020-2021 гг.

Апробация результатов. Основные положения и результаты исследования докладывались на конференциях:

- Объединённый международный онлайн-форум МАНФ-2020 «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы» и АВТОНЕТ– 2020 «Форум инновационных транспортных технологий», 14–15 октября 2020, г. Москва.
- Петербургский международного инновационного форума (11–13 ноября, 2020 - Санкт-Петербург),

- X Международный форум «Арктика: настоящее и будущее», 10–12 декабря 2020, г. Санкт-Петербург.
- Санкт-Петербургская конференция кластеров «Кластеры открывают границы. Цифровая трансформация», 28 июня 2021 г, г. Санкт-Петербург.
- Международная конференция «Транспортная доступность АРКТИКИ: сети и системы», 2–4 июня 2021 г. г Санкт-Петербург.

Реализация результатов работы диссертационного исследования подтверждается:

1. Актом о внедрении в учебные программы ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» при реализации лекционных, практических и лабораторных занятий кафедрой транспортных систем по направлениям подготовки:
 - бакалавров - 23.01.01 «Технология транспортных процессов» (профиль подготовки «Организация перевозок и управление на автомобильном транспорте»)
 - 23.04.01 «Технология транспортных процессов» (профессионально-образовательная программа «Транспортная логистика и интеллектуальные транспортные системы»)
2. Актом о внедрении в производство АО «Корпорация «Оборонтех», ООО «СТЭК Северо-Запад».

Публикации. По теме работы опубликовано 5 работ. Общий объем их составляет 1,16 печатных листа, включая 3 из них в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций, 2 статьях в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 158 страниц машинописного текста, включающего 52 рисунка и 16 таблиц. Библиография содержит 138 наименования

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ МАРШРУТИЗАЦИИ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК

1.1 Состояние и тенденции развития грузовых автомобильных перевозок, определяющих актуальность разработок новых инструментов маршрутизации

Проблема разработки эффективной системы управления процессами доставки грузов автомобильным и другими видами транспортом является в РФ одной из приоритетных задач, нерешенных в современных экономических условиях. Суммарные издержки на осуществление перевозок грузов и пассажиров, оцениваются в 700 млрд. руб. в год, а это более 10% от ВВП страны. Значительный уровень издержек обуславливается, в первую очередь, низкой эффективностью работы грузового автомобильного транспорта. Этот показатель в относительных единицах в 2,6 раза аналогичных показателей в СССР, и в 4 раза ниже по сравнению с показателями эффективности работы доставки грузов в развитых зарубежных странах. При этом доминирование автомобильного транспорта в общей структуре грузовых перевозок традиционно, например, «в 2018 году объем грузоперевозок (тоннаж перевезенных грузов) в России составил 8,3 млрд т. Наибольшая доля традиционно приходится на автомобильный транспорт (67,1% в 2018 году)» [2]. Несмотря на высокий удельный вес автомобильного транспорта (АТ) в транспортной системе нашей РФ, уровень применяемых технологических процессов и методов организации ГАП значительно уступает другим видам транспорта в РФ. Еще в большей степени проявляется отставание в уровне применяемых технологических процессов в развитых стран Европы и в США, что негативно сказывается как на объемных, так и на экономических показателях эффективности ГАП. Для сравнения: среднесуточное расстояние перевозки грузов в одном автотранспортном средстве (АТС) в РФ составляет 350...380 км, а, например, в США этот показатель составляет – 1300...1500 км. При этом затраты

на перевозки грузов автомобильным транспортом в РФ 1,8...2,5 раза выше, чем в технологически развитых странах. Принимая во внимание то, что на АТ с учетом протяжённости автомобильных дорог и инфраструктуры обслуживания занято около 6% работающего населения страны производственные в транспортной отрасли фонды определяются в размере не менее 11% от всех основных фондов страны, задача повышения эффективности ГАП приобретает особую актуальность. Но автомобильный транспорт, несмотря на высокие показатели объема перевозок и используемую для перевозок разнородную структуру подвижного состава, остается преимущественно транспортом перевозок грузов на незначительные расстояния с невысоким грузооборотом (рисунок 1.1 и 1.2).



Рисунок 1.1 - Структура объемов перевозок грузов по видам транспорта в РФ, млрд т, 2014...2019 гг. [2]

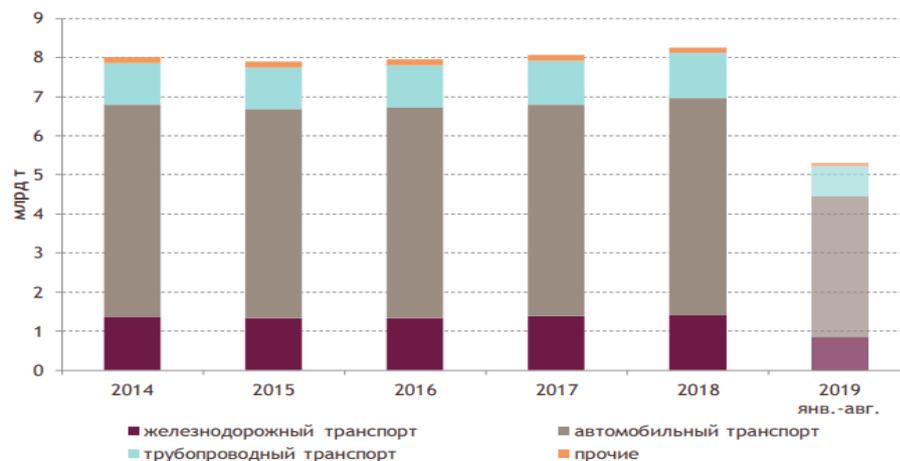


Рисунок 1.2 - Структура грузооборота по видам транспорта в РФ, млрд т, 2014...2019 гг. [2]

Незначительное среднее расстояние перевозок грузов автомобильным транспортом вполне объяснимо его затратными (экономическими) показателями в сравнении с другими видами транспорта (таблица 1.1)

Таблица 1.1 - Средняя дальность перевозки 1 т грузов на различных видах транспорта в РФ, км, 2014–2018 гг. [2]

	2014	2015	2016	2017	2018
Воздушный	4099	5383	5838	6080	6225
Трубопроводный	2248	2282	2288	2297	2282
Морской	2071	2217	1751	1898	1958
Железнодорожный	1673	1735	1769	1801	1841
Внутренний водный	607	524	570	567	569
Автомобильный	46	46	46	47	47
Всего	635	647	654	680	683

Но остаётся основной вопрос об эффективности эксплуатации транспортных средств на автомобильном транспорте. Чтобы оценить этот показатель приведем данные на рисунке 1.3, характеризующие негативную тенденция снижения эффективности эксплуатации подвижного состава на автомобильном транспорте.

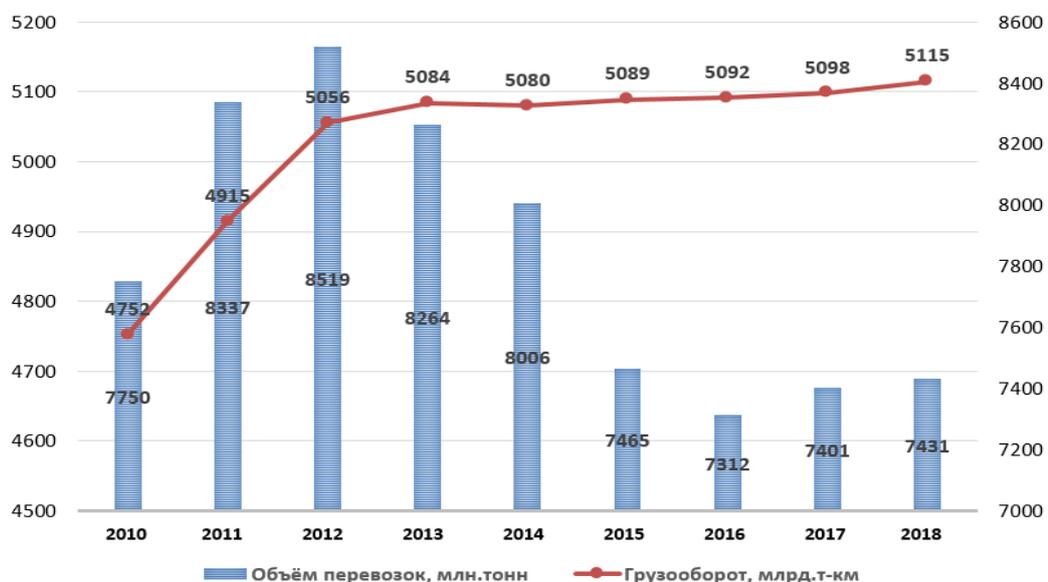


Рисунок 1.3 – Динамика изменения объёма перевозок и грузооборота в течение последнего десятилетия (млрд. т-км, млн. тонн)

Из диаграмм на рисунке 1.3 видна отрицательная динамика в соотношении изменения показателей объём перевозки и грузооборот на автомобильном транспорте. Общеизвестно, что снижение показателя объём перевозки при увеличении грузооборота свидетельствует об неэффективности применяемых моделей управления при эксплуатации подвижного состава [3,4,5,6]. В результате данная ситуация приводит к неоправданному повышению затрат на перевозки, в итоге переносимая на плечи населения.

В программе «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года» [1] одной из основных задач, стоящих перед отраслью, обозначена необходимость сокращения издержек на перемещение производимых стране материальных ценностей. При этом автомобильный транспорт является наиболее ресурсоемким, на его долю приходится более двух третей объема всех нефтяных топлив, потребляемых всеми видами транспорта, а удельные показатели расхода топлива на автомобильном транспорте в РФ очень высоки по сравнению с показателями, достигнутыми в развитых странах мира. Неслучайно в обновленной «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года», заложены наибольшие объемы капитальных вложений, рассчитанные в ценах соответствующих лет, на развитие автомобильного транспорта (рисунок 1.4).

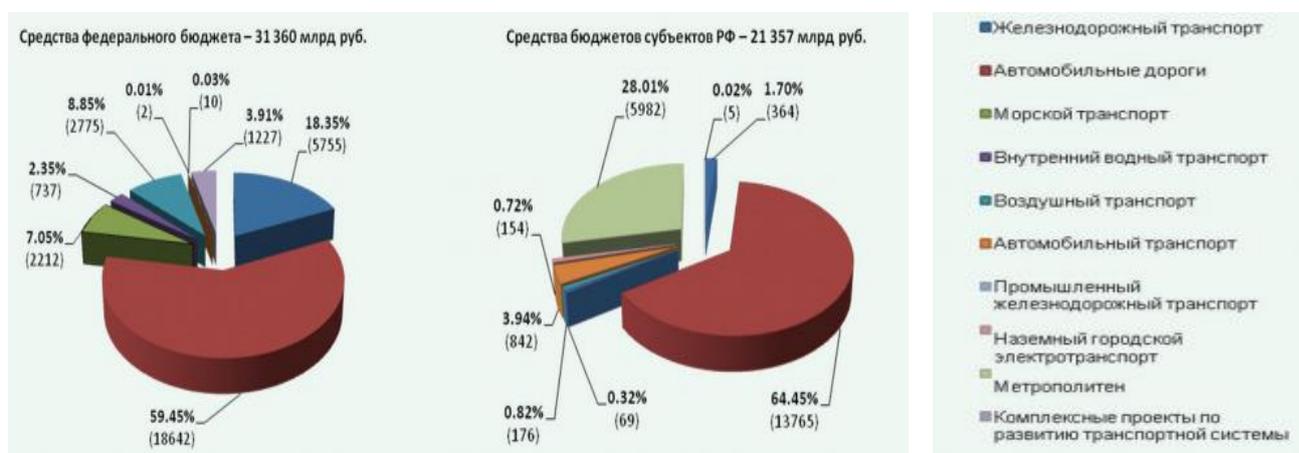


Рисунок 1.4 – Капитальные вложения в реализацию программы Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года [7]

Естественно, что наибольший объем средств предполагаемых капитальных вложений предполагается инвестировать в развитие транспортной инфраструктуры автомобильной отрасли и создание комплексной системы транспортного планирования (СТП). Оценочные результаты капитальных вложений в транспортную инфраструктуру приведены на рисунке 1.6

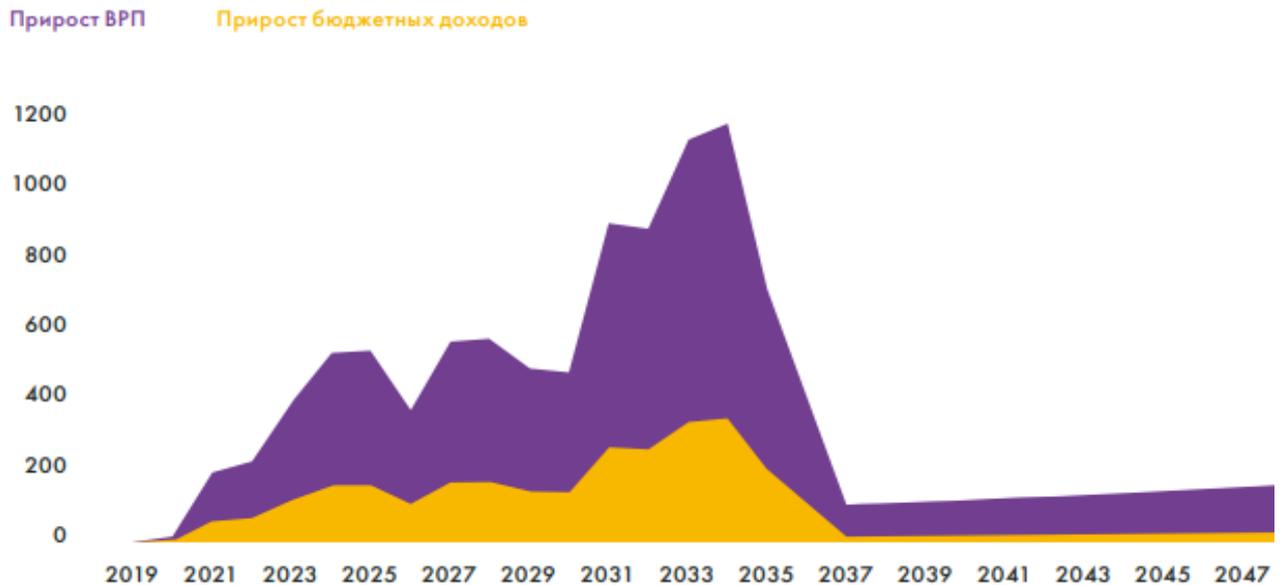


Рисунок 1.6 - Оценочные результаты капитальных вложений в транспортную инфраструктуру

Вместе с тем в состав задач СТП должен войти новый комплекс математических моделей, обеспечивающий оптимальное прогнозирование объема перевозок и распределения топологии грузовых и перевозок, то есть новая эффективная система транспортного моделирования и планирования. В частности, за счёт решения этих двух задач планируется повысить среднюю коммерческую скорость движения подвижного состава и показатели своевременности доставки грузов с опережающим прогнозом по автомобильному транспорту (рисунки 1.5 и 1.6) [7].



Рисунок 1.5 – Планируемое повышение коммерческой скорости подвижного состава [7]



Рисунок 1.6 – Количество отправок грузов, поставленных в договорной срок, % [7]

При формировании любой новой системы, основанной на математическом моделировании исследуемых процессов, важно знать информационное состояние внутренней и внешней среды исследования. Это необходимо для выбора методологии математического моделирования, определяющейся условиями поставленной задачи (детерминированная задача, стохастическая или задача, решаемая в условиях неопределенности) [8,9,10,11,12]. Под информационным состоянием внешней среды в приложении к исследуемой задаче следует понимать: экономическое информационное состояние (рынок ГАП), технологическое информационное состояние (применение или не применение ИТ-технологий, наличие элементов ИТС и др.), научно-методологическое информационное и др.

Экономическое информационное состояние рынка автомобильных перевозок в РФ в настоящее время является динамически нестабильным:

- 1) Значительная разбалансированность спроса и предложения на услуги по перевозке грузов и как результат нестабильного экономического состояния, определяемого влиянием внешних, сезонных и других разнообразных по своей природе факторов;
- 2) Существенное различие в затратах определяемого способом осуществления ГАП: перевозки привлеченным наёмным подвижным составом, перевозки собственными автомобилями предприятий, а также разница в стоимости доставки в зависимости от вида объёма перевозки, перевозимого груза, регулярности поступления заявок и т. д.;
- 3) необходимости обеспечения требований качества перевозки (сохранность, безопасность, соблюдение специфических условий перевозки и т. д.).
- 4) Постоянные изменения в географии распределения грузопотоков и т. д.

Наиболее сложным в данной ситуации оказывается формирование заключительного этапа внутрипроизводственного планирования является оперативно-производственное планирование с целью обеспечения выполнения заказов клиентов на перевозки в заданных объемах и номенклатуре и с учётом удовлетворения спроса на заявки разнородных групп клиентов (постоянных, непостоянных, эпизодических клиентов), в установленные сроки, при рациональном использовании имеющихся ресурсов подвижного состава. На этом этапе определяются конкретные задания каждому автомобилю и разрабатывается сменно-суточный оперативный план перевозок. При этом необходимо разрабатывать схемы кратчайших расстояний между пунктами погрузки и разгрузки и оптимальные схемы маршрутов. Перечисленные особенности можно характеризовать как динамически изменяющиеся условия среды взаимоотношений «потребитель-перевозчик» в системе «управление-транспортное средство-эксплуатация», что приводит к необходимости изменения подходов к формированию системы транспортного моделирования и планирования. Работая в данных условиях, логистические службы АТП испытывают множественные

трудности по организации перевозок, так как не располагают информацией, как на научной основе организовать эффективную работу автомобильного транспорта.

В результате стоимость издержек на осуществление транспортной работы значительно возрастает, увеличивая стоимость конечной продукции, проходящей через этап транспортирования. При этом стратегические задачи развития инфраструктуры транспортных систем опираются экономические на механизмы свободного рынка, когда каждый её экплантат «оптимизирует собственную логистику». Данный подход приводит к ситуации, когда результаты подобной оптимизации не удовлетворяют никого. Альтернативой данному подходу является системное использование механизмов синхронной оптимизации результативных показателей и показателей использования всех видов перевозок и основных элементов транспортной инфраструктуры. Это позволит дифференцировать во времени и в пространстве транспортные потоки грузов и пассажиров в транспортно-логистических системах (ТЛС).

Технологическое информационное состояние. Любые процессы оптимизации работы ТЛС осложняются характерными особенностями объекта управления – транспортного потока, обладающего такими свойствами как стохастичность, нестационарность, инерционность, отсутствие взаимосвязанности элементов и наличие неустойчивости связей. Транспортная наука постоянно искала новые технологические приемы эффективного управления таким нестабильным объектом. Системы управления в ТЛС развивались от моделей жесткого локального однопрограммного регулирования до автоматизированных систем управления (АСУ). В настоящее время декларируется необходимость применения принципов искусственного интеллекта, то есть преобразования ТЛС в ИТС, использующих алгоритмы самообучения [13] и системы на основе моделей обработки больших баз данных и нейросетевых технологий [14], [15].

Данный подход получил широкое распространение за рубежом, но он требует изменений как в структуре управления ГАП, так и в способах их организации. Например, в США наземная транспортная инфраструктура система исторически управлялась разными организациями со своими специфическими целями и

задачами. Управленческие структуры имели различные размеры и зоны ответственности [16]. Например, в США уже в середине 1990-х гг. прошлого века были разработаны национальные стандарты для отдельных систем управления магистралями и смежным системам [17]. Принятый в 1991 г. конгрессом США документ Intermodal Surface Transportation Efficiency Act (ISTEA) являлся основой для развития наземного транспорта во всех его аспектах [18]. С 1998 г. структура систем управления транспортом в США подчиняется документу Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA-21) [19], в котором определено функциональное деление по специфическим секторам: интеллектуальные АТС (Intelligent Vehicle Initiative), городская инфраструктура (Metropolitan Infrastructure), внегородская инфраструктура (Rural Infrastructure), коммерческий транспорт (Commercial Vehicle Infrastructure) (рисунок 1.7.)

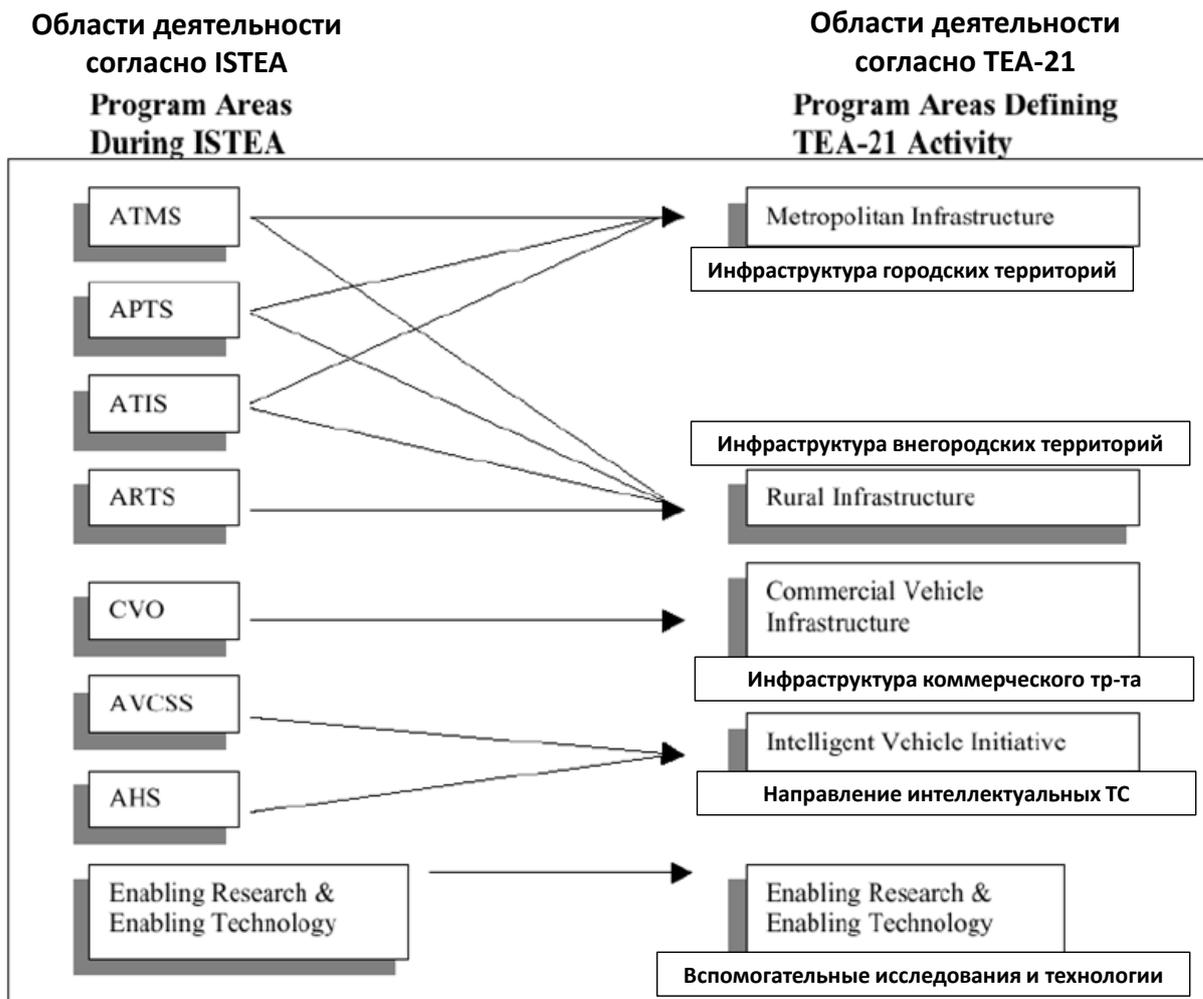


Рисунок 1.7 – Схема реструктуризации компонентов ИТС в США [19]

Вопрос интеграции этих всех систем в единое управление получил развитие в связи с ростом возможностей применения вычислительной техники и средств коммуникации для создания цифровых сервисов управления всеми видами движения транспорта [20] и [21]. С каждым годом данное направление совмещения бизнеса и технологических возможностей получает все большее развитие [22], [23] и [24]. В 2006 г. было разработано «Руководство по координированному управлению магистралями и УДС» (Coordinated Freeway And Arterial Operations Handbook) [25].

Основным принципом управления в данном документе определяется формирование «коридоров» или участков магистралей с высокой степенью предсказуемости и надежности параметров перемещение транспортных средств по некоторой территории. При формировании процедур интегрированного управления «коридорами» реализуется общесистемный подход (общая теория систем - ОТС) с последующей их трансформацией в процедуры управления, характерные для сложных систем (теория сложных систем - ТСС).

В литературе описывается множество подобных проектов [26] и [27]. Затем, согласно ТЕА-21, установившему курс на координацию управления всей системой наземного транспорта в США, интегрирование систем распространилось на остальные системы, входящие в понятие ИТС. Степень интеграции различных компонентов ИТС в 2002 г. в США показана на рисунке 1.8.

К настоящему времени в процессах разработки ИТС в США определилась тенденция перехода к «активному управлению» (Active Traffic Management) [28, 29] и [30], предполагающему математическое моделирование параметров воздействия на транспортный поток отдельных АТС и на основе совокупных оценок прогнозирование параметров транспортного потока в целом [31]. Данный подход требует при координировании управляющих воздействий создание единой информационно-коммуникационной сети (ИКС), так предполагается, что каждый элемент ИТС должен соотносить свои действия с общей концепцией управления.

Таким образом, понятие «единица управления» переносится со всего транспортного потока на отдельный объект (отдельную партия груза, отдельное транспортное средство, отдельный пассажира).

Данная интеграция объектов ИТС осуществима, но содержит большое количество видов и типов связей [32]. На рисунке 1.9 представлена схема связей и обмена данных между элементами ИТС. То есть можно утверждать, что процесс управления в ИТС требует создания единой ИКС управления информационными потоками и разработки объектно-ориентированных моделей управления (ОМУ) в транспортной сети, формирующих оптимальные траектории перемещения отдельных объектов. Следовательно, необходимо разрабатывать алгоритмы управления, основанные на аналитических моделях и алгоритмах теории информационного взаимодействия, которые способны поддерживать необходимую ёмкость и целостности взаимодействия между объектами ИТС

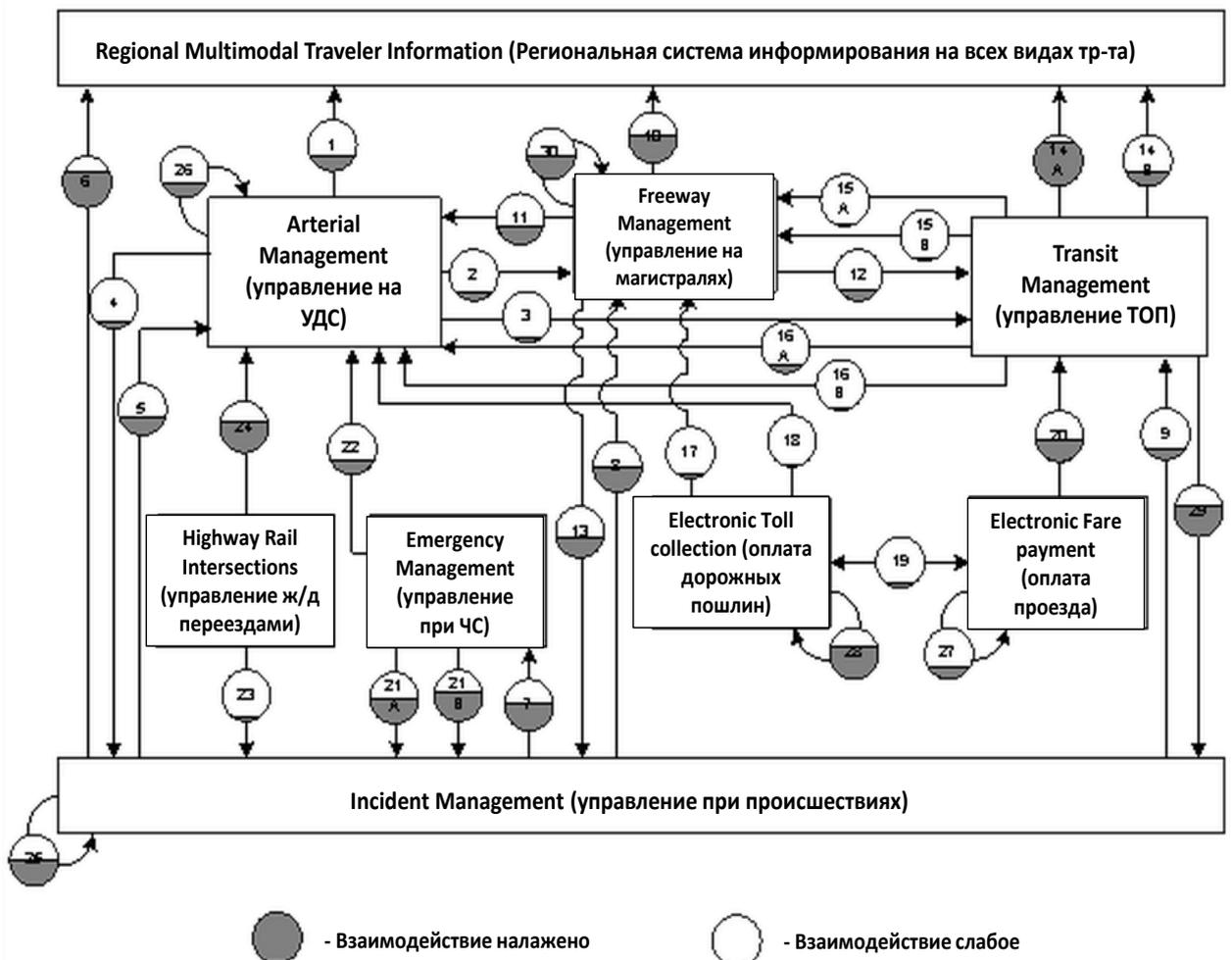


Рисунок 1.8 – Степень интеграции компонентов ИТС в США

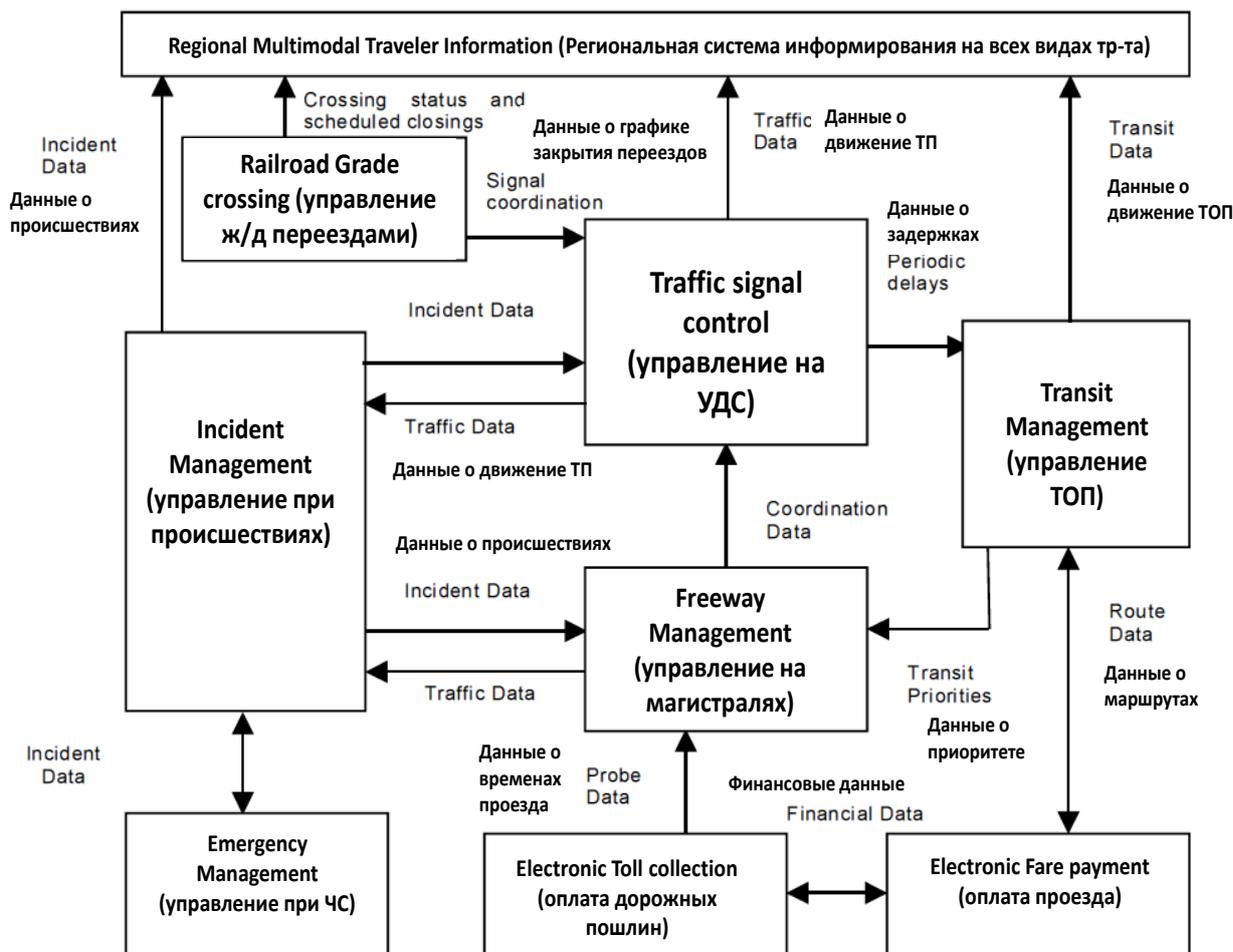


Рисунок 1.9 – Связи между компонентами ИТС

Методологическое обеспечение. Современные подходы в области организации процессов обмена информации имеют, как правило, клиент-серверную архитектуру, а в качестве серверного ПО применяются системы управления базами данных (СУБД). Методологией разработки СУБД традиционно являлся реляционный принцип построения системы принятия решений. Данный подход к управлению является предметно-ориентированным (ПОП), когда средствами управления в системе является хранимая информация в виде таблиц. То есть управление осуществляется по накопленным статистическим данным, носящим стохастический характер по установленным законам распределения случайных величин. **Основным недостатком данного подхода является то, что при увеличении сложности системы невозможно достоверно оценивать процедуры управления при динамических изменениях в системе.**

При ООП программа представляет не только описание объектов и критериев, но и методы их взаимодействия, необходимые для операций над объектами. Преимуществом ООП то, что механизмы преобразования атрибутов позволяют строить производные структуры на основе базовых для более сложных состояний системы, а управление является полиморфными, что делает ПО более гибким и универсальным. В концепции ООМУ, основной задачей которого, получение оптимальных траектории движения грузов или пассажиров с помощью методов аналитического моделирования применимы модели динамических программирования и методы многокритериальной оптимизации. При этом актуализируется необходимость разработки методов эффективной маршрутизации в динамически изменяющихся информационных условиях внешней среды. К новым условиям, усложняющим информационную ситуацию, можно отнести и активное развитие современных транспортных сетей и транспортной инфраструктуры, сопровождающиеся изменениями структуры и интенсификацией транспортных потоков [33, 34]. Необходимость разработки новых моделей маршрутизации, основанных на ООП, подтверждается работами современных исследователей, чья научная и практическая деятельность непосредственно связана с решением задач оперативного планирования движения объектов в сложных транспортных системах. В статье, посвященной развитию методов маршрутизации [35], указывается что «...развитие современных транспортных сетей характеризуется динамикой ситуации в сети. Основными факторами динамики является изменение ситуации на отдельных звеньях сети и изменение числа потребителей, как в большую, так и в меньшую сторону», и «что обеспечение скоростного и надежного обмена потоками между узлами ТС при жестких требованиях к задержкам доставки является одной из важнейших проблем» [35]. В этом материале указано, что «модели и алгоритмы адаптивной маршрутизации, которые вариативно определяют маршруты применительно к текущей ситуации сети» [35]. Данное направление поддерживается авторами многочисленных исследований [36, 37,38,39,40,41,42,43,44].

Ключевым элементом в организации транспортного процесса в ГАП является маршрутизация движения подвижного состава, как совокупность процедур по выбору оптимальных характеристик пути следования транспортных средств. Давно доказано, что существует прямая зависимость между показателями эффективности при организации маршрутов в транспортной сети и производительность работы подвижного состава. алгоритмы адаптивной маршрутизации, которые вариативно определяют маршруты применительно к текущей ситуации сети». Автором [35] приводится термин «адаптивной маршрутами», то есть подразумевается, что необходим учет текущего и динамического изменяемого информационного состояния внешней среды для построения современных моделей оптимальных маршрутов. В качестве идеи адаптивного управления при реализации процедур маршрутизацией принимается тезис о необходимости перейти от жесткой системы управления перевозками к более «гибким» алгоритмам. Что предполагается реализовать с применением методов анализа коммуникационных сетей [45] и разработки специального программного обеспечения (ПО), позволяющего оперативно анализировать и учитывать текущую ИС. Внедрение адаптивной маршрутизации позволит учитывать динамику в транспортной сети [46] сформировать оптимальный маршрут и сконфигурировать с помощью ПО максимальное числа эксплантатов [47,48].

Задача маршрутизации становится особенно актуальной при многовариантности и многоаспектности (многокритериальности) распределения грузовых потоков в динамически изменяющихся условиях внешней среды. В этом случае задача оптимальной маршрутизации может быть решена только на основе разработки специализированного математического аппарата, как аналитического инструмента принятия эффективных решений ПО на его основе. Поэтому можно утверждать, что задача оптимизации процессов маршрутизации в динамически изменяющемся состоянии внешней среды представляет собой проблему, требующую приложения новых научных знаний.

В данном диссертационном исследовании предлагается разработать научные инструменты решения указанной проблемы, а именно должны быть разработана

методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок, позволяющей системно с учётом многокритериальной среды эксплуатации управлять коммерческой эксплуатацией подвижного состава грузовых автотранспортных предприятий (ГАТП).

1.2 Анализ научных исследований, посвященных разработке моделей оптимизации маршрутов транспортных средств

Еще в советское время транспортные предприятия пользовались достаточно эффективными методиками формирования маршрутов движения: сборных, маятниковых, развозочных, сборных т.д. Теоретическую основу развития ГАП были заложены и развивались постсоветское время в работах Вельможина А.В., Воркута А.И., Гудкова В.А., Горева А.Э., Корчагина В.А., Лукинського В.С., Миротина Л.Б., Николина В.И., Пугачева И.Н, Россохи В.И. [49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64] и многих других авторов.

К исследованиям, посвященным организации и планированию перевозок автомобильным транспортом в изменившихся условиях его работы, обращаются и современные авторы научных работ [65,66,67,68,69,70]. Все перечисленные работы при решении задач маршрутизации опираются на ряд апробированных математических прикладных методов построения маршрутов. В данных работах ключевым подходом к задаче маршрутизации является **необходимость заданным парком автомобилей наиболее эффективно переместить груз от отправителя к получателям с учетом ограниченного времени работы АТС, его грузместимости, среднетехнической скорости, то есть объектом исследуемого процесса является необходимое количество автомобилей для перевозок грузов.**

Общая методология решения оптимизационных задач, основанная на данном принципе построения маршрутов отражена в статье [71]. В данной статье сказано, что в качестве целеполагания установлено **только снижение себестоимости ГАП перевозок**, как задача маршрутизации (Vehicle Routing Problem, VRP). Далее анализируются основные методы решения задачи маршрутизации для ГАП (таблица 1.2).

Число математических методов, используемых для решения задачи маршрутизации велико, и постоянно увеличивается с ростом сложности транспортных сетей возможностей машинной обработки информации (вычислительной техники). Разработкой методов, положенных в основу аналитического моделирования и алгоритмизации процессов маршрутизации в различные годы занимались крупные ученые и исследователи Беллман Р. Геронимус Ю.В., Житков В.А., Канторович Л.В., Ким С.В., Литтл Дж., Мартин Э., Орлов Д.М., Кларк Дж, Прудовский Б.Д., Эванс С.П., Гройс Дж., Миллер С.Е. Их на работы посвящены созданию и развитию математических методов и моделей оптимизации, представленных в таблице 1.2 [72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83].

Таблица 1.2 – Сводная таблица методов решения задач оптимизации в ТЛС

Метод/авторы	Краткое описание метода
Метод «ветвей и границ» (1965) Дж. Литтл, К. Мурти, Ф. Шапиро	В основе данного метода лежит идея последовательного разбиения множества возможных решений на отдельные подмножества, дальнейшей проверкой – содержит ли конкретное подмножество оптимальное решение или нет
Методы локальной оптимизации (1958) G. Groes	Данный метод предназначен для решения дискретных задач. строятся по следующему принципу. Сначала определяется исходное допустимое решение и назначается окрестность этого решения с нахождением локального оптимума. Далее процедура повторяется многократно с выбором локального экстремума, исходя из установленного целеполагания, как приближенного решения.

<p>Методы случайного поиска Б. В. Семенов (1970) Б. Рыбак (1982) А. Чалый</p>	<p>Данный метод содержит идеи теории игр автоматов. Метод случайного поиска использует для выявления предпочтительных состояний, пробные смещения от текущей точки в случайных направлениях.</p>
<p>Метод динамического программирования (1964) Р. Беллман М. Хелд Р. Карп</p>	<p>Динамическое программирование – это вычислительный метод решения задач оптимального управления определенной структуры. Динамическое программирование возникло и сформировалось в 1950–1953 гг. В основе принципов динамического программирования лежит принцип Р. Беллмана. Динамическое программирование (ДП) определяет оптимальное решение в многомерной задаче путем ее декомпозиции на этапы, каждый из которых представляет подзадачу относительно одной переменной. Преимущество такого подхода состоит в том, что вместо многомерной задачи на каждом этапе решаются одномерные оптимизационные задачи.</p>
<p>Метод теории расписаний (1968) Д. М. Орлов</p>	<p>Теория расписаний – это раздел исследования операций, в котором строятся и анализируются математические модели календарного планирования (т. е. упорядочивания во времени) различных целенаправленных действий с учетом целевой функции и различных ограничений.</p>
<p>Метод имитационного моделирования (1989) Л.Б. Миротин, А. Г. Гольдин Б.П. Безель</p>	<p>Применение данного метода обусловлено следующими факторами: необходимостью исследования динамики изменений в процессе функционирования системы ГАП, сложная структура маршрутов, постоянными изменениями их во времени и пространстве,</p>
<p>Эвристические методы: Г. Кларк, Дж. Райт (1964) А.И. Воркут (1982) В. Gillet, L. Miller (1974) А. Холлидей (1972)</p>	<p>Эвристические методы основаны на подсознательном мышлении, не допускают алгоритмизации и характеризуются неосознанным (интуитивным) способом действий для достижения осознанных целей. Эвристические методы ещё называют методами инженерного (изобретательного) творчества.</p>

Рассмотрим основные активно применяющиеся решения оптимизационных задач по формированию маршрутной сети. В настоящее время эффективность математических методов решения задачи маршрутизации принято оценивать, применяя в качестве основной задачу коммивояжера.

Смысл задачи коммивояжера состоит в том, что «коммивояжер», выезжая из пункта (n), в определенной последовательности посещает остальные $1, 2, \dots, (n-1)$ городов и возвращается в пункт выезда (n). При этом определяется такой маршрут, который дает наименьшую «стоимость» объезда пунктов при условии, что «коммивояжер» не заезжает ни в один из них более одного раза, что в терминологии графов означает найти «гамильтонов цикл наименьшей длины». Применительно к данной задаче метод динамического программирования интерпретируется как n -шаговый процесс принятия решений, на каждом шаге которого «коммивояжер» должен определить оптимальный маршрут объезда оставшихся пунктов в зависимости от того, в каком из них он находится. Данный подход ставит транспортное средство на главное место, от которого стоит выстраивать все остальное и применять методы маршрутизации. Другими словами, в центре построения маршрута находится транспортное средство, но не груз.

Рассмотрим в качестве примера работу [84]. Автор утверждает, что разработал новый общий эволюционный метод множества «**остовных**» деревьев составления маршрутов. Автор предлагает использовать так называемую «эволюционную метаэвристику» для рассмотрения различных «**остовных**» деревьев для их преобразования в некую маршрутную сеть. При этом фактически осуществляется простой перебор «**остовных**» деревьев, предварительно решив транспортную задачу, а начальным «**остовным**» деревом может быть любое, которое преобразуется в допустимое. Естественно, что данный подход является одним из вариантов реализации алгоритма Дейкстры [85] с присущим основным недостатком – выбор решения осуществляется по единственному критерию.

Аналогичен подход, основанный на упрощенной модели динамического программирования [71] и оптимизирующий показатели мелкопартионных перевозок на основе алгоритма Кларка-Райта.

Задачу развозки груза определяется следующим образом:

m – количество автомобилей грузоместимостью P_k ($k=1:m$).

$N = \{j/j=1,2, \dots, n\}$ – количество получателей в задаче, где $j=0$ – отправитель.

$R_k = |j_1^k, j_2^k, \dots, j_r^k, \dots, j_{s_k}^k|$ – маршрут ($k=1:m$).

Система кольцевых маршрутов должна удовлетворять условию:

$$\bigcup_{k=1}^m R_k = N \quad (1.1)$$

при объединении маршрутов в транспортную сеть:

$$R_r \cap R_k = \emptyset \quad (r, k=1:m; r \neq k) \quad (1.2)$$

при этом условие непересечения маршрутов:

$$Q_k = \sum_{r=1}^{s_k} q_{j_r^k} \leq P_k \quad (k=1:m) \quad (1.3)$$

где j_r – потребность в грузе j -го пункта, Q_k – объем перевозки на маршруте R_k .

Должно выполняться условие:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{r=0}^{s_k} l_{j_r^k j_{r+1}^k} \rightarrow \min \quad (j_0^k = j_{s_k+1}^k = 0) \quad (1.4)$$

где l_{ij} – пробег между пунктами i и j , ($i, j = 0: n$)

Длина маршрута R_k составит, то есть общий пробег минимизируется.

$$L(R_k) = \sum_{r=0}^{s_k} l_{j_r^k j_{r+1}^k} \quad (1.5)$$

Однако, метод Кларка-Райта и все его возможные модификации не меняют основного однокритериального подхода к решению главной задачи – построение оптимальных маршрутов. Методы, рассмотренные в предыдущем пункте, можно использовать для расчета расстояний как для пары объектов, так и внутри целого множества объектов. Результатом таких расчетов является матрица расстояний между объектами. Но данный метод требует большого количества расчетов, точность которых не всегда может оправдать ожидания. Методы базируются на предположении, что расстояние между объектами пропорционально расстоянию между объектами по прямой. Иными словами, в их основе лежит принцип аппроксимации расстояний, не учитывающий огромного количества факторов внешней среды, довлеющих над на транспортную сеть.

При текущем планировании работы грузовых автомобилей возникают задачи рациональной организации сменно-суточных перевозок по кольцевым, маятниковым и сборно-развозочным маршрутам, оптимального закрепления потребителей за поставщиками и клиентуры за автотранспортными предприятиями, составлению графиков работы автомобилей и др., решение многих из этих задач последует различные цели, то и принимаемые в них критерии эффективности должны быть разными.

В некоторых из этих задач выбора показателя эффективности не вызывает трудностей. Например, в задаче закрепления потребителей за поставщиками таким показателем является транспортная работа, поэтому закрепление следует осуществлять так, чтобы совершаемая при этом транспортная работа была минимальной. При этом данный критерий эффективности является оправданным лишь в тех случаях, когда задача сбалансирована (суммарный спрос равен суммарному предложению). Кроме того, при закреплении потребителей за поставщиками скоропортящихся продуктов также нельзя пользоваться этим критерием: в таких ситуациях необходимо в качестве показателя эффективности принимать максимальное время доставки груза потребителю и осуществлять закрепление так, чтобы минимизировать это время.

Однако в большинстве случаев выбор критерия эффективности решения автотранспортных задач не является очевидным.

При решении практических задач, возникающих в процессе управления автомобильным транспортом, используются различные критерии эффективности:

- 1) максимум перевезенного объема груза;
- 2) максимум совершенной транспортной работы;
- 3) максимум прибыли, полученной от перевозки груза;
- 4) минимум затрат, связанных с выполнением перевозок;
- 5) минимум использованных на перевозках автомобилей;
- 6) максимум среднего коэффициента использования пробега;
- 7) минимум простоя в ПРР;
- 8) минимум потерь транспортной работы в процессе ГАП;
- 9) минимум времени выполнения перевозок и др.

Каждый из перечисленных критериев обладает определенными достоинствами и может быть применим на автомобильном транспорте. Например, в ряде работ для сменно-суточного планирования в качестве критерия эффективности предлагается либо минимум затрат транспортной организации на осуществление перевозок, либо минимум тоннаже-часов, затрачиваемых на выполнение заданного объема перевозок.

В других работах приводятся математические модели задачи планирования перевозок по маятниковым маршрутам. В качестве показателя эффективности в этих работах принято число используемых на перевозках автомобилей. После определения минимального числа автомобилей составляются маршруты, при работе по которым минимизируются их суммарные порожние пробеги автомобилей [85,86,87].

В задаче закрепления клиентуры за АТП в качестве критерия эффективности обычно принимают минимум суммарных нулевых пробегов автомобилей. Однако выбор этого критерия является правильным только в случаях, когда в автотранспортных предприятиях сосредоточены одномарочные автомобили. Если же в распределении участвуют разномарочные автомобили, то критерий

эффективности принимает более сложный вид. Во многих случаях использование различных критериев приводит к получению одинакового результата. Если, например, заданы грузопотоки (т. е. откуда, куда и сколько нужно доставить груза). Следовательно, доход (Д) от выполнения перевозок тоже задан и является постоянной величиной независимо от системы распределения автомобилей по линиям. Как известно, между затратами (С) и прибылью (П) существует следующая связь:

$$\Pi = Д - С, \text{ руб.} \quad (1.6)$$

Это означает, что при минимизации затрат достигается максимальная прибыль и оба этих критерия приводят к получению одного и того же решения. Для описываемой ситуации справедливо следующее соотношение:

$$A = A^{\Gamma} + A^{\Pi}, \quad (1.7)$$

где A , A^{Γ} и A^{Π} — суммарные тоннаже-километры пробега автомобилей соответственно общие, с грузом и без груза.

Поскольку заданы грузопотоки, то и суммарные тоннаже-километры пробега автомобилей с грузом (A^{Γ}) тоже заданы и являются постоянными независимо от системы построения маршрутов и распределения автомобилей по ним. Следовательно, при минимизации (A^{Π}) достигается минимум A и оба этих критерия приводят к получению одинакового результата. Этот вывод позволяет для части рассматриваемых случаев использовать в качестве показателя эффективности минимум суммарных тоннаже-километров пробегом автомобилей A (как известно, минимизация A с математической точки зрения значительно проще, чем минимизация (A^{Π})). Перечень критериев эффективности далеко не исчерпывается рассмотренными выше. Поскольку показатель эффективности определяется конкретной целью производства, которая может динамично меняться в зависимости от условий среды эксплуатации автомобилей, различные задачи могут

решаться по разным критериям. Таким образом, сама постановка вопроса о наиболее целесообразном единственном критерии не правомерна, а, соответственно, при решении частных автотранспортных задач не может быть единого критерия эффективности. Можно сделать вывод, что большинство работ направлено на более углубленное изучение метода Кларка-Райта, задачи Коммивояжера и их адаптации под конкретные случаи, но подход как был, так и остается прежний, содержащий статичные методы, недостаточно точные для динамически изменяющихся условий работы и поэтому, как правило, неприменяемые в АТП. Несмотря на значительное разнообразие математических моделей маршрутизации они имеют общее свойство – подтверждают **наиболее общий принцип к решению** оптимизационных задач следующим образом:

Задача маршрутизации – это NP-полная (от англ. non-deterministic polynomial – «недетерминированные с полиномиальным временем») задача. Это означает, что время решения такой задачи возрастает по экспоненте в зависимости от числа получателей груза. Поэтому ныне известные методы, обеспечивающие точное решение задачи маршрутизации, применимы для решения задач ограниченным количеством входных параметров. Данный подход является основанием во многих исследованиях для применения эвристических или приближенных алгоритмов решения задачи маршрутизации, методов локальной оптимизации, методов случайного поиска, теории расписаний, имитационного моделирования, но значительно повышает субъективизм полученного решения. Следует отметить, что многочисленные исследования практически не реализуются из-за образовавшегося хаоса и некомпетентности управления в сфере логистики перемещения грузов. В этих условиях возникает необходимость разработки эффективной методики маршрутизации для оперативного планирования перевозок грузов. Это возможно только с применением алгоритмов, разработанных на основании математических методов динамического программирования и оптимизации в условиях значительной неопределенности в условиях работы АТП.

1.3 Анализ зарубежного опыта маршрутизации перевозок в динамически неустойчивых условиях внешней среды

1.3.1 Маршрутизатор информации как основа для разработки протоколов маршрутизации в транспортной сети

Обзор зарубежных исследований показывает, что традиционные подходы решения задачи маршрутизации транспортных средств (VRP) бессильны, когда речь идет о проблемах, связанных с «быстро меняющимися сценариями маршрутизации транспортных средств». Одна из ключевых проблем заключается в том, что VRP является статической проблемой, поскольку все клиенты уже известны в начале планирования. Противоречием является то, что распределенная маршрутизация (DLRP) является динамическим процессом, где клиенты появляются динамически и вероятности появления неизвестны с самого начала.

Правильное планирование транспортных потоков в условиях неопределенности является важным элементом управления этими факторами. Для его успешного выполнения необходимы цифровые инструменты, используемые для этого, должны постоянно совершенствоваться. Одним из ИТ-инструментов, используемых при составлении маршрутов, являются, например, протоколы маршрутизации, которые ранее использовались в потоке данных. Под протоколами маршрутизации понимаются управляющие алгоритмы и математические модели на их основе. Методы планирования маршрутов - одна из основных задач VRP, целью которой является поиск оптимальных маршрутов. Особенно интересно, что для решения данной задачи в зарубежной практике используются методы планирования маршрутов информационных потоков в информационно-коммуникационных сетях, а термин «маршрутизация» изначально относится к набору элементов для планирования маршрута и передачи пакетов данных по Интернету (минимум две физические сети, соединенные между собой через маршрутизатор), от передающей станции до приемной (рисунок 1.10).

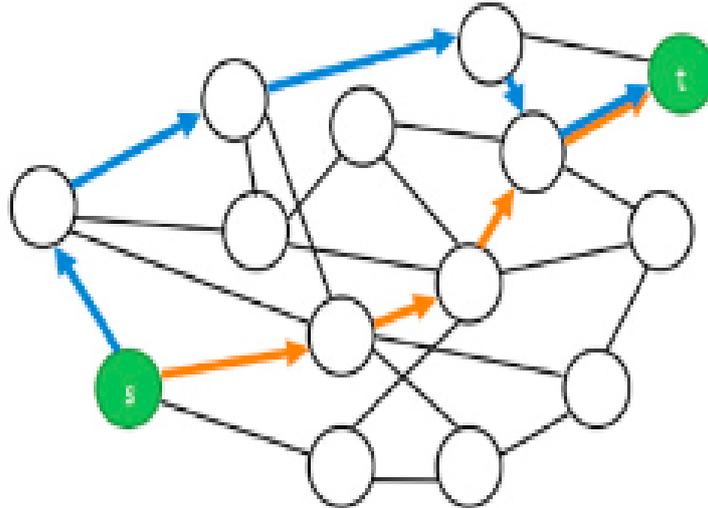


Рисунок 1.10 - Маршрутизация и выбор оптимального маршрута

Маршрутизация с информационной точки зрения обеспечивает возможность предоставлять данные из одной локальной сети в другую локальную сеть, которая может быть расположена где угодно. Назначенный маршрут может проходить через множество промежуточных сетей, что позволяет управлять глобальными сетями.

При определении маршрутов информационных пакетов действия должны быть оптимизированы настолько, насколько это возможно, чтобы позволить доставлять пакеты данных как можно быстрее. На практике можно выделить три этапа маршрутизации: первый этап состоит из генерации пакетов в единый «хост» и принятия решения об их прямом получателе и пути; на втором этапе маршрутизатор обязан переслать пакет к цели; последняя, третья стадия заключается в принятии маршрутизатором решения, отправлять ли пакеты непосредственно получателю или же промежуточный маршрутизатор (и, возможно, к какому маршрутизатору, когда их больше). Сам процесс маршрутизации можно разделить на статические протоколы маршрутизации и динамические (рисунок 1.11).

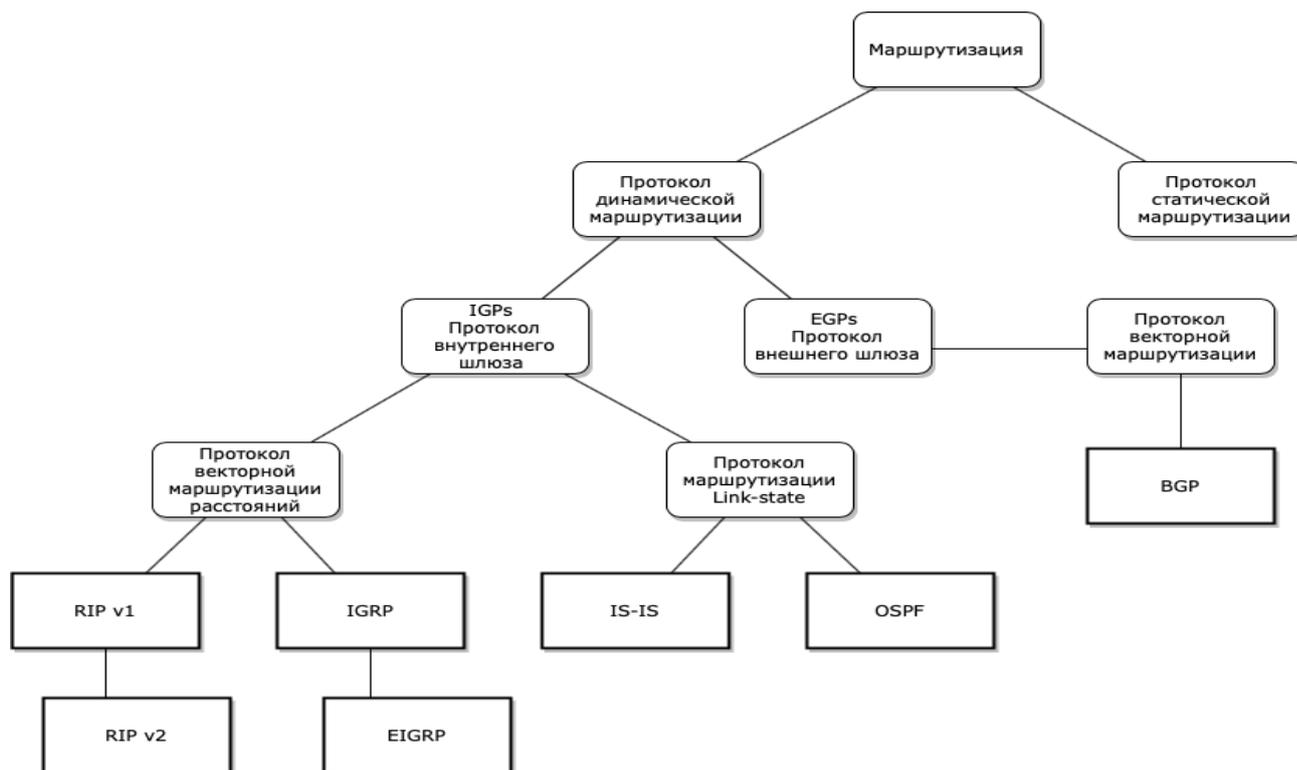


Рисунок 1.11 - Схема процесс маршрутизации

Статические протоколы маршрутизации. Статическая маршрутизация основана на том, что администратор, управляющий сетью, вручную вводит адреса отдельных локаций. При создании маршрутов таким образом требуется только предоставить такую информацию, как: адрес целевой сети, адрес сети интерфейса, IP-адрес следующего маршрутизатора на маршруте. Статическая маршрутизация — это метод, требующий больших трудозатрат на начальной стадии проектирования, в то время как на более поздней стадии он работает гораздо выгоднее в небольших сетях. К сожалению, он не имеет возможности реагировать в реальном времени на сбой отдельных маршрутов. Статическая маршрутизация, которая не может реагировать на изменения в сети, не может использоваться для больших сетей, в которых изменения происходят постоянно. Учитывая вышеизложенное, в настоящее время основным алгоритмом маршрутизации является динамический, который способен использовать изменяющиеся условия сети и соответственно обновлять их в соответствии с сообщениями маршрутизации.

Динамические протоколы маршрутизации. Другим типом маршрутизации является динамическая маршрутизация, основанная на независимой работе маршрутизаторов, собирающих информацию, необходимую для обновления данных в таблице. В случае, если сообщения маршрутизации явно указывают на изменение, маршрут пересчитывается в соответствии с программным обеспечением маршрутизации и посылает новые, обновленные сообщения на маршрутизаторы. Динамические протоколы маршрутизации можно разделить на внутренние и внешние, где внутренние по-прежнему делятся на протоколы расстояний и векторные протоколы связи, тогда как внешние появляются только в виде протокола маршрутизации, называемого: path-vector. Все эти типы протоколов используются для выполнения таких функций, как: поиск новых маршрутов, передача информации о найденных маршрутах другим маршрутизаторам или отправка пакетов с помощью маршрутизаторов. В таблице 1.3 представлены преимущества и недостатки статической маршрутизации.

Таблица 1.3 - Преимущества и недостатки статической маршрутизации.

Преимущества	Недостатки
<ol style="list-style-type: none"> 1. Маршрутизатор каждый раз передает пакеты через predetermined интерфейсы без необходимости рассчитывать маршруты, что сокращает циклы процессора и памяти. 2. Статическая информация не подвергается деформации, вызванной потерей динамической маршрутизации на соседних маршрутизаторах. 3. Для небольших сетей не нужно иметь технологически продвинутых и сложно оснащенных расширенных маршрутизаторов. 4. Обеспечивает настройку маршрутов по умолчанию, называемых шлюзом последней инстанции. Если маршрутизатор определяет, что ни одна позиция в таблице маршрутизации не совпадает с местом назначения целевой сети, он использует статическую запись, которая будет возвращать пакет в другое место в сети. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется большая работа от администратора в начале настройки сети, 2. Он не в состоянии реагировать на сбои отдельных маршрутов.

Внутренние протоколы. Первым типом внутренних протоколов является протокол вектора расстояния. В решениях, основанных на векторе расстояния (известном также как алгоритмы Bellman-Ford), расстояние и направление, вектор, представляются любому соединению во внутренней сети. В таблице 1.4 представлены преимущества и недостатки протокола векторной маршрутизации расстояний.

Таблица 1.4 - Преимущества и недостатки протокола векторов расстояния

Преимущества	Недостатки
1. Простота конфигурации 2. Они подходят для использования в небольшие сети.	1. Плохая конвергенция, то есть медленная реакция на изменения в топологии сети, например, отключение или включение определенных сегментов - разрыв связи отражается в таблицах маршрутизации отдельных маршрутизаторов только через некоторое время. 2. Генерация дополнительного сетевого трафика путем периодической трансляции полных таблиц маршрутизации даже при отсутствии изменений в топологии сети. 3. Отсутствие сопротивления созданию шлейфов между маршрутизаторами (как между прямыми соседями, так и между ширококвещательными шлейфами), что приводит к взаимной отправке пакетов с информацией об одной и той же сети.

Что касается векторных протоколов расстояний, то, как видно из таблицы 1.4, они достаточно плохо сконфигурированы со всей сетью и не имеют сопротивления

образованию циклов, где это является важным фактором при разработке моделей трафика. Однако, они имеют свои преимущества в виде простоты настройки этих протоколов. Приведем примеры протоколов векторного расстояния:

- RIP (Routing Information Protocol - Протокол маршрутизации информации) - наиболее часто используемый протокол IGP в Интернете. В протоколе RIP в качестве единственной метрики используется счетчик целей. Если несколько путей ведут к точке назначения, RIP выбирает тот, который имеет наименьшее количество хмеля. Однако, из-за использования счета целей в качестве единственной метрики в протоколе RIP, не всегда будет выбираться самый быстрый путь. Более того, RIP не может маршрутизировать пакеты на расстоянии более 15 целей.
- IGRP (Internal Gateway Routing Protocol - Протокол маршрутизации внутренних шлюзов) - этот протокол был создан специально для решения проблем маршрутизации в больших сетях, где покрытие таких протоколов, как RIP, более не является достаточным. Протокол IGRP выбирает самый быстрый доступный путь на основе пропускной способности, нагрузки, задержки и надежности. Он также характеризуется гораздо более высоким числом максимальных прыжков по сравнению с протоколом RIP. Протокол IGRP использует только классовую маршрутизацию.

Другим типом внутренних протоколов является протокол состояния соединения. Алгоритмы маршрутизации, основанные на соединениях, обычно называют "самым коротким первым путем" (SPF). В отличие от протоколов расстояния, они собирают и хранят информацию о стоимости отдельных путей по всей сети, а также о состоянии их соединения.

В протоколах состояния соединения маршрутизатор поддерживает полную топологическую базу данных сети с соответствующей стоимостью отдельных путей (рисунок 1.12)

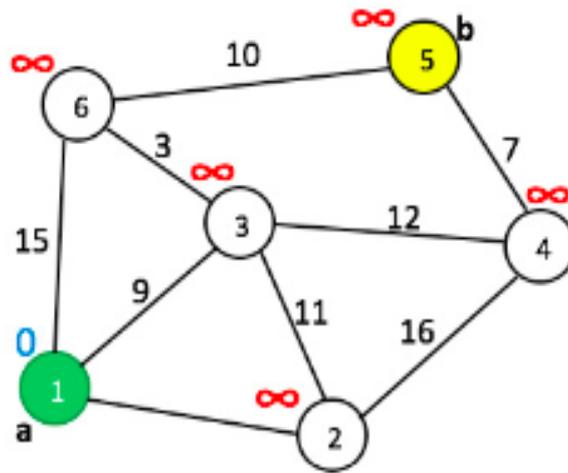


Рисунок 1.12 - Пример графика, показывающего работу протокола состояния соединения

Протокол работает на основе четырех этапов:

1. Каждый маршрутизатор отправляет информацию о своих подключенных сетях и их состоянии (включен или выключен).
2. Затем эти данные передаются от маршрутизатора к маршрутизатору, каждый промежуточный маршрутизатор записывает на себя копию LSA пакеты, но никогда не меняет их.
3. Через некоторое время (конвергенция) каждый маршрутизатор имеет идентичную топологическую базу данных (то есть сетевую карту) и на его основе создается дерево кратчайших путей первого (SPF) пути к отдельным сетям.
4. Маршрутизатор всегда помещается в центр (корень) этого дерева, и путь выбирается, исходя из стоимости достижение целевой сети - кратчайший маршрут не обязательно совпадает с маршрутом с наименьшим количеством прыжков. Для определения дерева кратчайших путей используется алгоритм Дейкстры [88].

Преимущества и недостатки связующего протокола маршрутизации приведены таблице 1.5

Таблица 1.5 - Преимущества и недостатки связующего протокола

Преимущества	Недостатки
<p>1. Реагирование на изменения в топологии сети. После изменения состояния соединения маршрутизатор генерирует новый LSA-пакет, который отправляется с маршрутизатора на маршрутизатор, и каждый маршрутизатор, получающий этот пакет, должен пересчитать кратчайшее дерево путей и обновить таблицу маршрутизации.</p> <p>2. Протокол "Silent" - не рассылает повторяющиеся объявления, а генерирует дополнительный трафик только при изменении состояния соединения. Благодаря своей работе и возможностям, протоколы состояния соединения предназначены для поддержки более крупных сетей.</p>	<p>1. Повышенный спрос на полосу пропускания на начальном этапе их работы (до "молчания"), когда маршрутизаторы посылают LSA-пакеты между собой. Указанное снижение эффективности является временным, но, к сожалению, сильно ощущается.</p> <p>2. В связи со сложностью вычислений дерева SPF, протоколы увеличили требования к процессору и оперативной памяти маршрутизатора</p> <p>3. Маршрутизаторы, настроенные для работы, относительно дороги.</p> <p>4. Типичным представителем этой группы протоколов является OSPF (Open Shortest Path First).</p>

Принимая во внимание представленные выше преимущества и недостатки, можно утверждать, что наиболее благоприятным протоколом для создания транспортной сети является протокол состояния соединения. Протокол способен реагировать в реальном времени на изменения в сетевых предположениях путем создания новых пакетов данных. Приведем примеры протоколов со статусом соединения.

- OSPF — это протокол маршрутизации на основе состояния канала связи, разработанный в 1988 году Целевой группой инженеров Интернета (IETF). Он был разработан для нужд крупномасштабных межсетей, для которых протокол RIP более не является достаточным.
- Протокол IS-IS (Intermediate System-to-Intermediate System - Промежуточная система) представляет собой протокол маршрутизации состояния канала связи, используемый маршрутными протоколами, отличными от протокола IP. Интегрированный протокол IS-IS является расширенной реализацией протокола IS-IS, который поддерживает различные маршрутные протоколы, включая протокол IP.
- Последней формой динамической маршрутизации из внутренних протоколов является протокол EIDRP, который является расширенным векторным протоколом расстояний, который также использует некоторые функции протокола состояния соединения. По этой причине протокол EIGRP называется гибридным протоколом маршрутизации. Благодаря такой комбинации он характеризуется отличной производительностью (быстрая конвергенция и низкие накладные расходы на пропускную способность). Протокол использует систему DUAL FSM (Diffused Update Algorithm Finite State Machine) для пересчета маршрутов. Используется в сетях не более 50 маршрутизаторов. Имеет плоскую сетевую структуру с разделением на автономные системы. Для транспортировки пакетов использует надежные протоколы транспортного протокола.

Внешние протоколы - маршрутизация с использованием патч-вектора.

Маршрутизаторы, предназначенные для связи с другими автономными системами, называются внешними (краевыми) маршрутизаторами. Этим типом протоколов является EGP (Exterior Gateway Protocol - Протокол внешнего шлюза), что означает, что маршрутизатор может согласиться с другим маршрутизатором (не обязательно в непосредственной близости), что они будут обмениваться маршрутной информацией.

Кроме того, протокол через определенные промежутки времени проверяет, функционирует ли сеть и возникали ли проблемы со связью с другими маршрутизаторами. Соседи обмениваются между собой сообщениями, позволяющими обновлять таблицы маршрутизации. Примером работы этого протокола является BGP (Border Gateway Protocol). BGP предполагает наличие необходимой информации о маршрутизации между автономными системами, благодаря чему выбор зацикленного пути полностью исключается. В отличие от протоколов IGP, таких как RIP или OSPF, в этом протоколе не используются такие метрики, как: количество «прыжков» и задержка. Вместо этого, он принимает решения о маршрутизации на основе разработанных правил сети.

1.3.2 Применение методов информационной маршрутизации в транспортной логистике

Анализ протоколов информационной маршрутизации (в информационных сетях) позволил транспортным компаниям провести аналогию с созданием расписаний и планированием маршрутов в транспортной логистике. Так, например, на основе этого предположения было проведено исследование фирм Rekersbrink, Makuschewitz и Scholz-Reiter. На данных предприятиях провели исследование по использованию протокола на основе маршрутов, описывая его как DLRP (Distributed Logistics Routing Protocol). Внедрение концепции распределенной маршрутизации было направлено на настройку соответствующего соответствия «пакетов» (транспортных средств) и постоянное реагирование на изменения, связанные с динамическим принятием решений при управлении трафиком. Такая концепция способна справиться с достаточно большими сетями без единого центра распределения и работы транспортных средств. Фактические сценарии транспортных процессов требуют постоянного контроля перемещаемых объектов.

В городе поток таких объектов, как транспортные средства, изменяется очень динамично. Поэтому статичные сценарии невозможно достоверно формировать, учитывая тот факт, что заказы на транспортные услуги постоянно меняются.

Протокол DLRP подходит к решению динамической задачи и работает следующим образом. После получения некоторой информации, являющейся предложением вместе с соответствующими дополнительными сообщениями, протокол в режиме реального времени решает вопрос о дальнейшем ходе маршрута (например, маршрут с максимальным ожидаемым использованием). Этот маршрут затем планируется для соседних вершин (рисунок 1.13- объявление маршрута).

Целевой структурой в этой ситуации является кооперативная структура. Различные объекты транспортной сети не планируют свои маршруты одновременно с другими.

«Пакеты» в этом решении всегда появляются или завершают свое движение в месте назначения. Каждый раз имеется достаточно информации о каждом решении по маршруту.

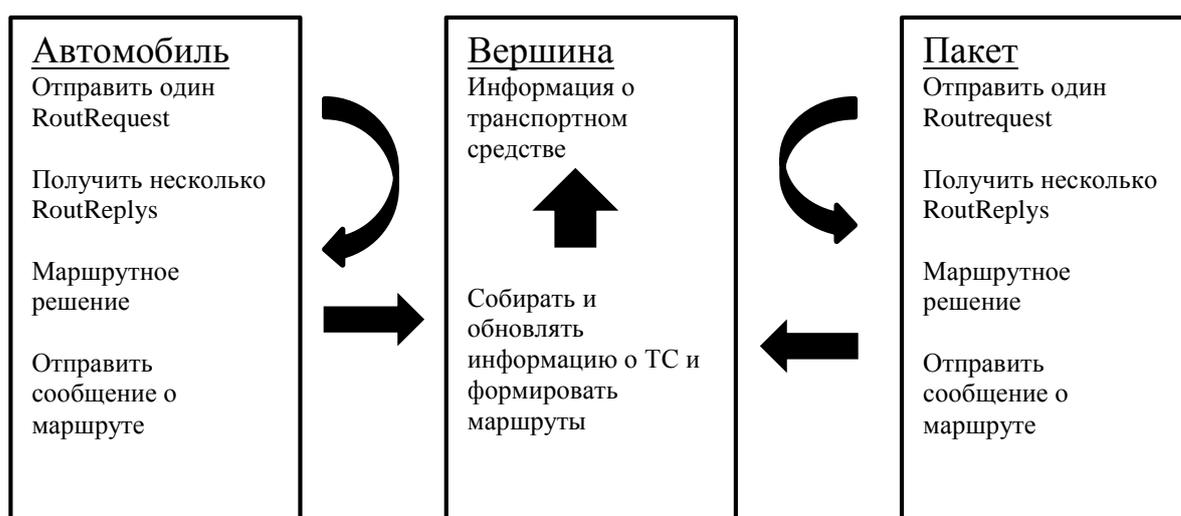


Рисунок 1.13 – Технология обновления данных в маршрутной сети

Вся концепция протокола DLRP предлагает уникальные преимущества:

- самосовершенствование,
- ручное изменение маршрутов и предположений,
- оценка будущих условий движения,
- знание неопределенных негативных факторов,
- предписывающие процессы принятия решений,
- любой вид и объем информации.

В протоколе DLRP маршруты никогда не заканчиваются. По этой причине практически невозможно найти точку, в которой транспортное средство заканчивает свою работу по ограниченному сценарию. Поскольку протокол DLRP является методом управления, его основные преимущества указывают на создание динамических сценариев, близких к реальности. Исследования показывают, что DLRP обладает большим потенциалом.

В приведенной на рисунке 1.14 схема, развернутого маршрута с применением DLRP и внесением изменений в процессе работы протокола.

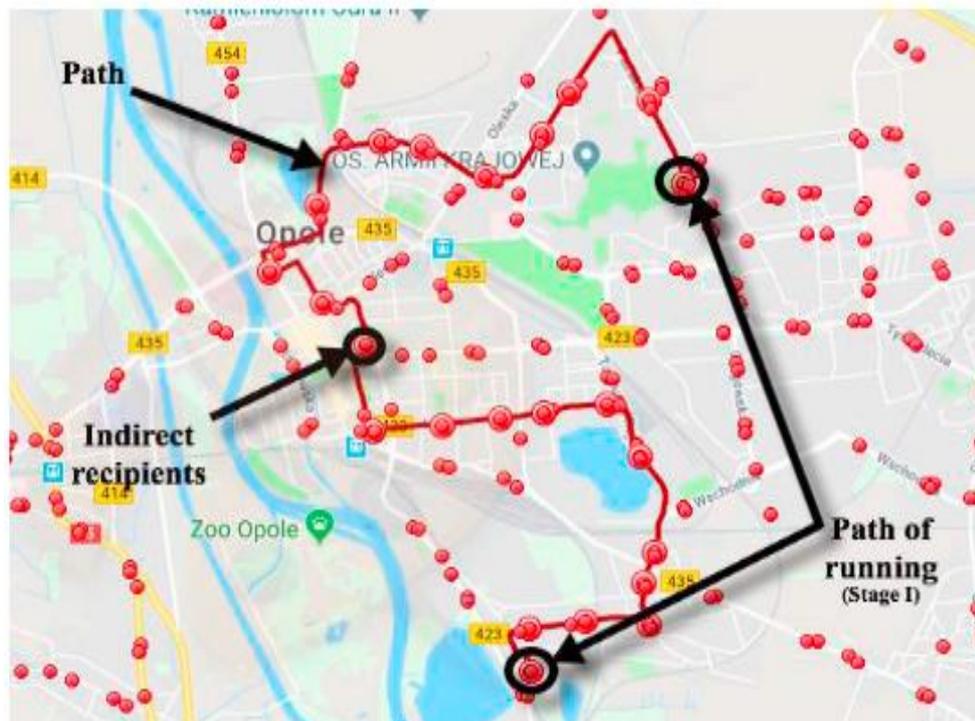


Рисунок 1.14 - Пример развертывания метода маршрутизации для города

Спрос на методы оптимизации маршрутов, способных реагировать на изменения внешней среды в режиме реального времени, становится все более высоким. Возрастающие проблемы, связанные с развитием городов, эффективно затрудняют работу субъектов, занимающихся планированием маршрутов в городах. При построении задач оптимизации учитываются множество критериев составляющих: время в пути время ПРР; расстояние перевозки; стоимость доставки; инфраструктурные ограничения маршрута и др. Данные требования может удовлетворять методы и модели оптимизации способные к:

- самосовершенствование;
- ручное изменение маршрутов и предположений;
- оценка будущих условий движения;
- неопределенное знание негативных факторов, предписывающие процессы принятия решений;
- любой вид и объем информации.

Выводы по первой главе

Развитие транспортной инфраструктуры автомобильной отрасли в РФ требует создания комплексной системы транспортного планирования. Состав задач СТП должен войти новый комплекс математических моделей, обеспечивающий оптимальное прогнозирование объема перевозок и распределения топологии грузовых и перевозок, то есть новая эффективная система транспортного моделирования и планирования. При формировании любой новой системы, основанной на математическом моделировании исследуемых процессов, важно знать информационное состояние внутренней и внешней среды исследования. Это необходимо для выбора методологии математического моделирования, определяющей условиями поставленной задачи (детерминированная задача, стохастическая или задача, решаемая в условиях неопределенности)

Установлено, что исследуемые процессы оперативно-производственного планирования работы ТС происходят в динамически изменяющихся условиях среды взаимоотношений «потребитель-перевозчик», при этом понятие объект управления переносится с транспортного потока на отдельное транспортное средство, отдельную партию груза или отдельного пассажира. То есть можно утверждать, что процесс управления требует объектно-ориентированных моделей управления в транспортной сети, формирующих оптимальные траектории перемещения отдельных объектов.

Современные подходы в области организации процессов обмена информации имеют, как правило, клиент-серверную архитектуру, а в качестве серверного ПО применяются системы управления базами данных (СУБД), основанных на реляционных принципах. Реляционный принцип управления реализует предметно-ориентированный подход (ПОП), когда средствами взаимодействия в системе являются хранимые процедуры в виде таблиц. То есть управление осуществляется по накопленным статистическим данным, носящим стохастический характер. Основным недостатком данного подхода является то, что при увеличении сложности системы невозможно достоверно оценивать процедуры управления при динамических изменениях в системе.

Задача маршрутизации становится особенно актуальной при многовариантности и многоаспектности (многокритериальности) распределения грузовых потоков в динамически изменяющихся условиях внешней среды. В этом случае задача оптимальной маршрутизации может быть решена только на основе разработки специализированного математического аппарата, как аналитического инструмента принятия эффективных решений ПО на его основе. Особенно интересно, что для решения данной задачи в зарубежной практике используются методы планирования маршрутов информационных потоков в информационно-коммуникационных сетях, а термин «маршрутизация» изначально относится к набору элементов для планирования маршрута и передачи пакетов данных по Интернету и соединенные между собой через маршрутизатор.

Поэтому можно утверждать, что востребованная практикой задача оптимизации процессов маршрутизации в динамически изменяющемся состоянии внешней среды представляет собой проблему, требующую решения не на инженерном уровне, а приложения новых научных знаний в области. Настоящим диссертационным исследованием должна быть обеспечена разработка методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок, позволяющей системно с учётом многокритериальной среды эксплуатации управлять коммерческой эксплуатацией подвижного состава грузовых автотранспортных предприятий.

2 РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МАРШРУТОВ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

2.1 Методология поиска оптимальных решений в гетерогенных динамических автотранспортных системах

В первой главе было определено, что активное внедрение информационно-коммуникативных (цифровых) технологий в современную практику проектирования транспортно-логистических систем требует развития теоретических основ формирования оптимизационных математических моделей и программного обеспечения (ПО) на их основе, позволяющих определять все компоненты и их эффективность в сложных гетерогенных динамических транспортных системах (ГДТС). При этом необходимы аналитические инструменты для выполнения обработки больших объемов данных: аналитические аналоги нейронных сетей, алгоритмы искусственного интеллекта, и т. п.

Так как ГДТС является сложной системой, определяемой большой совокупностью формализованных показателей (базы данных), то для поиска эффективных решений необходимо учитывать большое количество критериев, как обязательных признаков эффективности. Получение достоверных решений в многокритериальных информационных ситуациях всегда вызывает затруднения, носящие объективный характер.

В первой главе установлено, что современные математические модели поиска эффективных решений в ГДТС искусственно сводят многокритериальные информационные ситуации к однокритериальным категориям. Данный подход имеет принципиальный недостаток - полученное решение может оказаться приемлемым, но не объективным результатом. Поэтому необходима разработка математических моделей решения многокритериальных задач, применимых к решению задач в ГДТС, позволяющих оперировать в среде больших баз данных в условиях неопределённости внешней среды.

Достигнутый уровень организационного и технологического развития в транспортных системах, преобразующих их в ГДТС, требует привлечения к управлению ими теории сложных систем. Особенно важно поскольку уровень сложности взаимодействия элементов в исследуемых и проектируемых системах все время возрастает и это требует разработки новых методов обработки и анализа данных в больших объемах. Современная практика управления в ГДТС требует учета огромного количества факторов, в том числе и носящих когнитивный характер. Нередко решение данных задач находятся вне рамок общей теории систем и необходимо находить компромисс между сложностью системы и простой моделью.

Решение любой оптимизационной задачи, направленной на определение оптимального варианта действий в системе, как правило, начинают с выбора критерия или критериев эффективности. Это важный этап, так как неправильный выбор параметров эффективности может привести к выработке совершенно необъективных, а, следовательно, не эффективных решений в ГДТС. Однако на практике при решении системных задач в условиях многокритериальности, как правило, совершают принципиальную ошибку реализуя компромиссный подход: многокритериальные информационные ситуации, искусственно сводят однокритериальным. При этом понятие эффективности, являющееся сложной категорией, сводят к какой-либо единственной характеристике, подменяя при этом сложные объективные причинно-следственные связи в системе. Использование интегральных критериев для сравнительной оценки сложных организационных и технологических процессов характеризуется высокой долей субъективизма. В итоге, когда многокритериальная задача сводится к однокритериальной и оптимизация процессов управления в ГДТС ведётся по единственному критерию, решения могут оказаться приемлемыми, но не является объективным результатом.

При принятии решения о целесообразности применения того или иного метода оценки эффективности или метода определения эффективных действий в ГДТС необходимо определить к какому классу сложности относится исследуемая система и какой научное направление соответствует данному классу систем.

Этапной работой в области развития теории сложных систем (ТСС) считается исследование Hiroki Sayama [89], согласно данной работе ТСС объединяет целый ряд научных направлений, в том числе и общую теорию систем (ОТС) и является более общей в соответствии с классическими подходами системного анализа. Структура ТСС на рисунке 2.1 [89].



Рисунок 2.1 - Структура ТСС [89]

В соответствии со структурой ТСС в неё включаются элементы эмерджентизма [90], вопросы самоорганизации [91], теория игр, теория распределенных систем (системы массового обслуживания), теория коллективного поведения, теория нелинейной динамики, теория моделированием и ОТС. В нашем понимании в данной структуре ТСС отсутствует такой важный элемент, как теория «игр с природой», когда под природой понимается природа факторов поведения внешней среды исследования [92]. Между тем необходимость включения теории игр с природой в ТСС вполне объяснима тем, что именно это направление исследует надежность и восприимчивость сложной системы к проявлениям внешней среды, а сам автор Hiroki Sayama дает характеристику модели сложной системы, как восприимчивой, валидной и надежной и отмечает, что именно данные важные характеристики отсутствуют в классической ОТС [89].

ГДТС, являясь сложной системой относится к классу динамических систем. Теория динамических систем (ТДС) сегодня занимает особое место в ТСС исходя из её определения. ТДС – это система, состояние которой определяется набором predetermined законов целенаправленного изменения параметров системы. [92]. На рисунке 2.2 приведена структура сложных систем, признаками которых обладает ГДТС [93].

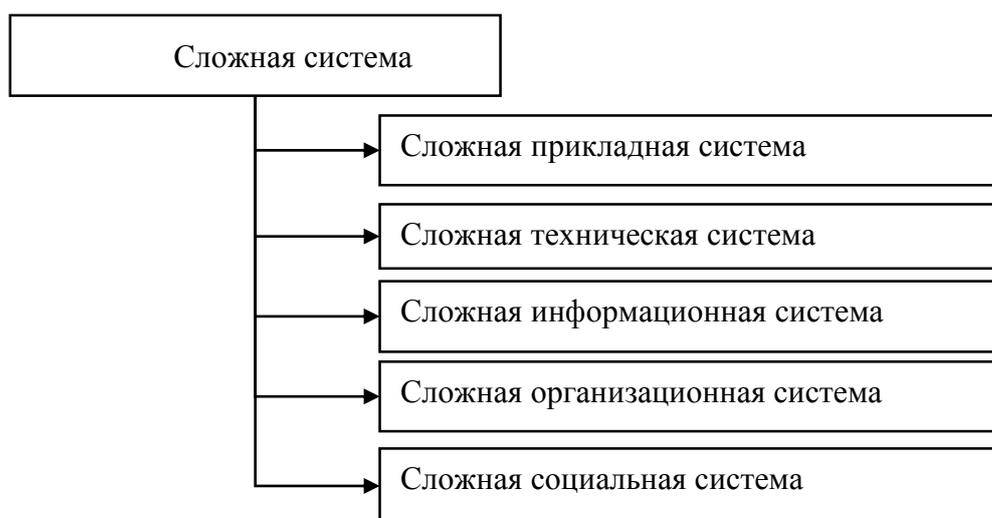


Рисунок 2.2 - Примерная структура сложных систем [93]

Как видно из рисунка 2.2, ГДТС обладает всеми обязательными признаками для характерными для любой сложной системы такими как большое количество связей и элементов и относятся к сложным по всем критериям ОТС и ТСС [94,95,96]. Как любая сложная система ГДТС требует умения обработки «больших данных» [97], определяемого наличием большого информационного объема самой обрабатываемых данных. Поэтому при формировании модели и методов оптимизации в ГДТС необходимо:

- Формализовать сложность ГДТС, опираясь на информационные состояния системы, которые, в свою очередь, определяются возможными внутренними и внешними возмущениями.

- Выбрать критерии делимости ГДТС, учитывающие гетерогенность элементов системы.
- Разработать инструменты управления и оптимизации функционирования в ГДТС с учётом потенциальных возможностей существующих методов теории принятия решений.

Следует отметить, что чем сложнее структура взаимодействия между объектом и субъектом управления, тем более сложные модели управления требуются для их описания. [98,99,100].

В случае, когда параметры, задающие состояние системы, имеют одинаковую физическую природу (например, прибыль), наиболее распространенным способом устранения многокритериальной неопределенности является линейная свертка, при этом необходимо лицо, принимающее решение (ЛПР), определяющее только коэффициенты важности критериев.

Но в случае, когда параметры системы имеют разную физическую природу, выбор способа их свертки становится менее однозначным и модель свертки не всегда дает объективный результат, необходимый для принятия управленческого решения.

Исследуемая ГДТС вместе с иерархией принятия решений может рассматриваться как единая социально-техническая система, в которой физическая природа факторов разнообразна по своим качественным характеристикам, а их количественные значения не подчиняются классическим законам распределения случайных величин. В этом случае активную роль приобретает элементы интеллектуального управления, создание которых требует привлечения специализированного математического аппарата: моделей нечеткой логики, теории игр или теории игр с природой факторов.

Данный подход требует от аналитического аппарата способности принимать правильные решения в условиях неполной и нечеткой информации. Исследование систем, работающих в условиях недостаточности информации, в сторону практических применений привело к постановке целого ряда задач:

- новые архитектуры компьютеров;
- новой элементной базы;
- новых инструментальных средства разработки ПО;
- новых инженерных методы расчета в системах управления, и т. п.

Следует подчеркнуть, «нечеткая» логика – это первая попытка проблем интеллектуального управления на основе построения конструктивной математической модели, адекватно описывающей все стороны исследуемого процесса или явления. Когда решение проблем принятия решений не должно сводиться к априорной информации и данным, полученных от экспертов для определения состава показателей качества и выбора наилучшей альтернативы из возможных. В этом случае необходимо строить модели, формализующие указанные этапы, и их можно условно называть моделями оптимизации или принятия решений. Отметим, что такие модели зачастую оказываются весьма сложными и требуют использования глубоких, современных математических методов для своей реализации.

2.2 Концепция решения многокритериальных задач, удовлетворяющих динамическим условиям работы транспортно-логистических систем

Так как зависимости между целевой функцией и исследуемыми параметрами оперативного управления перевозками достаточно сложны и многообразны, целесообразно применять аналитические (численные) решения многокритериальных задач с применением ЭВМ. В данном пункте исследования мы рассмотрим некоторые методы получения множества эффективных планов (множества Парето), в том числе и методы, позволяющие решать многокритериальные задачи аналитическими методами. В основе данных методов лежат алгоритмы получения значений весовых коэффициентов показателей (ВКП) исследуемых параметров в многокритериальной задаче. Возможны различные

варианты к их определению. Основными из них считаются: статистический, стоимостной, аналитический и эвристический.

Статистические методы нахождения ВКП могут быть применены при достаточно большом опыте наработок в процессе управления в сложных ГДТС. В основе этих методов лежит предположение о том, что для любого показателя (x_j) всегда существует конкурирующий с ним (x'_j), взаимосвязь определяется соотношением:

$$x_j \neq x_{j\text{эт}}, \quad (2.1)$$

При

$$x'_j = x'_{j\text{эт}}, \quad (2.2)$$

где $x_{j\text{эт}}$ и $x'_{j\text{эт}}$ - наилучшие из возможных (эталонных) значений j -го показателя.

Приближение значений каждого из возможных показателей к эталону будет тем большим, чем важнее в среднем показатели. Так среднее значение приближения к эталону может рассматриваться как оценка важности.

Если функция $f(x_j/x_{j\text{эт}})$ показывает степень приближения значения j -го показателя к эталону, то можно считать:

$$\psi_j = \Theta[f(x_j/x_{j\text{эт}})]. \quad (2.3)$$

Это значение вычисляется как среднее арифметическое при обработке достаточно большого количества вариантов статистических данных.

К аналитическим относятся методы, для которых не требуется никакой дополнительной информации к тому, что содержится в самих значениях показателей и допустимых областях их применения. Так, например, метод эквивалентных отношений основан на определении изменения обобщённого

показателя оцениваемого варианта (выраженного в процентах) в зависимости от увеличения единичных показателей на один процент.

К сожалению, как уже отмечалось выше, в настоящее время в исследованиях посвященных оптимизации процессов управления, доминируют эвристические методы, к которым относят все методы, полученные с учётом мнения специалистов (экспертов). Создан целый ряд рациональных процедур, с помощью которых математической обработке подвергается материал эвристического происхождения, при этом возможны различные подходы при определении весовых коэффициентов. Рассмотрим наиболее распространённые из них.

Первый случай. Эксперты только ранжируют показатели по важности. Каждый эксперт упорядочивает все показатели по их относительной важности, начиная с менее важного, которому приписывают ранг $\tilde{\psi}_j = 1$, следующему за ним - $\tilde{\psi}_j = 2$, и т. д. Весовой коэффициент j -го показателя определяется по результату ранжирования h экспертов следующим образом:

$$\psi_j = \frac{\sum_{t=1}^h \tilde{\psi}_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^h \tilde{\psi}_{ij}}. \quad (2.4)$$

где $\tilde{\psi}_{ij}$ – ранг приписанный t -ым экспертом j -му показателю.

Такая «**грубая процедура**» предполагает равные расстояния на шкале относительных ценностей и приводит к значительному субъективизму принятых решений.

Второй случай. Производится операция ранжирования аналогично первому случаю. Предполагается, что кроме ранжирования эксперты оценивают важность показателей количественно, приписав показателям численную бальную оценку. В результате получается возрастающий ряд чисел P_j . Тогда весовые коэффициенты могут быть определены из выражений:

$$\bar{P}_{jt} = \frac{P_{jt}}{\sum_{j=1}^m P_{jt}} \quad (2.5)$$

$$\bar{\psi}_j = \frac{\sum_{t=1}^h \bar{P}_{jt}}{h}. \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^m \psi_j = 1 \quad (2.7)$$

то есть значения весовых коэффициентов находятся в результате нормирования оценок и усреднения мнений экспертов для устранения субъективности отдельных из них.

Третий случай. Производятся операции в соответствии с первым и вторым случаем, а затем сделанные оценки уточняются по принципу сравнения j -го показателя с группой других показателей. В зависимости от результата сравнения его оценка увеличивается или уменьшается. Затем второй по важности показатель и его оценка сравниваются с суммой оценок нижестоящих по важности показателей. Производится уточнение оценки второго показателя. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут скорректированы оценки всех показателей (кроме последнего). Зафиксировав «веса» всех показателей, производится их нормирование:

$$\bar{\psi}_j = \frac{\psi_j}{\sum_{j=1}^m \psi_j}, \quad \sum_{j=1}^m \bar{\psi}_j = 1 \quad (2.8)$$

Все перечисленные эвристические методы получения управляющего помимо основного недостатка – **наличия значительной степени субъективизма, объяснимого человеческим фактором**, располагают ещё одним – **невозможностью алгоритмизировать решение и реализовать его в программном обеспечении (ПО)**. Поэтому для достижения целей исследования обоснованно можно применять только методы получения Парето-эффективных решений. Ниже рассмотрим еще графоаналитический метод нахождения множества эффективных планов для задачи линейного программирования с одним ограничительным условием и тремя критериями эффективности.

Далее используя графоаналитический аппарат определения множества вероятностей эффективных решений для задачи линейного программирования, можно получить подмножества доминирования отдельных действий в количественных оценках [101].

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \sum_{j=1}^n a_{1j}x_j \rightarrow \max(\min) \\ k_2 &= \sum_{j=1}^n a_{2j}x_j \rightarrow \max(\min) \\ k_3 &= \sum_{j=1}^n a_{3j}x_j \rightarrow \max(\min) \\ \sum_{j=1}^n x_j &= N, x_j \geq 0, j = \overline{1, n} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Для наглядности приведем решение для числового примера воспользовавшись данными таблицы. Приведем условную матрицу эффективностей:

$$\|A\| = \begin{pmatrix} 0,21 & 0,23 & 0,21 \\ 0,66 & 0,19 & 0,34 \\ 0,18 & 0,80 & 0,26 \\ 0,84 & 0,03 & 0,46 \end{pmatrix}$$

В данном случае $m = 4$, $n = 3$, а эффективность решения определена элементами матрицы $A - a_{ij}$ где $i = \overline{1, m}$ – варианты решений, $j = \overline{1, n}$ – критерии эффективности.

Тогда вероятность проявления j – го эффекта при i – ом решении определяется из условия.

$$\sum_{j=1}^n P_j = 1, P_j \geq 0 \quad (2.10)$$

Естественно, что все решения системы (2.3) расположены в треугольнике (P_1OP_2) , а также на границах этого треугольника – $[P_1O]$, $[OP_2]$ и $[P_1P_2]$, если рассматривать решение в системе декартовых координат (рисунок 2.3).

Оси координат: вероятность P_1 ; вероятность P_2 .

Тогда из треугольника (P_1OP_2) можно определить P_3 :

$$P_3 = 1 - (P_1 + P_2) \quad (2.11)$$

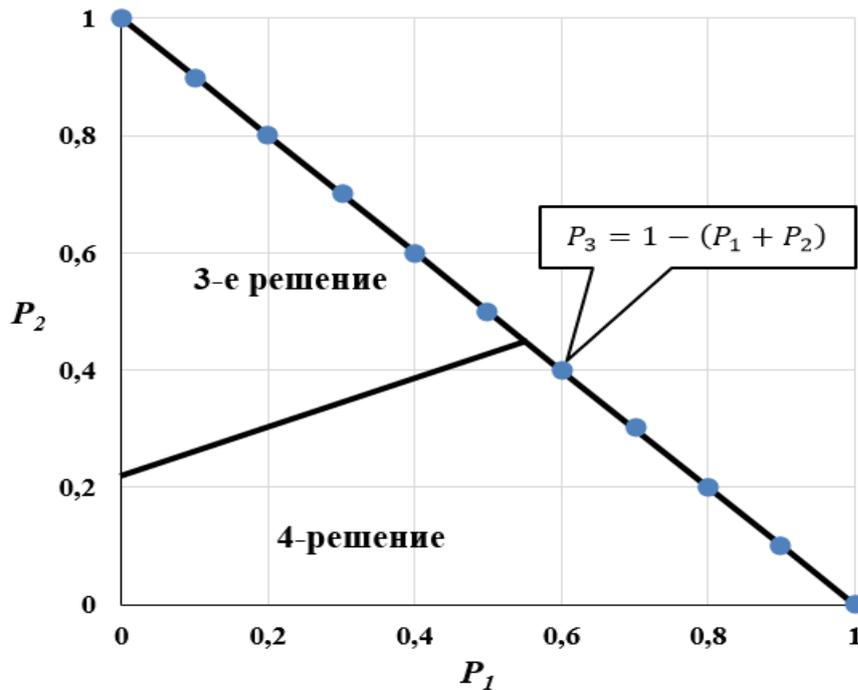


Рисунок 2.3 – Решение условного примера

Рассмотрим решение задачи на максимум: Участок, на котором доминирует второе действие очень незначителен. Значения эффективности, получаемые при использовании этого участка, практически не отличаются от получаемой при использовании четвёртого решения. Поэтому второе решение мы исключаем, а участок его решений объединяем с областью доминирования 4-го действия. Таким образом, доминирующими решениями являются 3-е и 4-е. Поле эффективных решений разбито всего на два подмножества, в котором граница равно эффективных решений легко определяется аналитически.

$$P_1 = 0,378 + 1,860 \cdot P_2 \quad (2.12)$$

Решение задачи на минимум: Участками доминирования являются первое и второе действие. Как и при решении задачи на максимум, в связи с тем участок доминирования второго действия незначителен, мы его объединяем с участком доминирования первого действия. Следовательно, единственным решением остаётся реализация первого действия. Графоаналитические решения данного примера можно агрегировать в иллюстрацию совокупности единственно-эффективных из всех возможных решений (рисунок 2.4).

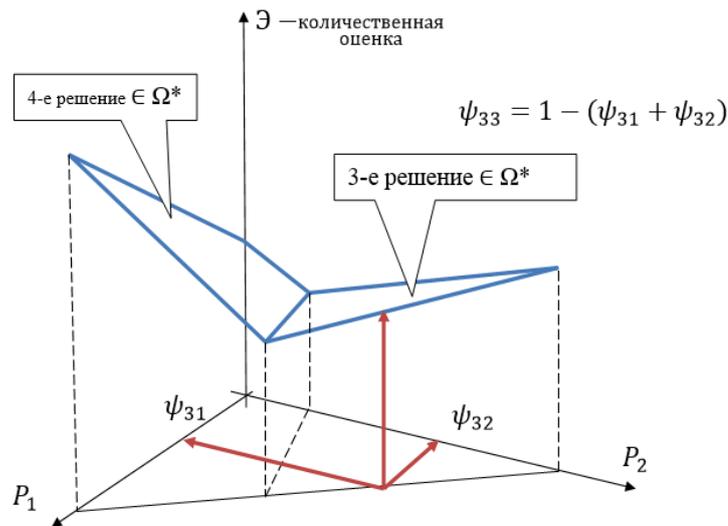


Рисунок 2.4 - Совокупность эффективных решений (решение задачи на максимум)

Таким образом, применение метода районирования позволяет распределить всё множество возможных решений на подмножества доминирования - эффективности отдельных действий. В данном случае решение многокритериальной задачи поиска Парето-оптимальных решений сводится к линейной задаче векторной оптимизации. Важным преимуществом данного подхода является:

- 1) удастся избежать недостатков эвристических методов получения с учётом мнения специалистов-экспертов определения весовых коэффициентов;
- 2) процедура получения ВКП полностью формализована, а, следовательно, легко реализуется в ПО, применимое для принятия решений в системе управления грузовыми автомобильными перевозками.

2.3 Математическое моделирование процедур принятия решений в социально-технических системах с учётом нечёткости исходной информации и теории принятия решений

Еще одним важным условием, предъявляемым к методам решения задач в ГДТС является необходимость работать с большим количеством «входов». Рассмотрим возможность обработки «больших данных», как инструментов, построенных на математических моделях не прогнозирования ситуации, но на моделях теории принятия решений. Примером данного подхода может являться широко используемый сегодня метод измерения формальной эффективности или анализа среды функционирования – Data Envelopment Analysis (DEA), основанный на построении границы эффективности [102, 103, 104]. Этот метод был предложен в 1978 году американскими учеными A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes [105], которые в свою очередь опирались на идеи M.J. Farrell [106]. Данный метод применяется для определения эффективности в социально-организационных системах для однородных объектов. Сущность метода заключается в определении расхождения между отношением результатов и производственных возможностей исследуемого объекта. Границы производственных возможностей, как правило неизвестны и их определение выполняется либо с помощью метода DEA, либо на основании эмпирических данных, включенных в выборку исследования [107].

Границы производственных возможностей показывают альтернативное (максимально возможное решение) при имеющихся ресурсах исследуемой системы. Метод DEA сегодня активно совершенствуется и развивается.

В настоящее время даже в терминологии метода нет точного соответствия понятием Data Envelopment Analysis и общепринятым русским эквивалентом. В [108] предлагается следующий вариант – «анализ среды функционирования», но в нашем понимании более подходящий термин – «анализ среды исследования», поскольку метод DEA может применяться в различных сферах деятельности и направлен на повышение их эффективности их систем функционирования, а значит

на исследование возможностей сложных систем. У данного метода есть ряд неоспоримых достоинств и преимуществ:

- 1) метод позволяет одновременно обрабатывать достаточно много «входов» и «выходов», при этом каждый из которых может определяться в различных единицах измерения;
- 2) метод может учитывать влияние внешней среды на рассматриваемую сложную систему, то есть переменные факторы, в частности, внешней среды;
- 3) метод не требует априорного определения коэффициентов относительной важности или весовых коэффициентов для переменных показателей, являющимися «входным» и «выходным» параметрам в задачах оптимизации;
- 4) метод позволяет не налагает ограничения на функциональную форму зависимостей между «выходами» и «входами»;
- 5) метод при необходимости позволяет учитывать предпочтения или приоритет, касающиеся значимости тех или иных входных или выходных параметров;
- 6) метод позволяет производить конкретную оценку необходимых изменений на входах и выходах, которые позволят приблизить неэффективные объекты исследования на определённую границу эффективности;
- 7) метод позволяет формировать Парето-оптимальное множество, которое соответствует эффективному состоянию объекта;
- 8) метод концентрируется на выявлении «best practice» с помощью объективных аналитических методов теории принятия решений, а не на субъективных прогнозных тенденциях «трендах», получаемых при применении методов регрессионного или корреляционного анализа.

Важным свойством метода является DEA возможность определения множества Парето или множества эффективных планов [109].

Недостатком метода является DEA процедура определения границ производственных возможностей объекта системы на основании эмпирических данных. Решение этой задачи лежит в области математического прогнозирования возможных максимально эффективных решений. Как правило, данная задача

является многокритериальной нелинейной многомерной задачей оптимизации, решаемой следующим образом.

Вводится параметр логарифмическая надёжность :0

$$P = \ln(P) \quad (2.14)$$

Определяется критерий оптимальности записать в линейной форме:

$$P_{\text{ср}} \frac{\sum_l (\sum_{\mu_1} P_k + \sum_{\mu_1} P_{ij})}{\ln \sum_{ij} r_{ij}} = \sum_l \beta_l x_l \quad (2.15)$$

где β_l – константы, определяющие структуру сети.

Для разрешения многокритериальной задачи в условиях стохастической неопределённости опять же строиться линейная свёртка критериев оптимизации, недостатки применения которой были рассмотрены выше:

$$J_j(x) = K_1 C(x) - K_2 P_{\text{ср}}(x) - K_3 P_3(x), \quad (2.16)$$

где K_1 , K_2 и K_3 - весовые коэффициенты.

Еще один метод решения задачи нелинейной – метод равномерного дискретного перебора значений минимальной надёжности в ограничениях с использованием решения линейной задачи, что достаточно трудоёмко для многомерных систем.

Решить данную задачу более эффективно возможно применяя аналитические методы определения значений, входящих в множество Парето, применяя методы линейного программирования, что было показано в предыдущем пункте.

В исследованиях [110,111,112,113] установлено, что при решении задач, связанных с неточной информацией, возможно применение методов линейного программирования на основе метода районирования по принципу соблюдения иерархического соотношения вероятностей возможных состояний внешней среды (СВС). Рассмотрим пример решения задачи с использованием метода районирования по принципу соблюдения иерархического соотношения вероятностей возможных СВС [114,115,116,117]:

Сформируем матрицу эффективностей возможных действий при различных состояниях СВС характеризуемую тремя основными понятиями:

- m – число действий;
- n – число критериев;
- E_{ij} – эффективность i -го действия для j -го критерия, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.

Матрица эффективностей при различных СВС имеет вид:

$$\|E_{ij}\| = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{m1} & E_{m2} & \dots & E_{mn} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Распределение коэффициентов относительной важности (КОВ) для отдельных критериев определяется ограничением:

$$0 \leq k_j \leq 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad \sum_{j=1}^n k_j = 1, \quad (2.18)$$

или

$$\sum_{j=1}^{n-1} k_j = 1. \quad (2.19)$$

Пусть значения КОВ подчиняются последовательности:

$$k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_j \geq \dots \geq k_{n-1} \geq k_n \quad (2.20)$$

При $n = 3$ поле распределений КОВ - прямоугольный треугольник с единичными катетами (рисунок 2.5),

а при $n = 4$ (рисунок 2.6) количество подмножеств, каждому из которых соответствует свое соотношение КОВ, равно $P_4 = 4! = 24$.

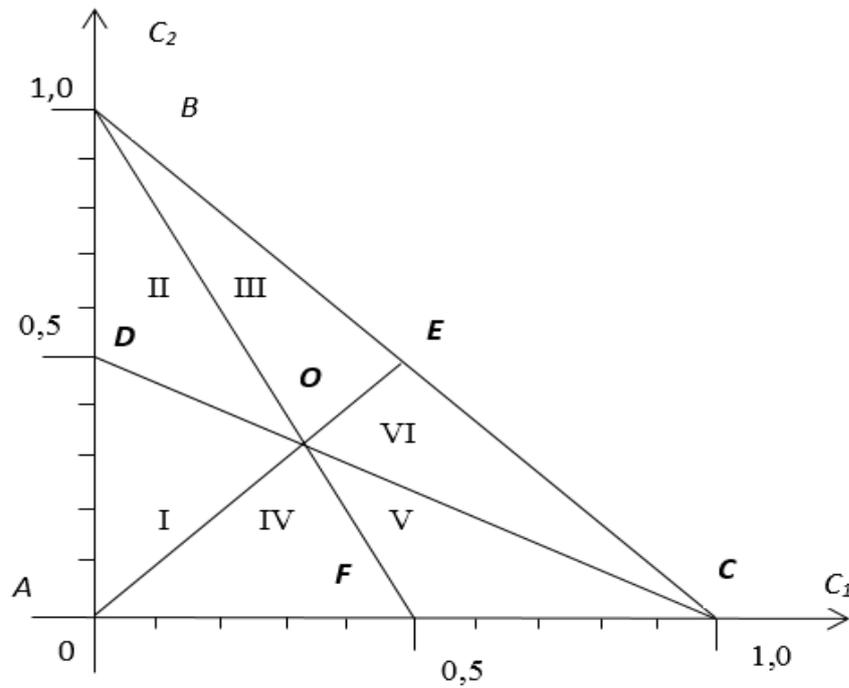


Рисунок 2.5 - Поле распределений - $k_j \in C$, $P_3 = 3! = 6$

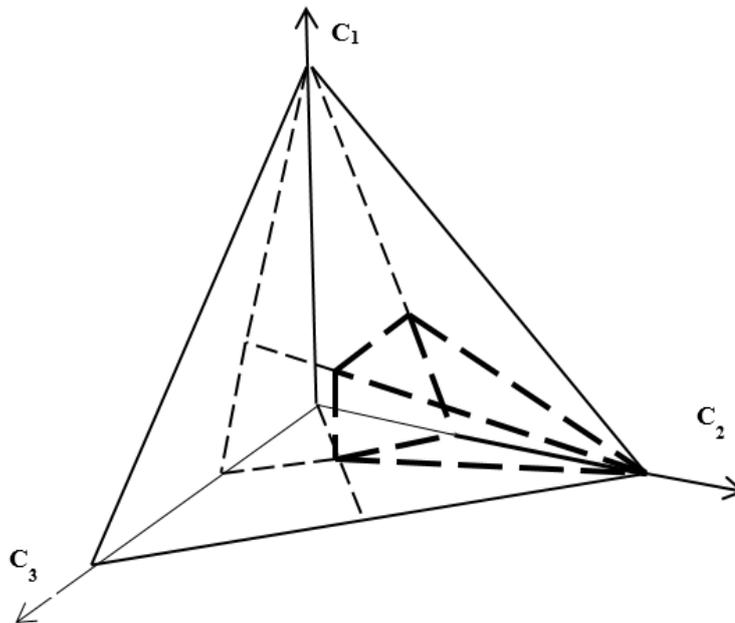


Рисунок 2.6 - Поле распределений - $k_j \in C$, $P_4 = 4! = 24$

Согласно рисунку 2.5 сформируем таблицу 2.1 и таблицу 2.2.

Таблица 2.1 - Уравнения сторон и медиан треугольника ABC

	Уравнения отрезков
AB	$k_2 + k_3 = 1; k_1 = 0$
AC	$k_1 + k_3 = 1; k_2 = 0$
BC	$k_1 + k_2 = 1; k_3 = 0$
AE	$k_1 = k_2; k_1 + k_2 + k_3 = 1$
BF	$k_1 = k_3; k_1 + k_2 + k_3 = 1$
CD	$k_2 = k_3; k_1 + k_2 + k_3 = 1$

Таблица 2.2 - Геометрическое поле распределения КОВ - k_j

Подмножество	Треугольник	Соотношение КОВ
I	AOD	$k_1 < k_2 < k_3$
II	DOB	$k_1 < k_3 < k_2$
III	BOE	$k_3 < k_1 < k_2$
IV	EOC	$k_3 < k_2 < k_1$
V	COF	$k_2 < k_3 < k_1$
VI	FOA	$k_2 < k_1 < k_3$

Из таблицы 2.2 видно, что все возможные решения для системы

$$0 \leq k_j \leq 1; k_3 \leq k_2 \leq k_1 \quad (2.21)$$

находятся в **подмножестве IV**.

Данный подход позволяет сформулировать алгоритм поиска максимального эффективного решения:

$$\begin{cases} D_i = \sum_{j=1}^n e_{ij} k_j \rightarrow \max, \\ \sum_{j=1}^n k_j = 1, 0 \leq k_j \leq 1, k_j \geq k_{j+1}, j = \overline{1, n-1} \end{cases} \quad (2.22)$$

где

$$k_j = \begin{cases} \frac{1}{c}, & \text{если } j = c \\ \frac{\lambda}{c}, & \text{если } j < c, \\ \frac{1-\lambda}{n-c}, & \text{если } j > c \end{cases} \quad \text{где } \lambda = \frac{n-1}{n}. \quad (2.23)$$

где индекс (c) определяется, как $c_j = \max_j e_{ij}$.

Интеграция в единую аналитическую платформу задачи динамического программирования и рассмотренного выше метода районирования по принципу иерархического соотношения между вероятностями позволит:

1. Определять формальную эффективность в ГДТС;
2. Выполнять обработку больших объемов данных ГДТС;
3. Выполнять анализ среды функционирования ГДТС с применением алгоритмов искусственного интеллекта неограниченному количеству критериев или признаков эффективности.

2.4 Методы динамического программирования в применении к дискретно-событийному характеру процессов в сложных транспортно-логистических системах

Активное внедрение информационно-коммуникативных или цифровых технологий в современную реальность функционирования транспортных систем позволяет одновременно обрабатывать достаточно много «входов» и «выходов» в ИТС, обеспечивая необходимый объем или «базу данных» параметров оптимизации. Поэтому необходимо активно развивать методы маршрутизации в дорожно-транспортных сетях (ДТС) в направлении возможной их реализации в программном обеспечении (ПО), «приложениях» и т. д.

Можно сказать, что до сих пор нет «наилучшего» решения проблемы объективного выбора маршрута из-за постоянного увеличения количества критериев эффективности. Причем в последнее время в качестве доминирующего критерия эффективности алгоритмов маршрутизации в ДТС используется критерий, связанный с необходимым объемом вычислительных процедур. Этот критерий определяет компромиссы в плане времени прохождения «запросов», предварительной обработки данных, использования дискового пространства, частоты запросов, а среди других — устойчивость при внесении изменений в

маршруты ДТС. То есть, если для более ранних алгоритмов решение проблемы выбора маршрута определялось фактором «расстояние», то теперь это больше не проблема — современные алгоритмы надежно находят точные решения при определении кратчайших маршрутов в ДТС. Актуальными вопросами в настоящее время являются:

- 1) насколько можно использовать в качестве объективной функции единственный критерий — затраты: кратчайшее расстояние и проекция этого критерия на комплексный показатель?
- 2) насколько рациональны применяемые алгоритмы маршрутной оптимизации с позиции объема вычислительных процедур?

Наиболее распространенным стандартным решением задачи маршрутизации является алгоритм Дейкстры, изобретенный нидерландским ученым Э. Дейкстрой в 1959 году и широко применяемый в ПО для формирования маршрутной транспортной сети [118, 119, 120]. С помощью данного алгоритма можно найти кратчайшее расстояние от одной из вершин графа расстояний до всех остальных. Развитию алгоритма и эффективному применению его на практике посвящено большое количество исследований за рубежом [120...127]. Кратко рассмотрим принцип его работы. На рисунке 2.7 обозначим номера вершин и их вес связей.

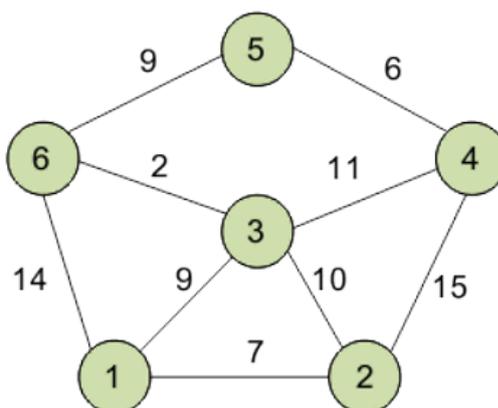


Рисунок 2.7 – Формирование системы

Обозначим минимальный вес связей (красная метка) при первом действии, как путь из вершины 1 (рисунок 2.8).

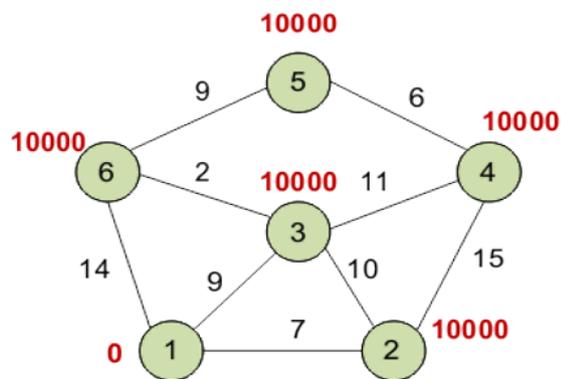


Рисунок 2.8 – Первое действие

Минимальную метку имеет вершина 1. Её соседями являются вершины 2, 3 и 6. Пересчитываем соседей по очереди и определяем кратчайшее расстояния до вершины и т. д.

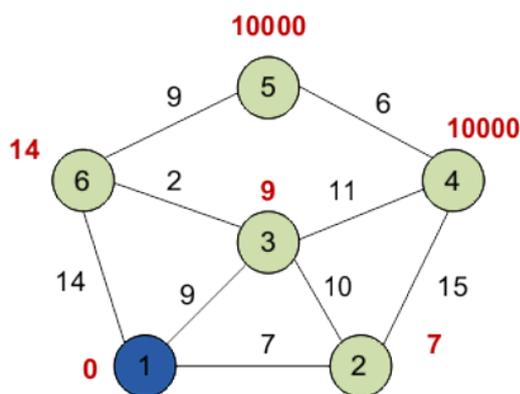


Рисунок 2.9 – Дальнейшие решения

Данный алгоритм легко реализуется в ПО, но имеет принципиальнейший недостаток – однокритериальный характер решаемой задачи. Вместе с развитием алгоритма *Дейкстры* осуществляется поиск альтернативный метод вычисления — это алгоритм Беллмана-Форда [128]. Он использует очередь без приоритетов. Основное его преимущество заключатся в том, что он работает циклами (динамически улучшая текущее состояние системы) - в каждом их циклов сканируя все вершины, расстояния которых были улучшены. Алгоритм Беллмана-Форда реализует управление в ГДТС (Ω) пошагово (дискретно) после определения эффективного решения и применения его в качестве одного из конечного числа возможных воздействий.

В общем виде дискретная управляемая ДТС для однокритериальной модели определяется как

$$\Omega = \{D; x_0; F; V(x), f(x, v), s(x, v)\}, \quad (2.23)$$

где D — множество возможных состояний ГДТС; F — множество состояний параметров ГДТС; $V(x)$ — множество управлений при выборе направления перемещения (вариантов действий в системе) — $(x \in D|F)$; $f(x, v)$ — функция переходов из состояния x при управлении v ; $s(x, v)$ — функция «потерь» на производство процессов перемещения.

Вычисление значений функции Беллмана по формуле (2.23) выполняется поэтапно и позволяет определенным образом упорядочить и существенно сократить перебор возможных вариантов маршрутов. Приведем пример решения задачи оптимизации перемещений в системе, основанный на алгоритме Беллмана (условие на рисунке 2.10).

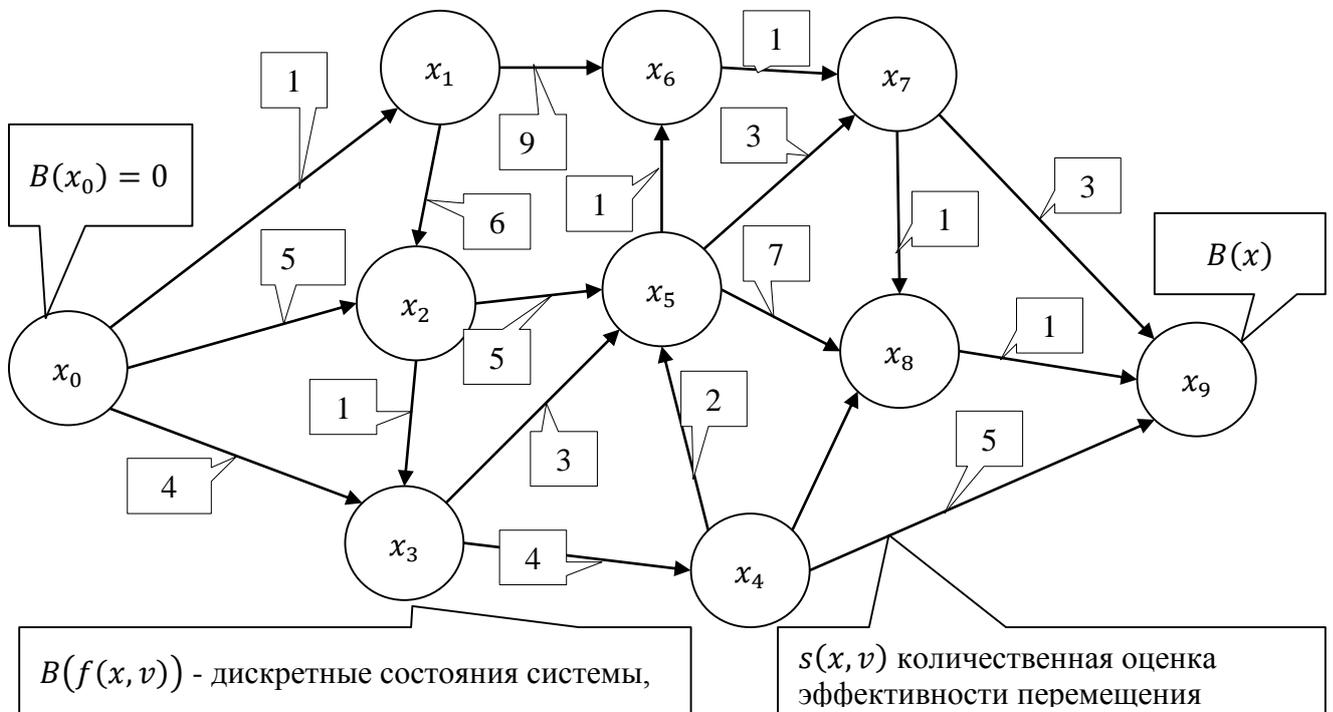


Рисунок - 2.10 Условный граф возможных маршрутов в ГДТС с дискретными состояниями (Ω)

Построение маршрута, основанного на принципе Беллмана:

$$B(x) = \min_{v \in V(x)} \{s(x, v) + B(f(x, v))\}, \quad (x \in D|F), \quad (2.24)$$

где $B(x)$ — функция $B(x)$ в предшествующем дискретном состоянии.

Для состояний системы Ω_1 (вершин графа $G(\Omega_1)$) вычисляем значения функции Беллмана. Фиксируем $B(9) = 0$. Далее, пользуясь формулой (2.24), последовательно получаем: минимальная из «стоимостей» полных траекторий равна 11. Основным недостатком применения методов ДП для реализации маршрутизации в ГДТС является то, что в качестве управляемого параметра принимается только один критерий. Реальная ГДТС, как правило, требует вычислений по нескольким критериям эффективности. При этом технология синтеза полных совокупностей эффективных оценок должна обеспечиваться определением частных эффективной оценок «Парето оптимального», что неизбежно приводит к росту количества вычислительных процедур. [129] (рисунок 2.11).

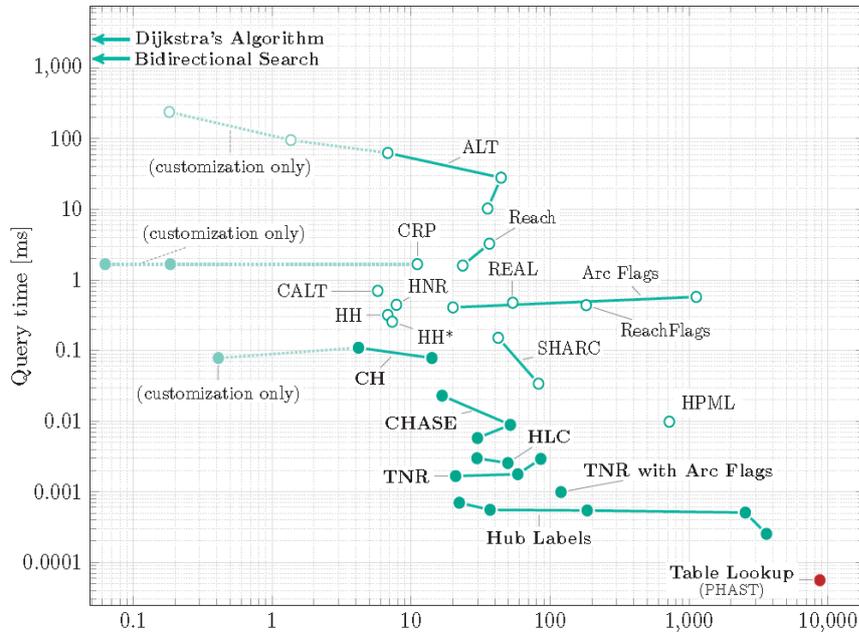


Рисунок 2.11 - Время предварительной обработки для алгоритмов на примере дорожной сети Западной Европы, с использованием в качестве граничных условий время в пути. Соединительные линии указывают на различные компромиссы для одного и того же алгоритма.

В таблице 2.3 приведены сведения о методах, содержащих поиск решения в ГДТС на основе множества Парето: две версии алгоритма Дейкстры, два иерархических метода на основе алгоритма Дейкстры (CRP и CH), три алгоритма, не основанные на графах (TNR, HL, HLC), и два комбинированных (CHASE и TNR+AF). Также в таблицу включены методика (Флаги Дуг) и алгоритм на основе сепараторов (CRP).

Данные алгоритмы проверялись в целях определения скорости вычислительных процедур [132]. Также в таблице приведены «Скорости» обработки данных различными методами на ГДТС Западной Европы.

Таблица 2.3 - Скорость обработки данных различными методами на ДТС Западной Европы

Алгоритм	Источник	Структуры данных	
		Объем данных	Время
		[GiB]	[ч: мин]
CRP	[131]	0,9	1:00
Флаги Дуг	[130]	0,6	0:20
CH	[131]	0,4	0:05
CHASE	[130]	0,6	0:30
HLC	[132]	1,8	0:50
TNR	[130]	2,5	0:20
TNR+AF	[134]	5,4	1:45
HL	[135]	18,8	0:37
HL- ∞	[133]	17,7	0:60

Значительно сократить количество вычислительных процедур можно, создав математические модели и алгоритмы получения множества Парето на математических моделях линейного программирования [113].

Выводы по второй главе

В целях повышения эффективности оперативно-производственного планирования перевозок навалочных грузов **разрабатывается концептуально новая** для РФ система маршрутизации перевозок. Алгоритмы управления в данной системе формируются в зависимости цели, которая стоит перед ДСУ и от характера поставленных задач.

Установлено, что ГДТС обладает всеми обязательными признаками характерными для любой сложной системы, такими как большое количество связей и элементов и относятся к сложным по всем критериям ОТС и ТСС. Данная требует умения обработки «больших данных», определяемого наличием большого информационного объема самой обрабатываемых данных, поэтому при формировании модели и методов оптимизации маршрутов в ГДТС необходимо:

- Формализовать сложность ГДТС, опираясь на информационные состояния системы, которые, в свою очередь, определяются возможными внутренними и внешними возмущениями.
- Определить критерии делимости ГДТС, предусматривающие гетерогенность элементов системы.
- Разработать инструменты управления и оптимизации функционирования в ГДТС с учётом потенциальных возможностей существующих методов теории принятия решений.

Определено, что применение методов теории принятия решений (метода районирования позволяет) позволяет достичь указанных задач, при этом:

- удастся избежать недостатков эвристических методов получения с учётом мнения специалистов-экспертов определения весовых коэффициентов;
- процедура получения ВКП полностью формализована, а, следовательно, легко реализуется в ПО.

Доказано, что необходимым инструментом маршрутизации перевозок является интеграция в единую аналитическую платформу задачи динамического

программирования и рассмотренного метода районирования по принципу иерархического соотношения между вероятностями, что позволит:

- определять формальную эффективность в ГДТС;
- выполнять обработку больших объемов данных ГДТС;
- выполнять анализ среды функционирования ГДТС с применением алгоритмов искусственного интеллекта неограниченному количеству критериев или признаков эффективности

Для создания методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок должна быть выполнена разработка оптимизационной аналитической модели объектно-ориентированного управления и алгоритмов на ее основе:

- Алгоритм и ПО решения задачи динамического программирования, реализующие принцип Беллмана, позволяющие определять оптимальную траекторию (маршрут) перемещения груза в ДТС.
- Алгоритм и ПО решения задачи определения Парето-оптимальных вариантов действий в случае многокритериальности в исследуемой ГДТС;
- Интеграция разработанных алгоритмов и ПО в единый программный комплекс;
- Апробация разработанного программного комплекса на локальной выборке данных перемещения заданного количества партий груза в ДТС при наличии нескольких перегрузочных комплексов и с учетом нескольких критериев эффективности.

3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ПРИ ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПЛАНИРОВАНИИ ПЕРЕВОЗОК В ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ

3.1 Разработка алгоритмов формирования оптимальных маршрутов в транспортно-логистических системах

3.1.1 Алгоритмизация задачи динамического программирования

Принципиально разработать алгоритмы и (ПО) задачи динамического программирования, основанного на принципе Беллмана, несложно. Алгоритм решения задачи динамического программирования приведен на рисунке 3.1.

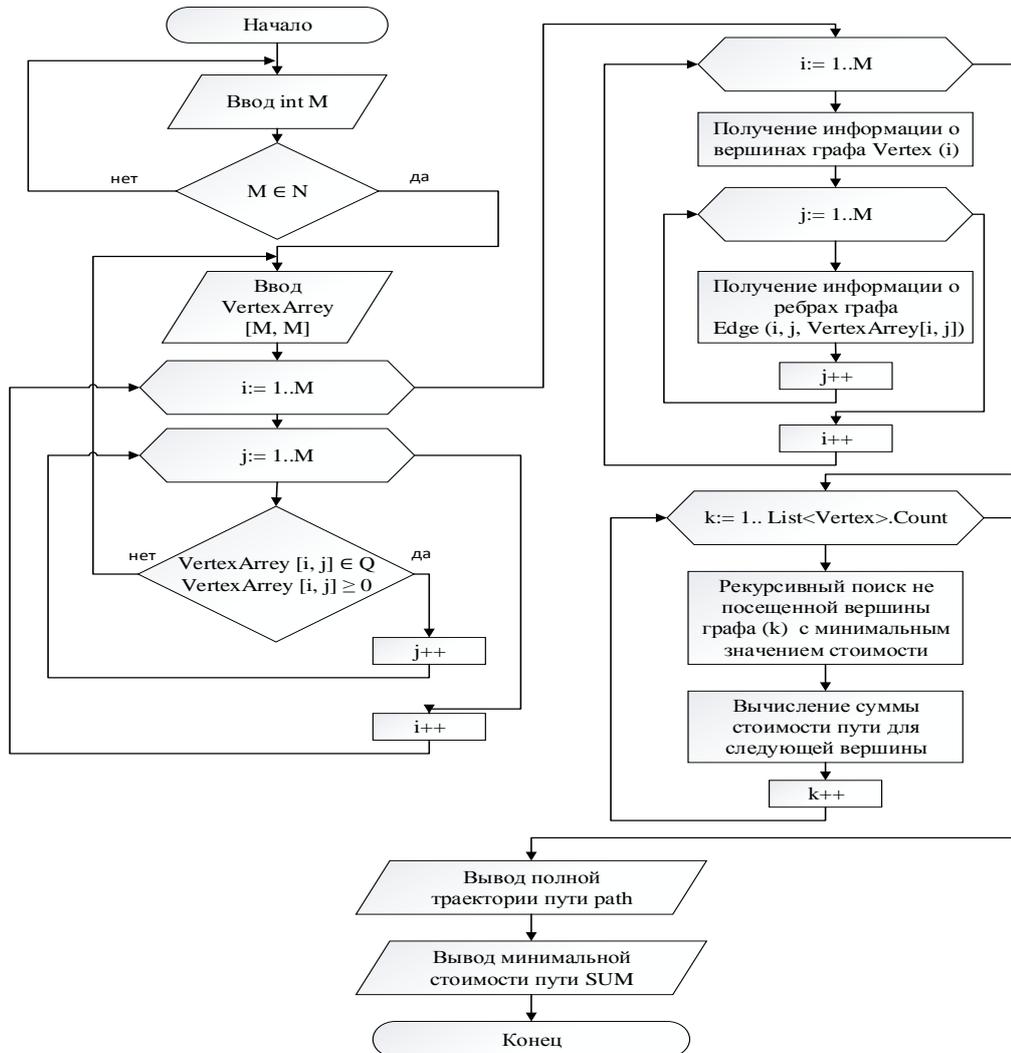


Рисунок 3.1 – Алгоритм автоматизированного расчёта задачи динамического программирования

На рисунке 3.2 и 3.3 приведены интерфейсы ПО, разработанного в рамках данной с применением алгоритмического языка C++.

Введите количество вершин

	Вершина 0	Вершина 1	Вершина 2	Вершина 3	Вершина 4
Вершина 0	0	0	0	0	0
Вершина 1	1	0	0	0	0
Вершина 2	5	6	0	0	0
Вершина 3	4	0	1	0	0
Вершина 4	0	0	0	4	0
Вершина 5	0	0	5	3	2
Вершина 6	0	9	0	0	0
Вершина 7	0	0	0	0	0
Вершина 8	0	0	0	0	3
Вершина 9	0	0	0	0	5

Установите связи между вершинами

Рисунок 3.2 – Инициализация задачи и ввод исходных данных (исходные данные рисунок 2.10).

На рисунке 3.3 представлены результаты расчета в разработанном ПО. Как видно: результаты автоматизированного расчёта с применение разработанного ПО совпадают с результатами ручного расчёта, следовательно, разработанное ПО применимо для решения общих задач динамического программирования.

Form1

Введите количество вершин

	Вершина 5	Вершина 6	Вершина 7	Вершина 8	Вершина 9
Вершина 0		0	0	0	0
Вершина 1		0	0	0	0
Вершина 2		0	0	0	0
Вершина 3		0	0	0	0
Вершина 4		0	0	0	0
Вершина 5		0	0	0	0
Вершина 6		0	0	0	0
Вершина 7		1	0	0	0
Вершина 8		0	1	0	0
Вершина 9		0	3	1	0

Установите связи между вершинами

Кратчайший путь
0356789
Значение
11

Рисунок 3.3 – Результаты автоматизированного расчёта в разработанном ПО

Как показывает расчёт: на первом такте процесса управления следует выполнить переход из вершины 0 в вершину 3, на втором такте - из вершины 3 в вершину 5, на третьем такте - из вершины 5 в вершину 6, на четвертом такте - из 0 вершины 6 в вершину 7, на пятом такте - из вершины 7 в вершину 8, на шестом, заключительном такте - из вершины 8 в вершину 9. Таким образом, оптимальной по критерию суммарной стоимости полной траекторией является $T = \{0,3,5,6,7,8,9\}$ [133].

3.1.2 Алгоритмизация поиска Парето-эффективных решений для дискретных событий в сложной транспортной системе

При получении множества Парето-эффективных решений основную сложность представляет выбор метода принятия решений и необходимость длительных расчётных процедур. Как правило, процедура принятия решения, основанная на большинстве известных методов, дает объективные результаты, но нередко возникает противоречие в том, что действия, рекомендуемые различными методами, могут не совпадать. Особенно часто проявляется этот недостаток, если приходится принимать решение по большому количеству критериев с разнонаправленным целеполаганием. То есть определяется необходимость применения специального метода поиска Парето-оптимальных решений, который не только объективно решает поставленную задачу, но и легко программируется.

Рассмотрим основную задачу маршрутизации в ТЛС, как задачу динамического программирования, но с необходимостью выбора возможного участка маршрута по нескольким критериям эффективности. Критериями эффективности в данном случае могут служить как показатели перевозочного процесса. Тогда дискретное состояние ГДТС, определяемое единичными показателями ГАП распределённых по критериям эффективности и представленных в виде матрицы эффективностей.

В рамках данной работы разработаны алгоритмы, позволяющие сформировать задачу получения Парето-оптимальных решений (рисунки 3.4 и 3.5).



Рисунок 3.4 – Алгоритм формирования матриц эффективности для отдельных дискретных состояний

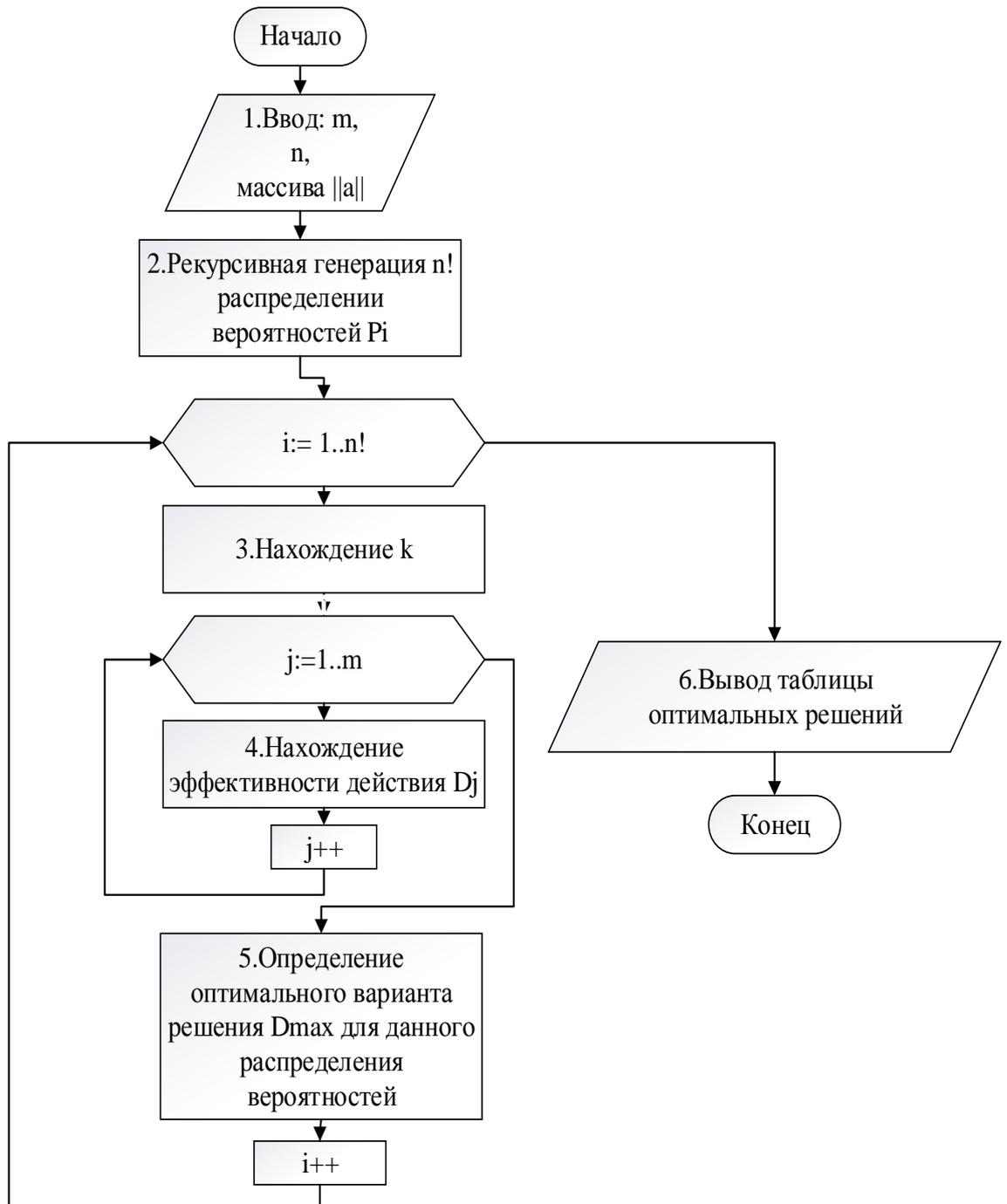


Рисунок 3.5 – Алгоритм решений многокритериальной задачи поиска Парето-оптимальных решений

Интерфейсы ПО, разработанного на базе алгоритмов, представленных на рисунках 3.4 и 3.5 для получения оптимальных Парето-эффективных решений на рисунках 3.6, 3.7, 3.8 и 3.9.

Введите количество критериев (N) Введите количество решений (M)

	K0	K1	K2	K3
▶ D0				
D1				
D2				
min-max				

Рисунок 3.6 – Инициализация программы

Введите количество критериев (N) Введите количество решений (M)

	K0	K1	K2	K3
D0	5070	23	4356	34
D1	4034	29	3954	58
D2	3075	14	4842	26
✎ min-max	max	min	max	min

Рисунок 3.7 – Ввод исходных данных

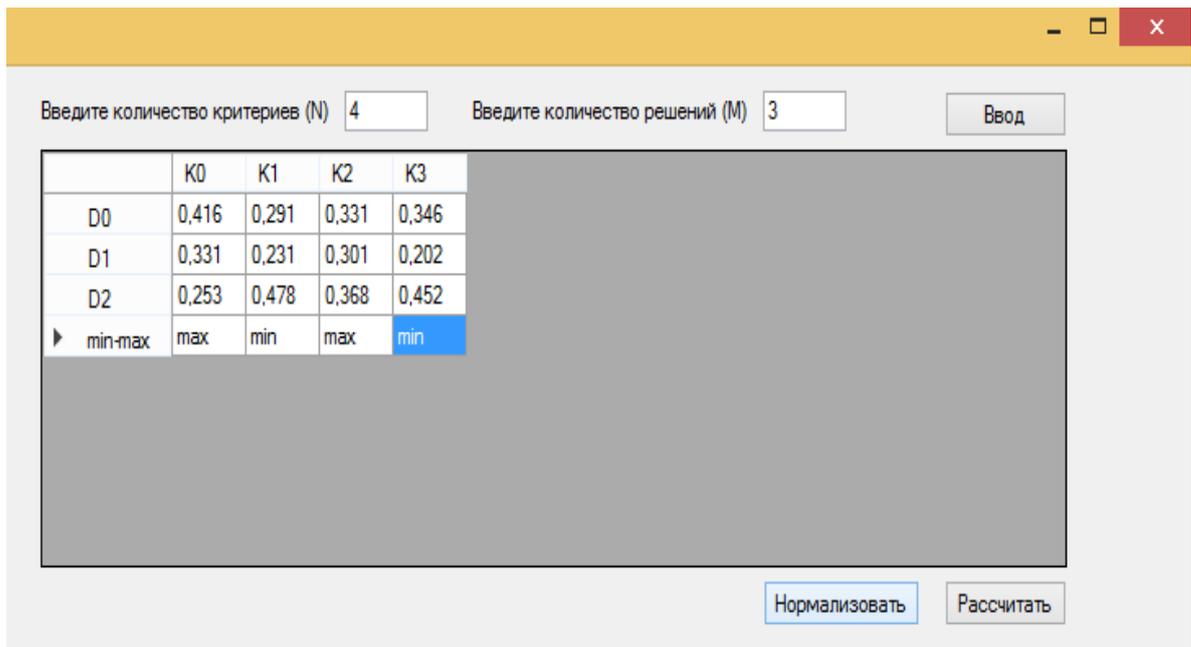


Рисунок 3.8 – Нормирование исходных значений с учетом целеполагания по отдельным критериям эффективности

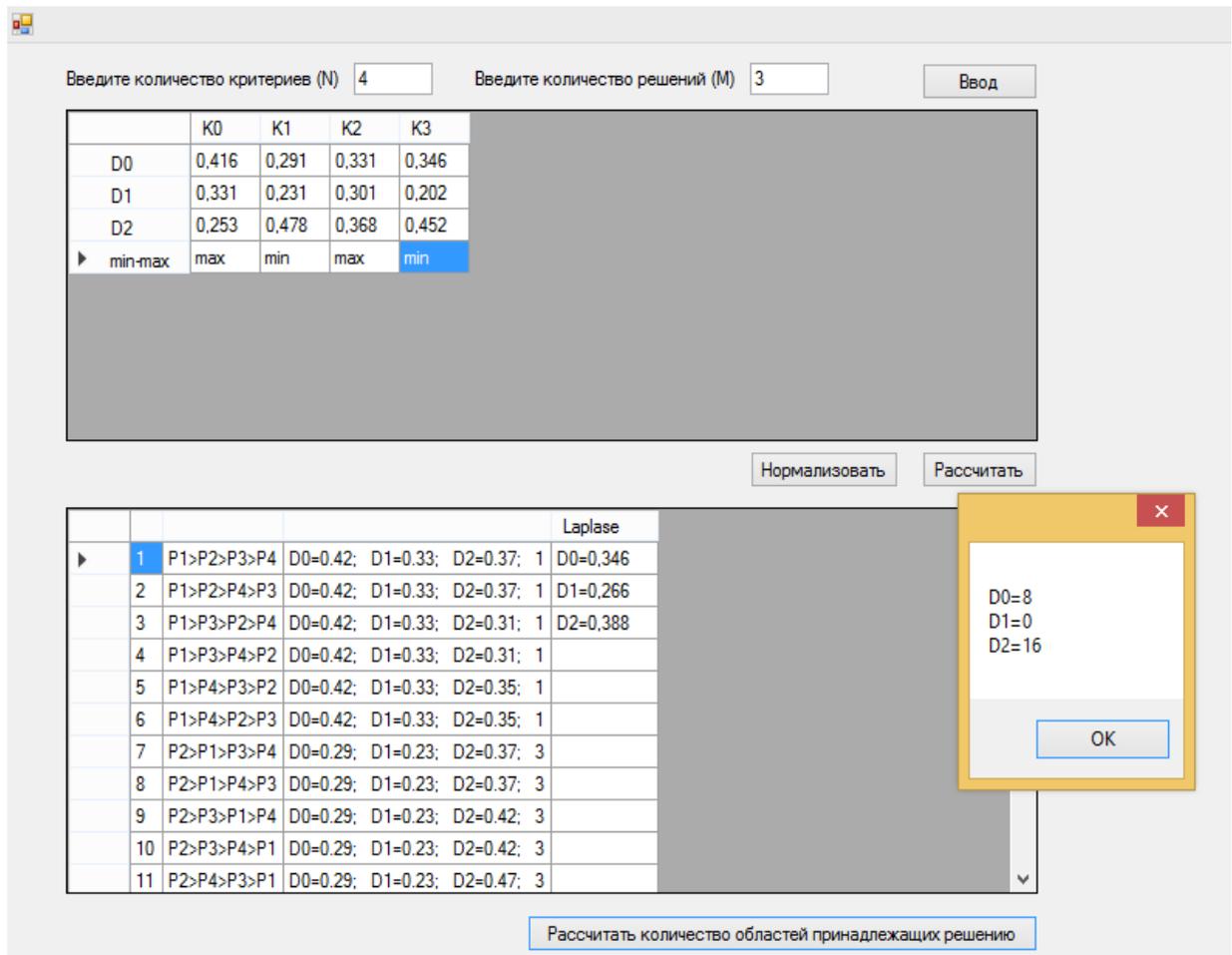


Рисунок 3.9 – Автоматизированное получение оптимального варианта действий в системе

Пример расчёта Парето-эффективных решений для одного из дискретных состояний перемещения объекта в ГДТС приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Пример расчёта Парето-эффективных решений для одного из дискретных состояний перемещения объекта в ГДТС [133]

№ приоритета решения	Приоритет критериев	Результаты расчёта при наличии приоритета критериев	При отсутствии
1	P1>P2>P3>P4	D0=0.41; D1=0.33; D2=0.37; 1	D0=0,346
2	P1>P2>P4>P3	D0=0.41; D1=0.33; D2=0.37; 1	D1=0,266
3	P1>P3>P2>P4	D0=0.41; D1=0.33; D2=0.31; 1	D2=0,388 – макс
4	P1>P3>P4>P2	D0=0.41; D1=0.33; D2=0.31; 1	
5	P1>P4>P3>P2	D0=0.41; D1=0.33; D2=0.35; 1	
6	P1>P4>P2>P3	D0=0.41; D1=0.33; D2=0.35; 1	
7	P2>P1>P3>P4	D0=0.28; D1=0.23; D2=0.37; 3	
8	P2>P1>P4>P3	D0=0.28; D1=0.23; D2=0.37; 3	
9	P2>P3>P1>P4	D0=0.28; D1=0.23; D2=0.42; 3	
10	P2>P3>P4>P1	D0=0.28; D1=0.23; D2=0.42; 3	
11	P2>P4>P3>P1	D0=0.28; D1=0.23; D2=0.47; 3	
12	P2>P4>P1>P3	D0=0.28; D1=0.23; D2=0.47; 3	
13	P3>P2>P1>P4	D0=0.31; D1=0.30; D2=0.42; 3	
14	P3>P2>P4>P1	D0=0.31; D1=0.30; D2=0.42; 3	
15	P3>P1>P2>P4	D0=0.31; D1=0.30; D2=0.31; 1	
16	P3>P1>P4>P2	D0=0.31; D1=0.30; D2=0.31; 1	
17	P3>P4>P1>P2	D0=0.31; D1=0.30; D2=0.41; 3	
18	P3>P4>P2>P1	D0=0.31; D1=0.30; D2=0.41; 3	
19	P4>P2>P3>P1	D0=0.34; D1=0.20; D2=0.47; 3	
20	P4>P2>P1>P3	D0=0.34; D1=0.20; D2=0.47; 3	
21	P4>P3>P2>P1	D0=0.34; D1=0.20; D2=0.41; 3	
22	P4>P3>P1>P2	D0=0.34; D1=0.20; D2=0.41; 3	
23	P4>P1>P3>P2	D0=0.34; D1=0.20; D2=0.35; 3	
24	P4>P1>P2>P3	D0=0.35; D1=0.20; D2=0.35; 3	

Формирование алгоритмов решения задачи динамического программирования и многокритериальной оптимизации:

- 1) алгоритм и ПО решения задачи динамического программирования, реализующая принцип Беллмана, позволяющий оптимальную траекторию (маршрут) перемещения груза в ГТДС;
 - 2) алгоритм и ПО решения задачи определения Парето-оптимальных вариантов действий в случае многокритериальности исследуемой системы;
- позволяет перейти к решению основной задачи исследования, заключающейся в интеграция разработанных алгоритмов и ПО в единый программный комплекс.

3.2 Аналитическая модель, положенная в основу методики определения оптимальных маршрутов при оперативно-производственном планировании перевозок в динамически изменяющихся условиях

Аналитическая модель методики определения оптимальных маршрутов при оперативно-производственном планировании перевозок в динамически изменяющихся условиях базируется на интеграции в задачу динамического программирования результатов решения задачи многокритериальной оптимизации при выборе управляющего действия для каждого дискретного состояния ГТДС. При данном подходе формула (2.30) преобразуется с учётом (2.27, 2.28) в математическую модель, содержащую рекуррентное соотношение:

$$B(x) = \underset{v \in V(x)}{\text{opt}} \{ s(\varepsilon, d_i) + B(f(d_i)) \}, (x \in D|F),$$

$$d_i = \sum_{j=1}^n e_{ij} k_j, \sum_{j=1}^n k_j = 1, 0 \leq k \leq 1, k_j \geq k_{j+1}, j = \overline{1, n-1}$$

где

$$k_j = \begin{cases} \frac{1}{c}, & \text{если } j = c \\ \frac{\lambda}{c}, & \text{если } j < c, \\ \frac{1-\lambda}{n-c}, & \text{если } j > c \end{cases} \quad \text{где } \lambda = \frac{n-1}{n}. \quad (3.1)$$

где D — множество возможных состояний или количество связей в ГДТС;
 F — множество состояний параметров или количество критериев оптимизации в ГДТС;
 $d_i(\varepsilon)$ — множество управлений при выборе направления перемещения (вариантов действий в системе) — $(\varepsilon \in D|F)$;
 $f(\varepsilon, v)$ — функция переходов из состояния ε при управлении d_i ;
 $s(\varepsilon, v)$ — функция количественной оценки эффективности при производстве процессов перемещения объекта в ГДТС.

Наиболее общий подход определяет множество состояний параметров или количество критериев оптимизации в ГДТС как движение материального потока, протекающее в пространственно-временной системе координат. При этом транспортный поток характеризуется тремя параметрами: объемом, расстоянием и временем перемещения, дискретными состояниями, связанными с:

- пунктами формирования груза (Г);
- пунктами приема груза (ГП);
- промежуточными пунктами – транспортно-складскими комплексами (ТСК).

Тогда такую систему можно построить на базе трех основных критериев:

$$Q \rightarrow \max; L \rightarrow \min; T \rightarrow \min \quad (3.2)$$

где Q - объем перевозок, т;

- L расстояние перевозки, км;

- T - транспортное время, ч;

Но, как правило, в практических расчётах данный подход упрощается и переводится в однокритериальную модель, где суммарная продолжительность процесса перевозки груза, выполняемого за один транспортный цикл, определяется по ряду составляющих:

Время начала транспортирования груза:

$$T_1 = T_1^n + T_1^o, \quad (3.3)$$

где T_1^n - время подготовки груза к отправке, ч;

T_1^o - время начала перемещения груза, ч.

Продолжительность этапа выполнения погрузочных (разгрузочных) работ:

$$T_2 = t_1^n + t_2^n + t_3^n + t_4^n, \quad (3.4)$$

$$T_2 = t_1^p + t_2^p + t_3^p + t_4^p, \quad (3.5)$$

где t_1^n – время ожидания погрузки (разгрузки), ч; t_2^n – время маневрирования автомобиля, ч; t_3^n – время погрузки (разгрузки) груза, ч; t_4^n – время оформления документов, ч.

Продолжительность этапа транспортирования определяется технической скоростью движения АТС:

$$T_3 = \frac{L_{ег}}{V_m}, \quad (3.6)$$

где $L_{ег}$ - длина ездки с грузом, км; V_T - техническая скорость, км/ч.

Учитывая предыдущие составляющие продолжительность процесса ГАП за один транспортный цикл:

$$T = T_1^n + t_{mn} + t_1^n + t_2^n + t_3^n + t_4^n + \frac{L_{ег}}{V_m} + t_1^p + t_2^p + t_3^p + t_4^p + T_5. \quad (3.7)$$

Таким образом, продолжительность цикла перевозки груза математически выстраивается в сумму элементов, каждый из которых в ГТДС имеет собственную природу факторного пространства, имеющую высокую степень неопределенности. Что неизбежно приводит к значительным погрешностям в расчётах эффективности процесса перевозок в целом.

В работе [136] решение данной проблемы предлагается следующим образом – определить четыре критерия эффективности (рисунок 3.10)

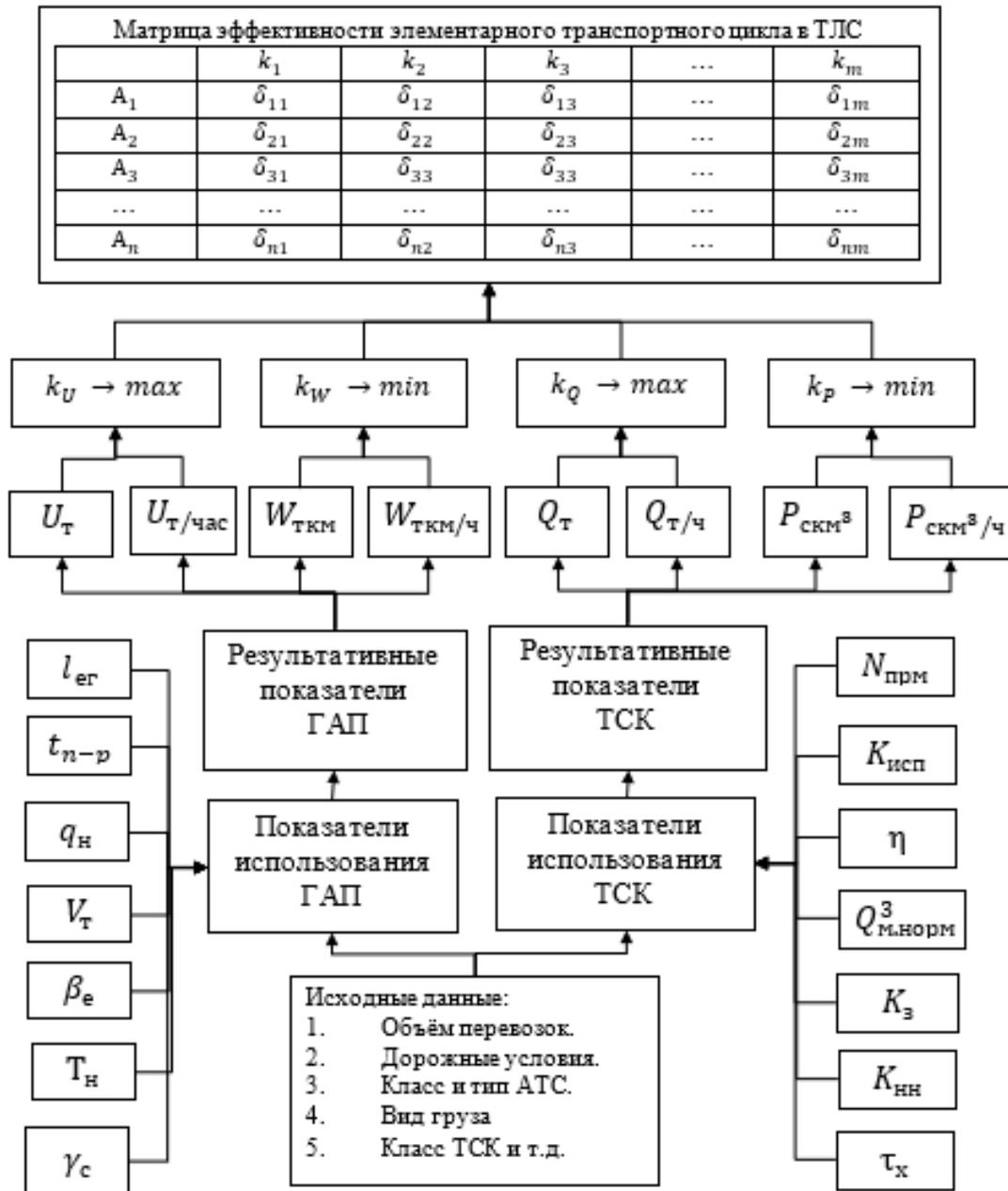


Рисунок 3.10 - Системы критериев управления в ГТДС [136]

$$k_U \rightarrow \max; k_W \rightarrow \min; k_Q \rightarrow \max; k_P \rightarrow \min \quad (3.8)$$

где все показатели агрегируют в критерии часовой и объемной производительности автомобилей и ТСК.

В комплекс параметров в ГДТС входят взаимосвязанные показатели, такие как: t_{n-p} – время простоя ПРР, $l_{ег}$ – длина гружёной ездки, км - V_T – среднетехническая скорость; - $Q_{м.норм}^3$ - нормативная вместимость склада; - K_3 - коэффициент загрузки склада и т. д. При этом справедливо отмечается, что: «...оперативное управление системой с десятками или сотнями тысяч элементов в «ручном» режиме невозможно» [136].

Аналитическая модель (3.1) позволяет решить данную проблему. Здесь в «ручном режиме» определяются только исходные данные характерные для отдельной исследуемой ГДТС, а эффективность отдельной траектории движения партии груза или транспортного средства определяется, как функция от любого неограниченного количества переменных:

$$Э_{opt} = f(d_{ij}, i = 1 \dots m; j = 1 \dots n) \quad (3.9)$$

где $j = 1 \dots n$ – количество исследуемых параметров, устанавливаемых предприятием, применяющим «протокол маршрутизации»; $i = 1 \dots m$ – количество вариантов перемещений из отдельного ГО или ТСК

Термин «протокол маршрутизации» принят из зарубежного опыта. Выше отмечалось, что планирования маршрутов с целью поиска оптимальных опираются на теорию планирования и передачи пакетов данных по Интернету. Поэтому по аналогии можно принять следующие определения:

1. **Маршрутизатор** – аналитическая модель и метод определения оптимальных маршрутов, положенные в основу методики их определения.
2. **Протокол маршрутизации** – программное обеспечение, созданное для решения задач маршрутизации в конкретных условиях (виды перевозок, географическая локация перевозок и т. д.

Алгоритм работы протокола маршрутизации приведен на рисунке 3.11.

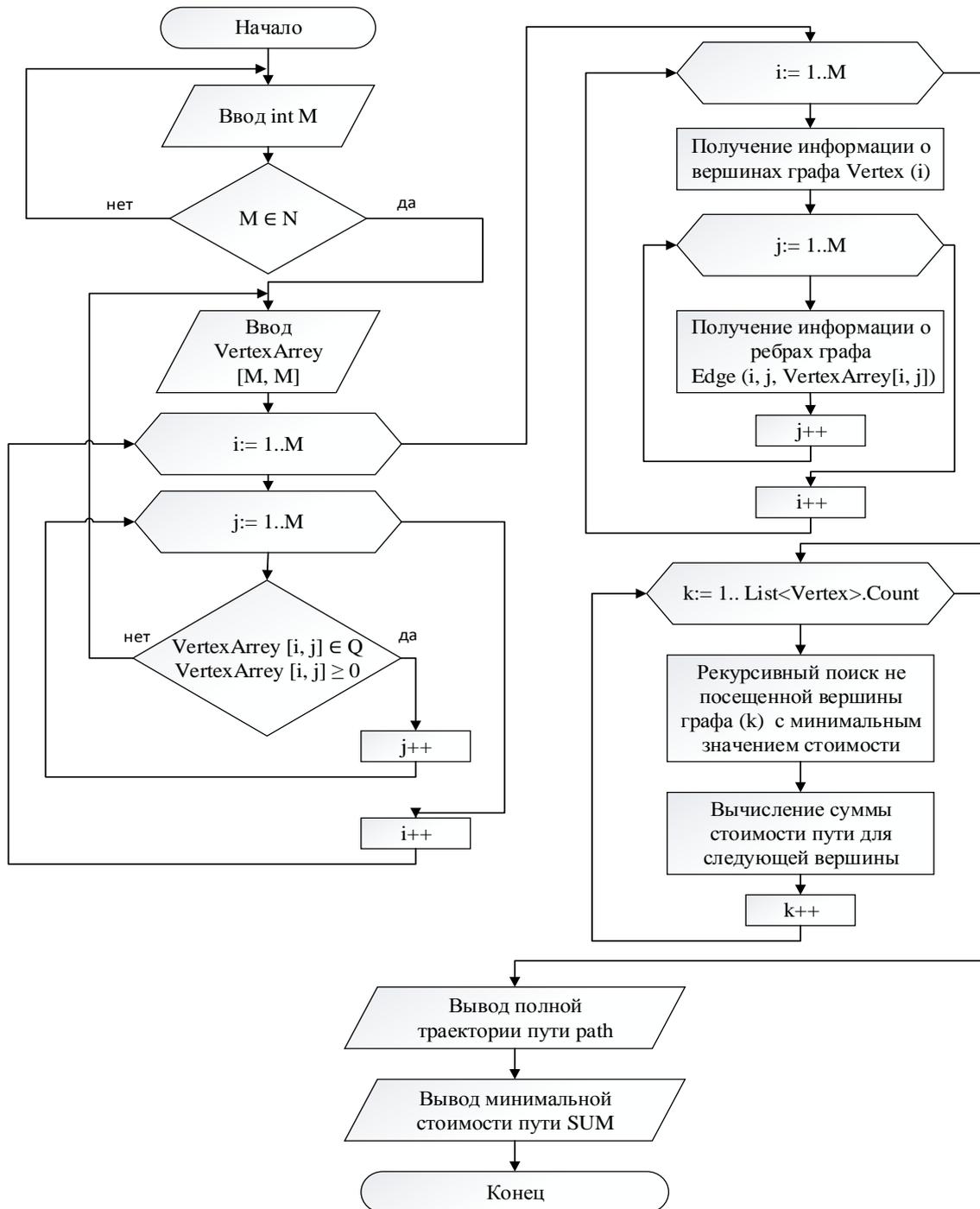


Рисунок 3.11 - Алгоритм работы протокола маршрутизации:

M – количество вершин графа; $VertexArrey [M, M]$ – массив значений стоимости пути между вершинами; $List<Vertex>$ - список вершин графа.

$Edge (i, j, VertexArrey[i, j])$ – ребро графа, $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, M}$ с учетом многокритериальной оценки; $path$ – полная траектория пути минимальной стоимости из начальной точки в конечную; SUM – минимальная стоимость пути в количественных оценках;

3.3 Порядок работы протокола маршрутизации на базе, разработанной методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях внешней среды перевозок

Разберем последовательность решения задачи определения оптимальных маршрутов автомобилей с применением разработанного в исследовании протокола маршрутизации на базе, разработанной методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях внешней среды перевозок, а также покажем порядок расчёта на условном числовом примере.

Приведем условие задачи на рисунке 3.12, но большим количеством показателей в виде матрицы эффективностей действий при различных внешней среды (формула 2.22), при этом каждый столбец показателей как отдельный критерий эффективности.

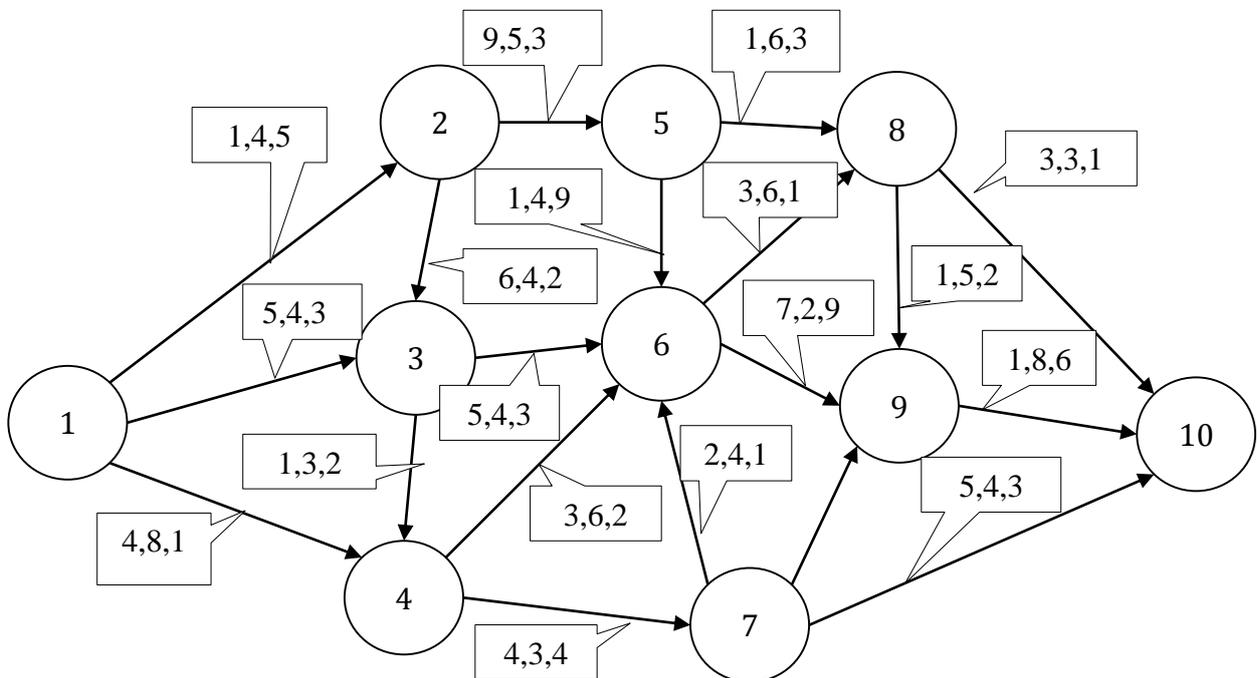


Рисунок 3.12 – Инициализация задачи определения оптимального маршрута при неограниченном количестве исследуемых факторов (на примере 3-х факторов)

Исследуемая транспортная сеть определяется количеством, включенных в неё вершин, (в нашем случае 10), тем самым формируем границы исследуемой системы.

Аналитическая модель (3.1) позволяет работать с большим фактически неограниченным количеством критериев. Ограничивая количество критериев, мы формализуем пространство исследуемых факторов **сверху** только их количеством. Термин «сверху» обозначает, что значимость или вес отдельного фактора на данном этапе определяется вероятностью проявления. Так как мы исследуем систему с неопределённой средой исследования значения вероятностей проявления факторов тождественны в решаемой задаче весовым коэффициентам – k , определимым аналитически по рекуррентному соотношению 3.33.

Этап 1. На рисунке 3.13 проведен интерфейс ввода данных в протоколе маршрутизатора, созданного на базе разработанной аналитической модели.

Введите количество вершин: 10

Введите количество критериев: 3

OK

Установите связи между вершинами

Вершины	
6 7	<input checked="" type="checkbox"/>
6 8	<input checked="" type="checkbox"/>
6 9	<input checked="" type="checkbox"/>
6 10	<input type="checkbox"/>
7 8	<input type="checkbox"/>
7 9	<input checked="" type="checkbox"/>
7 10	<input checked="" type="checkbox"/>
8 9	<input checked="" type="checkbox"/>
8 10	<input checked="" type="checkbox"/>
9 10	<input checked="" type="checkbox"/>

Выберите приоритет критериев

1	K1>K2>K3	<input type="checkbox"/>
2	K1>K3>K2	<input type="checkbox"/>
3	K2>K1>K3	<input type="checkbox"/>
4	K2>K3>K1	<input type="checkbox"/>
5	K3>K2>K1	<input type="checkbox"/>
6	K3>K1>K2	<input type="checkbox"/>

ОПРЕДЕЛИТЬ СВЯЗИ

Рисунок 3.13 - Интерфейс ввода данных в протоколе маршрутизатора

Этап 2. Следующим действием является ввод данных по каждой установленной связи в исследуемой системе. Формирование структуры связей может осуществляться либо в ручном режиме, либо автоматически. Автоматизировать данный процесс удобно при эксплуатации протокола маршрутизации в условиях реального предприятия, когда необходимые данные могут извлекаться с помощью программ-драйверов из существующих баз данных.

На рисунке 3.14 приведен интерфейс включения параметров связей в исследуемой системе для вершины 1

Form1

Введите количество вершин: 10

Введите количество критериев: 3

OK

Установите связи между вершинами

Вершины	
6 7	<input checked="" type="checkbox"/>
6 8	<input checked="" type="checkbox"/>
6 9	<input checked="" type="checkbox"/>
6 10	<input type="checkbox"/>
7 8	<input type="checkbox"/>
7 9	<input checked="" type="checkbox"/>
7 10	<input checked="" type="checkbox"/>
8 9	<input checked="" type="checkbox"/>
8 10	<input checked="" type="checkbox"/>
9 10	<input checked="" type="checkbox"/>

Выберите приоритет критериев

1	K1>K2>K3	<input type="checkbox"/>
2	K1>K3>K2	<input type="checkbox"/>
3	K2>K1>K3	<input type="checkbox"/>
4	K2>K3>K1	<input type="checkbox"/>
5	K3>K2>K1	<input type="checkbox"/>
6	K3>K1>K2	<input type="checkbox"/>

ОПРЕДЕЛИТЬ СВЯЗИ

Определение связей для вершины 1

Связи	K1	K2	K3
1 2	1	4	5
1 3	5	4	3
▶ 1 4	4	8	1

Таблица нормализации

Вершины	K1	K2	K3
▶ 1	4	8	1
	5	4	3
	1	4	5

ЗАНЕСТИ ДАННЫЕ СЛЕДУЮЩАЯ СВЯЗЬ НОРМАЛИЗОВАТЬ РАССЧИТАТЬ

Рисунок 3.14 - Интерфейс включения параметров связей в исследуемой системе для вершины 1

Этап 3. После того, когда все связи определены производится математическая процедура нормирования параметров и исследуемой системе с учетом установленного целеполагания по соотношениям (рисунок 3.15):

$$\delta_{ij} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} \varepsilon_{ij}}, & \text{если } i - \text{й показатель максимизируется,} \\ \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \varepsilon_{ij}}{\varepsilon_{ij}}, & \text{если } i - \text{й показатель минимизируется.} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$b_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{\sum_{k=1}^n \delta_{ik}} \quad (3.11)$$

Введите количество вершин: 10
Введите количество критериев: 3
OK

Установите связи между вершинами
Выберите приоритет критериев

Вершины	К1	К2	К3
6 7	<input checked="" type="checkbox"/>		
6 8	<input checked="" type="checkbox"/>		
6 9	<input checked="" type="checkbox"/>		
6 10	<input type="checkbox"/>		
7 8	<input type="checkbox"/>		
7 9	<input checked="" type="checkbox"/>		
7 10	<input checked="" type="checkbox"/>		
8 9	<input checked="" type="checkbox"/>		
8 10	<input checked="" type="checkbox"/>		
9 10	<input checked="" type="checkbox"/>		

Вершины	К1:К2:К3
1	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>
5	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/>

ОПРЕДЕЛИТЬ СВЯЗИ

Определение связей для вершины 9

Связи	К1	К2	К3
9 10	1	8	6

Таблица нормализации

Вершины	К1	К2	К3
1	4	8	1
	5	4	3
	1	4	5
2	9	5	3
	6	4	2
3	5	4	3
	1	3	2
4	4	3	4
	3	6	2
5	1	6	3
	1	4	9
6	7	2	9
	3	6	1
	2	4	1
7	5	4	3
	2	4	1
8	3	3	1
	1	5	2
9	1	8	6
min-max	min	min	min

Вывод оптимальных решений при различных распределениях вероятностей

Измените в таблице нормализации 'min' на 'max' при необходимости

OK

НОРМАЛИЗОВАТЬ РАССЧИТАТЬ

Рисунок 3.15 - Процедура нормирования параметров в исследуемой системе с учетом установленного целеполагания по соотношениям

Этап 4. На данном этапе решается первая оптимизационная задача – определение вектора возможных решений, состоящего из определенных эффективностей в количественных оценках для каждой связи в системе. Величина каждого параметра эффективности по отдельным возможным действиям является решением многокритериальной задачи нахождения Парето-оптимальных по формулам 2.27 и 2.28. При этом формируется исходная аналитическая база данных для решения второй оптимизационной задачи – задачи динамического программирования (рисунок 3.16)

Form1

Введите количество вершин: 10

Введите количество критериев: 3

OK

Установите связи между вершинами

Вершины	
6 7	<input checked="" type="checkbox"/>
6 8	<input checked="" type="checkbox"/>
6 9	<input checked="" type="checkbox"/>
6 10	<input type="checkbox"/>
7 8	<input type="checkbox"/>
7 9	<input checked="" type="checkbox"/>
7 10	<input checked="" type="checkbox"/>
8 9	<input checked="" type="checkbox"/>
8 10	<input checked="" type="checkbox"/>
9 10	<input checked="" type="checkbox"/>

Выберите приоритет критериев

1	K1>K2>K3	<input checked="" type="checkbox"/>
2	K1>K3>K2	<input type="checkbox"/>
3	K2>K1>K3	<input type="checkbox"/>
4	K2>K3>K1	<input type="checkbox"/>
5	K3>K2>K1	<input type="checkbox"/>
6	K3>K1>K2	<input type="checkbox"/>

ОПРЕДЕЛИТЬ СВЯЗИ

Определение связей для вершины 9

Связи	K1	K2	K3
▶ 9 10	1	8	6

Таблица нормализации

Вершины	K1	K2	K3
1	0,026	0,092	0,105
	0,021	0,046	0,035
	0,105	0,046	0,021
2	0,012	0,057	0,035
	0,018	0,046	0,053
3	0,021	0,046	0,035
	0,105	0,034	0,053
4	0,026	0,034	0,026
	0,035	0,069	0,053
5	0,105	0,069	0,035
	0,105	0,046	0,012
6	0,015	0,023	0,012
	0,035	0,069	0,105
	0,053	0,046	0,105
7	0,021	0,046	0,035
	0,053	0,046	0,105
8	0,035	0,034	0,105
	0,105	0,057	0,053
9	0,105	0,092	0,018
▶ min-max	min	max	min

Вывод опт

НОРМАЛИЗОВАТЬ

РАССЧИТАТЬ

Рисунок 3.16 - Исходная аналитическая база данных для решения второй оптимизационной задачи – задачи динамического программирования

Этап 5. – Финальный этап работы протокола маршрутизации. На данном этапе работы протокола маршрутизации включается решение задачи динамического программирования и определяется оптимальная траектория движения объекта в исследуемой системе (рисунок 3.17).

The screenshot shows a software window titled "Form1" with the following components:

- Input fields:** "Введите количество вершин" (10) and "Введите количество критериев" (3).
- Buttons:** "OK" and "ОПРЕДЕЛИТЬ СВЯЗИ".
- Tables:**
 - Table of connections:**

Вершины	Эффективнос
6 7	0,019
6 8	0,06966666666
6 9	0,068
6 10	0
7 8	0
7 9	0,0335
7 10	0,068
8 9	0,058
8 10	0,105
9 10	0,105
 - Table of priorities:**

1	2	3	4	5	6
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 - Table of connections for vertex 9:**

Связи	K1	K2	K3
9 10	1	8	6
 - Table of normalization:**

Вершины	K1	K2	K3
1	0,026	0,092	0,105
	0,021	0,046	0,035
	0,105	0,046	0,021
2	0,012	0,057	0,035
	0,018	0,046	0,053
3	0,021	0,046	0,035
	0,105	0,034	0,053
4	0,026	0,034	0,026
	0,035	0,069	0,053
5	0,105	0,069	0,035
	0,105	0,046	0,012
6	0,015	0,023	0,012
	0,035	0,069	0,105
	0,053	0,046	0,105
7	0,021	0,046	0,035
	0,053	0,046	0,105
8	0,035	0,034	0,105
	0,105	0,057	0,053
9	0,105	0,092	0,018
min-max	min	max	min
 - Table of optimal solutions:**

Вершины	Критерий	Решение
1	K2>K3	D1=0,07433333333333333; D2=0,0335; D3=0,105; 3
	K3>K2	D1=0,07433333333333333; D2=0,028; D3=0,105; 3
	K1>K3	D1=0,07433333333333333; D2=0,0335; D3=0,046; 1
	K3>K1	D1=0,07433333333333333; D2=0,0405; D3=0,046; 1
	K2>K1	D1=0,07433333333333333; D2=0,0405; D3=0,021; 1
	K1>K2	D1=0,07433333333333333; D2=0,028; D3=0,021; 1
2	K2>K3	D1=0,0345; D2=0,039; 2
	K3>K2	D1=0,0235; D2=0,039; 2
	K1>K3	D1=0,0345; D2=0,039; 2
	K3>K1	D1=0,046; D2=0,039; 1
	K2>K1	D1=0,046; D2=0,039; 1
	K1>K2	D1=0,0235; D2=0,039; 2
3	K2>K3	D1=0,0335; D2=0,105; 2
	K3>K2	D1=0,028; D2=0,105; 2
	K1>K3	D1=0,0335; D2=0,034; 2
	K3>K1	D1=0,0405; D2=0,034; 1
	K2>K1	D1=0,0405; D2=0,053; 2
	K1>K2	D1=0,028; D2=0,053; 2
4	K2>K3	D1=0,03; D2=0,052; 2
	K3>K2	D1=0,026; D2=0,044; 2
- Buttons:** "НОРМАЛИЗОВАТЬ" and "РАССЧИТАТЬ".
- Results:**
 - Наилучший путь: 1->2->5->6->8->9->10
 - Стоимость пути: 0,451

Рисунок 3.17 – Расчет оптимальной траектории объекта (последовательности объезда вершин) в исследуемой системе

На рисунке 3.18 показана схема движения объекта в системе, рассчитанная с применением разработанного протокола маршрутизации.

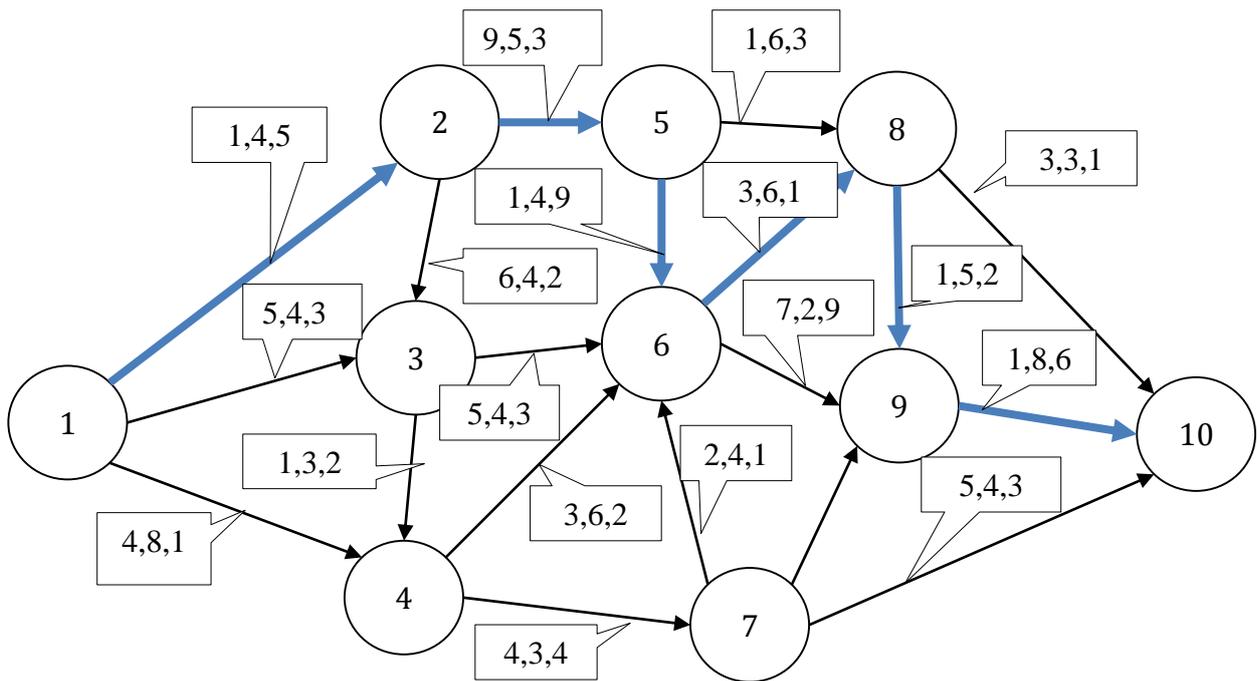


Рисунок 3.18 - Схема движения объекта в системе рассчитанная с применением разработанного протокола маршрутизации

Прокомментируем работы созданного протокола маршрутизации:

1. Протокол маршрутизации может работать с любым количеством показателей, сформированным в критерии эффективности ограничиваемым только предпочтениями предприятия-эксплуатанта.
2. В процессе работы протокола при решении первой оптимизационной задачи маршрутизации формируется «цифровой двойник» возможных состояний при перемещении объекта в исследуемой системе. «Цифровой двойник» — это полная совокупность эффективностей действий в системе, определенная в количественных оценках. При чем каждая эффективность действия определена путем решения многокритериальной задачи определена Парето-оптимальных.
3. При решениях второй оптимизационной задачи (решении задачи динамического программирования) может быть определена не одна оптимальная траектория перемещения объекта, а полная совокупность возможных траекторий, состоящих из $(n!)$ Вариантов. При этом каждое из

(n) – решений определяется приоритетом установленных критериев. Тогда полное математическое пространство решений определяется ($n! + 1$) решениями. Фактически предприятию эксплуатанту остается выбрать рекомендуемое решение с учетом интересующего его приоритета показателей.

Выводы по третьей главе

В-третьей главе:

1. В рамках разработки мероприятий по повышению эффективности в ГДТС разработаны алгоритмы и ПО, позволяющие сформировать задачу получения Парето-оптимальных решений. Решение данной задачи позволит не только получить искомые Парето-оптимальные решения, но и значительно сократить количество вычислительных процедур, необходимых для их поиска;
2. Алгоритм и ПО решения задачи динамического программирования, реализующая принцип Беллмана, позволяющий оптимальную траекторию (маршрут) перемещения груза в ГТДС;
3. Аналитическая модель, алгоритм, методика и ПО определения оптимальных маршрутов при оперативно-производственном планировании перевозок в динамически изменяющихся условиях базируется на интеграции в задачу динамического программирования результатов решения задачи многокритериальной оптимизации при выборе управляющего действия для каждого дискретного состояния ГДТС.

Принципиальными преимуществами разработанной модели поиска эффективных решений в сложных информационно-аналитических системах больших баз данных и ПО на их основе являются: отсутствие формализованной связи между весами, получаемых для отдельных критериев и различных вариантов

действий в ГДТС; полученное решение является максимально возможным с учётом исходных значений показателей эффективности по рассматриваемым критериям.

Определена целесообразность применения терминов «протокол маршрутизации» и «маршрутизатор», как аналогов в модели поиска оптимальных решений на основе теории планирования и передачи пакетов данных по Интернету.

4. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЮ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ

4.1 Цифровая объектно-ориентированная модель развозочного маршрута при оперативном планировании грузовых перевозках

Как уже отмечалось в первой главе, рост сложности современных ТЛС приводит к невозможности полноценно и достоверно отслеживать все необходимые процедуры для реализации необходимых эффективных изменений в «ручном» режиме. В этом случае процесс развития системы преобразуется в плохо управляемый или неуправляемый. Процессы управления в современных сложных ТЛС объединяет принципиальная общность условий, определяемая:

1. Динамически изменяющимися условиями внешней среды эксплуатации системы.
2. Отсутствием достаточной степени определённости необходимого информационного состояния при решении оптимизационных задач оперативного планирования грузовых перевозок
3. Наличием большего числа критериев разнонаправленного целеполагания и большого числа возможных вариантов решений.

Поэтому в настоящее время в современных моделях управления сложными ГДТС определилась тенденция перехода к «активному управлению» (Active Traffic Management), когда каждый элемент (объект) ГДТС должен соотносить свои действия с общей концепцией управления, а не наоборот. Таким образом, понятие объект управления переносится транспортного потока на отдельное транспортное средство, отдельную партию груза или отдельного пассажира. Следовательно, принципиально изменяется модель управления перевозками с предметно-ориентированной структуры на объектно-ориентированную модель, предполагающую применение интеллектуальных протоколов маршрутизации (рисунок 4.1). Схема объектно-субъектных связей в аналитической модели разработанного маршрутизатора перевозок приведена на рисунке 4.2.

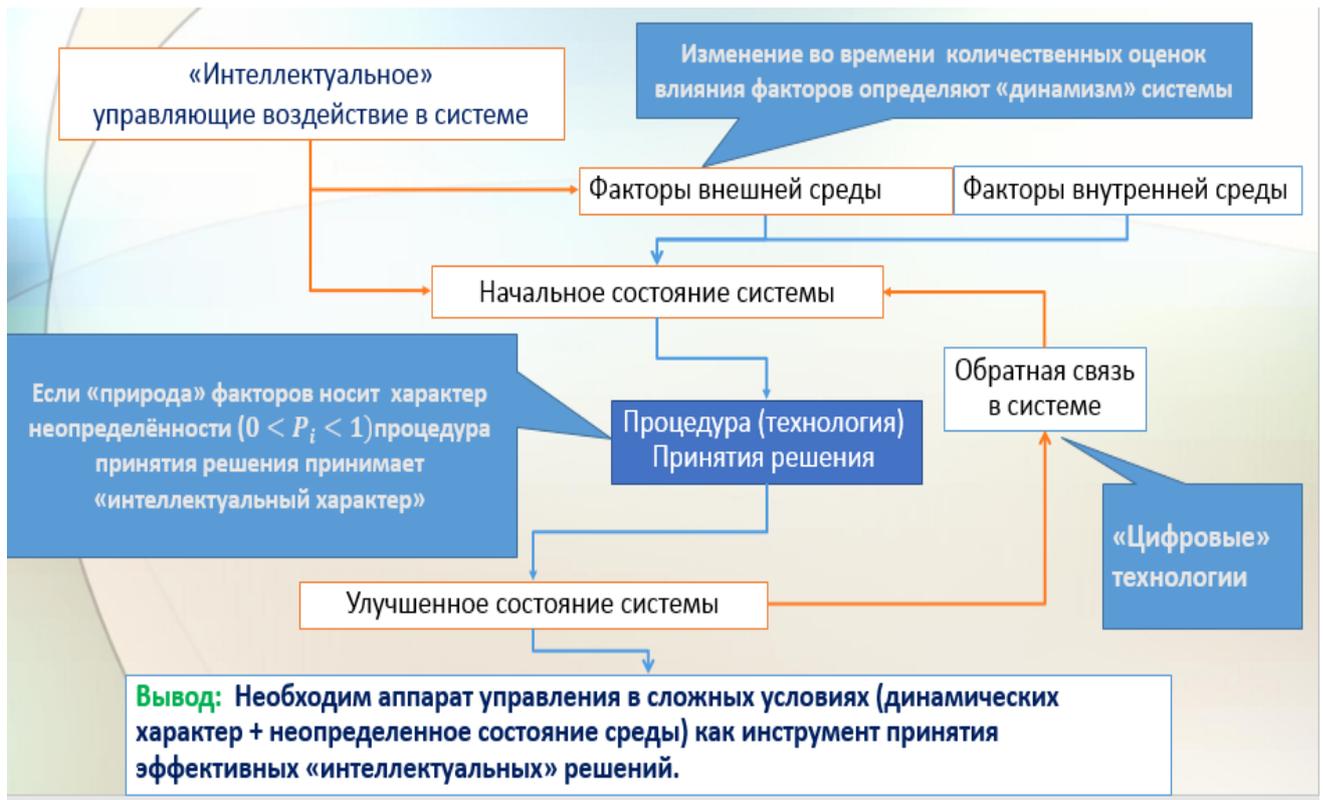


Рисунок 4.1 – Схема, определяющая необходимость применения интеллектуальных протоколов маршрутизации

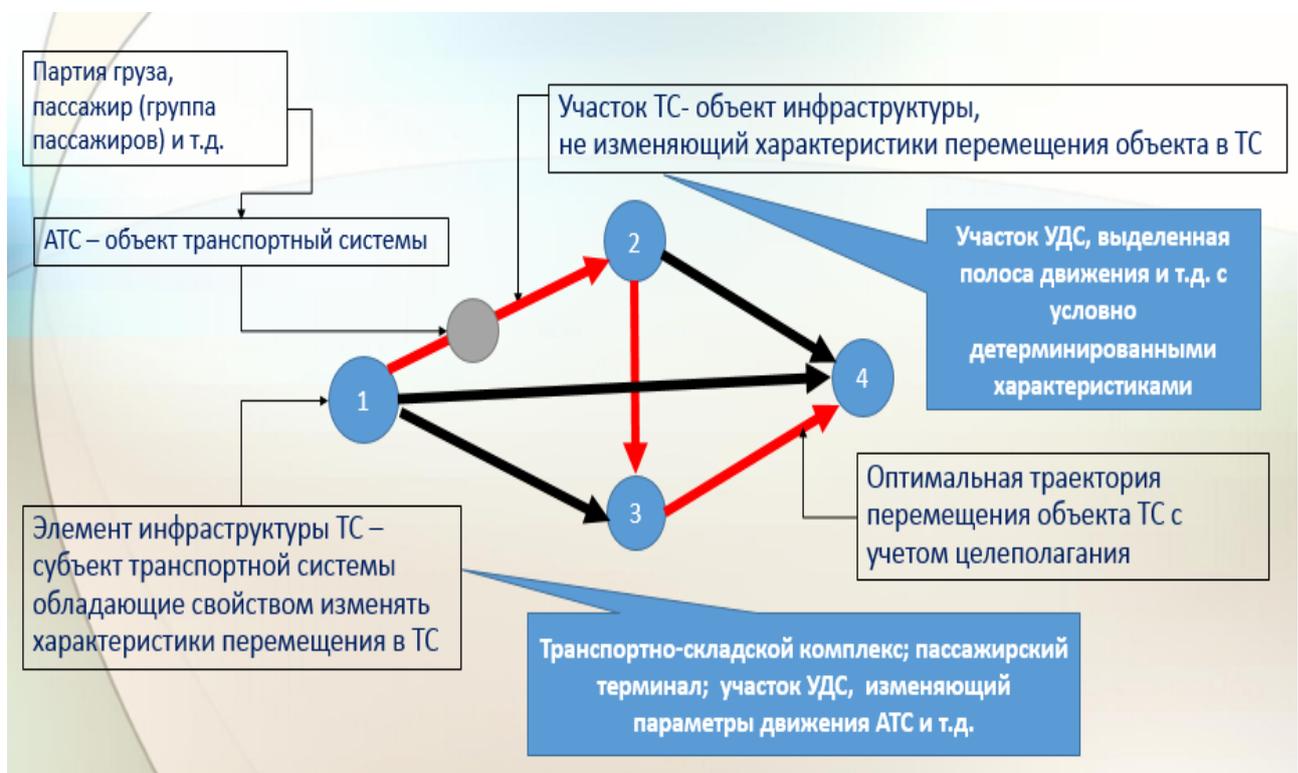


Рисунок 4.2 – Схема объектно-субъектных связей в аналитической модели маршрутизатора перевозок

Как видно из схем, приведенных на рисунках 4.1. и 4.2 принципиальными отличиями разработанной модели маршрутизатора от существующих являются следующие:

1. Аналитический аппарат маршрутизатора предполагает возможность выбора эффективного действия при наличии стохастической неопределённости, когда отсутствует информация, гарантирующая обоснованное применение известных стохастических законов распределения случайных величин (нормальный, логарифмически нормальный и др.).
2. При формировании исходного для расчётов графа исследуемой системы в качестве дискретных состояний могут и должны рассматриваться не только участки, где АТС прекращает движение в связи с необходимыми процедурами грузопереработки, но состояния сети, где происходит резкое изменение режимов движения АТС. Например, в силу загруженности «пробки» на том или ином участке сети, что особенно важно в условиях мегаполисов.
3. Разработанная модель работает с неограниченным количеством входов в систему (показателей), поэтому в базы данных могут и должны быть включены не только результативные показатели АТС (пробег, объем перевозки, грузооборот и т. д.), но результативные показатели грузоперерабатывающих пунктов (производительность ПРР, время ожидания при ПРР и т. д.).

Причисленные особенности разработанной модели маршрутизатора позволяют повысить достоверность оперативно-производственного планирования грузовых перевозок, исключить субъективные ошибки, определяемые наличием «человеческого фактора» и создать автоматизированную «интеллектуализированную» систему управления перевозками в автотранспортном предприятии (АТП) или транспортно-логистической компании (ТЛК). На следующих рисунках (4.3 и 4.4) приведем порядок вычислений в разработанном маршрутизаторе.

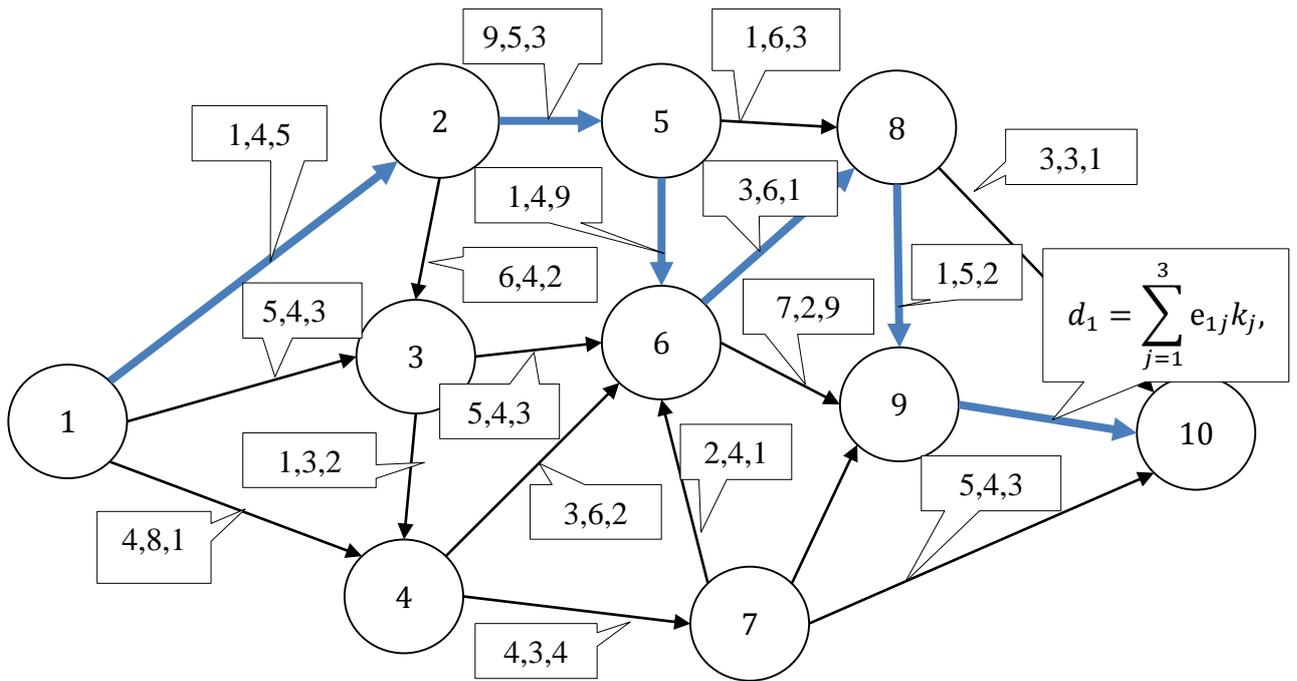


Рисунок 4.3 – Первая итерация вычислений в маршрутизаторе, где

$$d_i = \sum_{j=1}^n e_{ij}k_j = \max(\min d_i), \sum_{j=1}^n k_j = 1, k_j = \begin{cases} \frac{1}{c}, & \text{если } j = c \\ \frac{\lambda}{c}, & \text{если } j < c, \\ \frac{1-\lambda}{n-c}, & \text{если } j > c \end{cases} \text{ при } \lambda = \frac{n-1}{n}$$

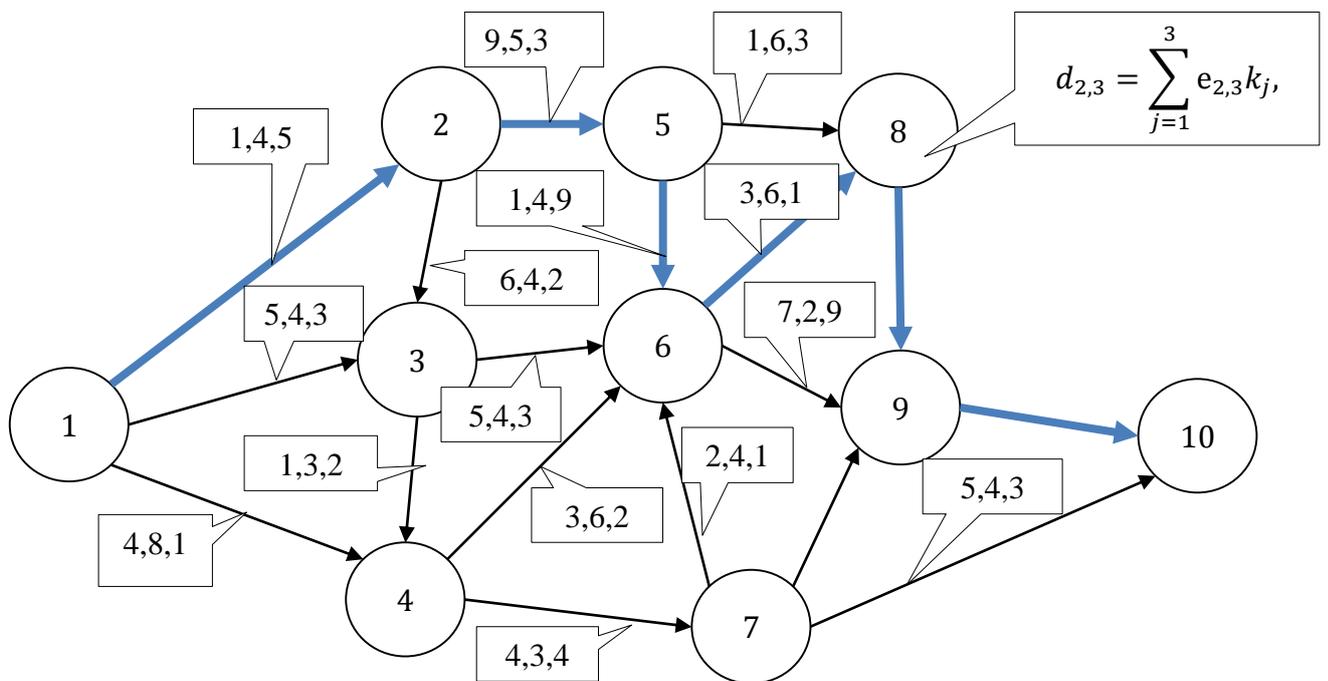


Рисунок 4.4 – Вторая итерация вычислений в маршрутизаторе

Рассмотрим применение разработанного протокола маршрутизации на кольцевом развозочном маршруте в г. Санкт-Петербурге. Кольцевым развозочным маршрутом называется такой маршрут, при движении по которому происходит постепенная выгрузка груза в каждом последующем пункте маршрута.

Исходные данные приняты в соответствии с планом ГАП ООО «СТЭК Северо-Запад». Данная схема ГАП является наиболее распространенной, так как в настоящее время более 80% доставки грузов со складов в торговый сети мегаполисов осуществляется по схеме развозочного маршрута. Как правило, организацию таких перевозок замыкают необходимость рациональной последовательности объезда пунктов с минимальным пробегом. Маршрутизация при этом заключается следующем.

1. Составляется матрица расстояний между всеми пунктами разгрузки (таблица 4.1)

Таблица 4.1- Матрица расстояний на исследуемом маршруте

Пункты	А	Б ₁	Б ₂	Б ₃	Б ₄	Б ₅	Б ₆	Б ₇	Б ₈	Б ₉	Б ₁₀	Б ₁₁	Б ₁₂	Б ₁₃	Б ₁₄	Б ₁₅
А	0	5	7,2	9,5	18,4	13,2	5,1	7,3	11,5	23,7	7,6	6	13,1	21	13	7,7
Б ₁	5	0	2	4,7	7,8	4,5	8	5,6	13	22	25	12	19,5	33	36	14,2
Б ₂	7,2	2	0	3	7,2	7	10	8,1	15,3	24,5	17	17	20,1	35,8	37,7	17,9
Б ₃	9,5	4,7	3	0	4	6	15	10,6	18,2	27,5	20	14	18,3	31,2	35,2	16
Б ₄	18,4	7,8	7,2	4	0	6	16,2	13,4	21	29,6	26	11	14	28	25	18
Б ₅	13,2	4,5	7	6	6	0	15,2	20,1	25,6	23,7	20,8	10,3	12,9	25,3	22,3	20,3
Б ₆	5,1	8	10	15	16,2	15,5	0	8	6,5	8,2	10	11	20,1	26	18	13,7
Б ₇	7,3	5,6	8,1	10,6	13,4	20,1	8	0	7	15	18	16	21,7	28,3	20,5	15
Б ₈	11,5	13	15,3	18,2	21	25,6	6,5	7	0	10	19	18	26,5	33	25	19,7
Б ₉	23,7	22	24,5	27,5	29,6	23,7	8,2	15	10	0	10,5	28	34,5	41,2	23,7	30,7
Б ₁₀	7,6	15	17	20	26	20,8	10	18	19	10,5	0	13,6	22,1	28,6	27,4	17
Б ₁₁	6	12	17	14	11	10,3	11	16	18	28	13,6	0	8,5	12	11	10
Б ₁₂	13,1	19,5	20,1	18,3	14	12,9	20,1	21,7	26,5	34,5	22,1	8,5	0	10	18	26
Б ₁₃	21	33	35,8	31,2	28	25,3	26	28,3	33	41,2	28,6	12	10	0	9	17,5
Б ₁₄	13	36	37,7	35,2	25	22,3	18	20,5	25	23,7	27,4	11	18	9	0	10
Б ₁₅	7,7	14,2	17,9	16	18	20,3	13,7	15	19,7	30,7	17	10	26	17,5	10	0
Итого	169,3	202,3	229,8	233,2	245,6	233,5	191	214,6	269,3	352,8	282,6	198,4	285,3	379,9	331,8	253,7

2. На схеме дорожной сети пункты нумеруются с наиболее удаленного по кратчайшим расстояниям.

3. Далее производится набор пунктов в маршруты. Набор пунктов маршрута начинается с включения в него самого удаленного от пункта погрузки А, который заносят в исходную таблицу.
4. Затем рассматриваются звенья дорожной сети, связанные с этим пунктом.
5. На следующем этапе определяется последовательность объезда пунктов маршрута начиная с нулевого А. Чтобы определить эту последовательность, необходимо найти минимально возможное увеличение длины маршрута $\Pi_{кр}$, обусловленное включением очередного пункта в маршрут. Величину прироста $\Pi_{кр}$ (км) определяется по формуле:

$$\Pi_{кр} = \ell_{ki} + \ell_{ip} - \ell_{кр}, \text{ км}, \quad (4.1)$$

где ℓ – расстояние, км; k – первый соседний пункт; p – второй соседний пункт; i – включаемый пункт.

6. Определяются длины пробегов на сформированном маршруте (таблица 4.2 и рисунок 4.5)

Таблица 4.2 - Длины пробегов на исследуемом развозочном маршруте

Наименование участка	Обозначение	Значение, км.
А → Б ₁₁	ℓ_{er1}	6
Б ₁₁ → Б ₁₂	ℓ_{er2}	8,5
Б ₁₂ → Б ₁₃	ℓ_{er3}	10
Б ₁₃ → Б ₁₄	ℓ_{er4}	9
Б ₁₄ → Б ₁₅	ℓ_{er5}	10
Б ₁₅ → Б ₁₀	ℓ_{er6}	17
Б ₁₀ → Б ₉	ℓ_{er7}	10,5
Б ₉ → Б ₈	ℓ_{er8}	10
Б ₈ → Б ₇	ℓ_{er9}	7
Б ₇ → Б ₆	ℓ_{er10}	8
Б ₆ → Б ₁	ℓ_{er11}	8
Б ₁ → Б ₂	ℓ_{er12}	2
Б ₂ → Б ₃	ℓ_{er13}	3
Б ₃ → Б ₄	ℓ_{er14}	4
Б ₄ → Б ₅	ℓ_{er15}	6
Б ₅ → А	ℓ_x	13,2
А → А	ℓ_m	132,2

Используем разработанный протокол маршрутизации на данном развозочном маршруте с учётом критериев, представленных на схеме 3.10 (рисунок 4.6)

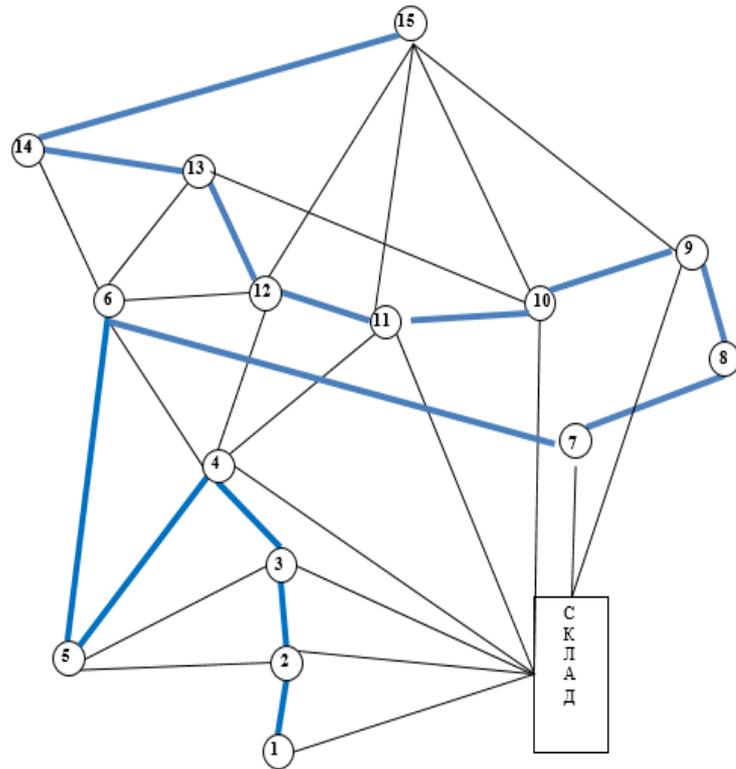


Рисунок 4.5 – Схема исследуемого развозочного маршрута

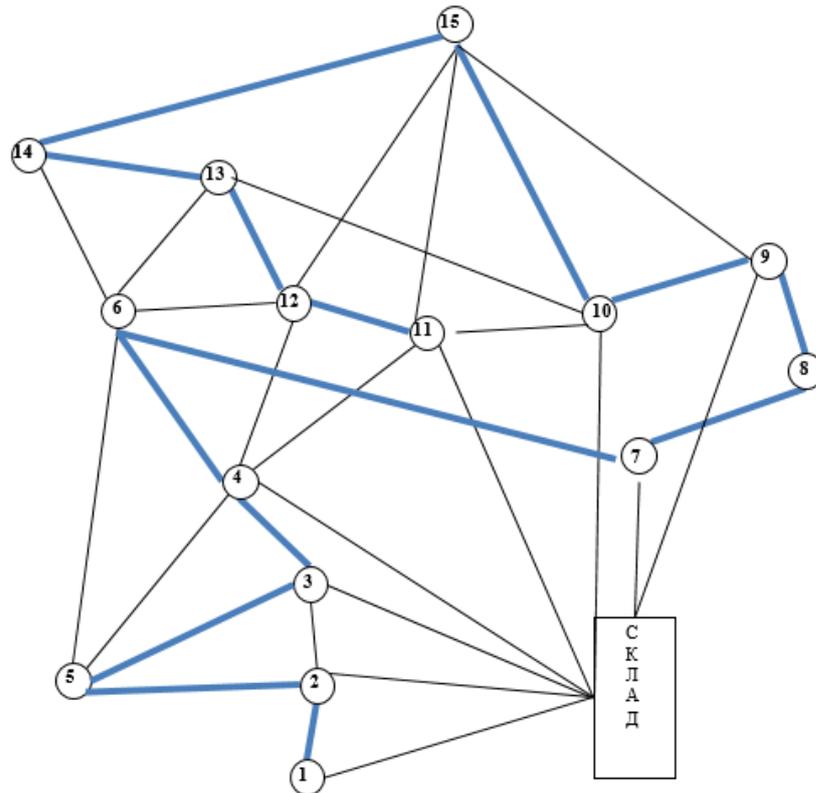


Рисунок 4.6 – Схема полученного маршрута, полученная с применением разработанного протокола маршрутизации

Далее определим производственную программу и экономическую эффективность (ТЭП) перевозок для обоих случаев по известным методикам [137].

Списочное количество АТС:

$$A_{\text{сп}} = \frac{A_{\text{эобщ}}}{\alpha_{\text{в}}}, \text{ ед,} \quad (4.2)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент выпуска автомобилей на линию.

Количество автомобиле-дней в эксплуатации:

$$A D_{\text{э}} = A_{\text{эобщ}} \cdot D_{\text{э}}, \text{ а – д,} \quad (4.3)$$

где $D_{\text{э}}$ – количество эксплуатационных дней в году.

Количество автомобиле-часов в наряде:

$$\sum AЧ_{\text{н}} = AЧ_{\text{н1}} + AЧ_{\text{н2}} + \dots + AЧ_{\text{нн}}, \text{ а – ч,} \quad (4.4)$$

где $AЧ_{\text{н}}$ – автомобиле-часы в наряде на отдельном маршруте.

Среднее фактическое время в наряде:

$$T_{\text{нсп}}^{\text{ф}} = \frac{\sum AЧ_{\text{н}}}{A_{\text{эобщ}}}, \text{ ч.} \quad (4.5)$$

Общий пробег АТС по всем маршрутам за год:

$$\sum L_{\text{общ}} = L_{\text{общ1}} + L_{\text{общ2}} + \dots + L_{\text{общн}}, \text{ км,} \quad (4.6)$$

где $L_{\text{общн}}$ – общий пробег автомобилей по отдельному маршруту.

Гружёный пробег автомобилей по всем маршрутам за год:

$$\sum L_{гр} = L_{гр1} + L_{гр2} + \dots + L_{грn}, \text{ км}, \quad (4.7)$$

где $L_{грn}$ – гружёный пробег автомобилей по отдельному маршруту.

Коэффициент использования пробега:

$$\beta = \frac{\sum L_{гр}}{\sum L_{общ}} \quad (4.8)$$

Объём перевозок по всем маршрутам за год:

$$\sum Q_{год} = Q_{год1} + Q_{год2} + \dots + Q_{годn}, \text{ т}, \quad (4.9)$$

где $Q_{годn}$ – объём перевозок по отдельному маршруту.

Грузооборот по всем маршрутам за год:

$$\sum P_{год} = P_{год1} + P_{год2} + \dots + P_{годn}, \text{ ткм}, \quad (4.10)$$

где $P_{годn}$ – грузооборот по отдельному маршруту за год.

Среднесуточный пробег автомобилей по всем маршрутам:

$$L_{cc} = \frac{\sum L_{общ}}{АД_3}, \text{ км}. \quad (4.11)$$

Автомобиле-часы в эксплуатации за год:

$$АЧ_3 = Д_3 \cdot \sum АЧ_n, \text{ а - ч}. \quad (4.12)$$

Суточная производительность одного автомобиля в тоннах:

$$W_{\text{сут}} = \frac{\sum Q_{\text{год}}}{AD_3}, \text{ т.} \quad (4.13)$$

Суточная производительность одного автомобиля:

$$W_{\text{сут}} = \frac{\sum P_{\text{год}}}{AD_3}, \text{ т} \cdot \text{км} \quad (4.14)$$

Результаты расчёта ТЭП работы для двух случаев приведены в таблицах 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 – Результаты расчёта ТЭП

Наименование показателей, ед. изм.	Значение показателей		Изменение показателей отн. ед.
	ООО «СТЭК Северо-Запад»	Маршрутизатор	
1. Количество АТС в эксплуатации, ед	3	1	2
2. Списочное количество АТС, ед.	3	1	2
3. Автомобиле-дни в эксплуатации, а-д/год	285,8	183,7	102,1
4. Автомобиле-часы в наряде, а-ч/сут.	10,5	6,3	4,2
5. Фактическое время в наряде, а-ч/сут.	8,5	8,55	0,05
6. Автомобиле-часы в эксплуатации, а-ч/год	2605,4	1609	996,4
7. Производительность АТС, т/сут	3,38	5,67	2,29
8. Производительность АТС, т.км/год	117,3	674,6	557,3
9. Подготовительно-заключительное время, ч/год	122,6	74,8	47,8

Таблица – 4.4 – Результаты расчёта экономических показателей на одном маршруте

Наименование показателей, ед. изм.	Значения показателей	
	ООО «СТЭК Северо-Запад»	Маршрутизатор
2. Сумма затрат на перевозки, тыс. руб./год	907,231	858,773
3. Себестоимость перевозимого груза за 1 тонну, руб/т	939,16	824,45
4. Доходы от перевозок, тыс. руб./год	966	1041,6
5. Прибыль от перевозок, тыс. руб./год	58,8	182,826
7. Затраты на один рубль дохода, коп.	94	82,44
8. Экономический эффект, тыс. руб./год	-	35 136

Сравнение экономических показателей позволяет сделать следующие выводы: применение разработанного протокола маршрутизации сокращает сумму затрат на перевозки снизится на 48,458 тыс. руб./сут., а экономический эффект составит 35 136 тыс. руб./год.

4.2 Эффективность применения разработанного маршрутизатора в динамически изменяющихся экономических условиях

Приведенный в предыдущем пункте расчёт производственной программы и экономической эффективности моделей маршрутизации можно считать ориентировочным, так как он опирается на динамически устойчивые показатели производительности эксплуатации АТС. В реальной практике предприятий, осуществляющих грузовые перевозки в современных условиях практически, невозможно получить динамически стабильные входные данные в систему экономической эффективности ГАП.

Экономическая эффективность ГАП определяется рядом показателей, таких как: рентабельность, доходы от перевозок; затраты на перевозки и т. д. В итоге,

перечисленные показатели опираются на тарифы, определяемые рыночной конъюнктурой перевозок. При этом в современных экономических условиях в ГАП сложилась сложная структура тарифообразования – применяются различные тарифы: в зависимости от расстояния перевозок, объёма перевозок, времени доставки, необходимого для осуществления перевозок и т. д. Рассмотрим случай, когда доходы от перевозок определяются исходя из объемов перевозок и с учетом тарифов предприятия:

$$D_{\text{пер}} = \frac{Q_{\text{пер}} \cdot T_{1\text{м}^3}}{1000}, \text{ тыс. руб.}, \quad (4.15)$$

где $Q_{\text{пер}}$ – объём перевозки, м³;

$T_{1\text{м}^3}$ – тариф за единицу объёма перевезенного навалочного груза, руб./м³.

Финансовый результат определяется показателями прибыли от перевозок и рентабельности:

$$P_{\text{пер}} = D_{\text{пер}} - C_{\text{экспл}}, \text{ тыс. руб.}, \quad (4.16)$$

$$R_{\text{пер}} = \frac{P_{\text{пер}}}{C_{\text{экспл}}} \cdot 100\%, \quad (4.17)$$

Данный подход остается неизменным, но особенностью существующей экономической реальности является динамическая нестабильность спроса на ГАП. В процессе работы АТС в городских условиях зафиксированы ситуации: варьирование количества заявок происходит в диапазоне от – 15 % до + 15 %; варьирование объемов перевозок по заявкам варьируется от –25 % до + 25 %; происходит регулярное изменение расстояний перевозок, а, соответственно длин гружёных и порожних ездов автомобилей.

Естественно, что подобные динамические изменения в структуре «заказывания» перевозок в условиях применения, сегодня, «фиксированной» декомпозиции может приводить к неполноценному использованию провозных

возможностей АТП и грузоподъемности подвижного состава; перегрузке автомобилей; несвоевременному удовлетворению спроса на перевозки; неуравновешенному балансу потребности в подвижном составе; неэффективному применению автомобилей во времени; несоответствию плановых и фактических показателей работы АТП, невозможности обслужить по времени клиентов, подавших заявки в последнюю очередь и т.д. [138]. Причем в таких условиях работают, согласно статистическим данным, преобладающее количество небольших автопредприятий (около 80 % от общего числа), имеющих в своём составе парк подвижного состава от 10 до 30 ед. Весь объем заказывания перевозок можно условно разделить на три основные группы клиентуры.

Постоянные заказы, как правило, обеспечивают устойчивый спрос как по объемам, так и по номенклатуре, и условиям перевозок.

Непостоянную клиентуру составляют потребители транспортных услуг, у которых отсутствует постоянная потребность в перевозках, но статистические данные показывают, что таких клиентов довольно большое количество и средний суточный объем совокупного спроса данной клиентуры является сравнительно устойчивой величиной.

Эпизодическая клиентура составляет сегмент заказов, когда средний суточный объем совокупного спроса данной клиентуры не является сравнительно устойчивой величиной.

Предприятия являются предпочтением удовлетворения, в первую очередь, спроса на перевозки по заявкам постоянный. Провозные возможности исследуемого предприятия (и многих других) ниже, чем предлагаемые рынком предложения на перевозки. Это объясняется объективными экономическими аспектами: снижение экономического риска при отсутствии спроса на перевозки, более низким затратами на содержание АТС и производственно-технической базы (ПТБ) и т. д.

Собственным подвижным составом реализуется около 80 % заявок, оставшиеся 20% реализуются с привлечением наёмного подвижного состава. При этом, как уже выше отмечалось, предпочтение отдаётся заявкам, носящим

постоянный характер. Между тем доля эпизодических заявок может составлять от 20 до 50% в определённые периоды времени (сезонные работы по восстановлению дорожного покрытия, временные работы на отдельных строящихся объектах т. д.).

Исследуем экспериментальные, полученные при апробации разработанного маршрутизатора (схема маршрута приведена на рисунке 4.5) при этом сгруппируем данные по трём критериям и трём типам заявок.

Критерии эффективности:

1. Производительность работы АТС, ткм.
2. Себестоимость перевозок навалочных грузов, руб./км
3. Время, затрачиваемое на перевозку 10 т. груза, час/10 т.

Характер заявок на перевозку грузов.

Вариант 1. Заявки, носящие постоянный характер.

Вариант 1. Заявки, носящие непостоянный характер.

Вариант 1. Заявки эпизодического характера.

Значение показателей эффективности работы по отдельным критериям и возможным вариантам решения определялись как математическое ожидание случайной величины, имеющее дискретное равномерное распределение по совокупности суточных показателей работы АТС рамках отдельной агрегируемой группы показателей.

$$M[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4.18)$$

Результаты расчёта и нормирования значений математического ожидания производительности работы АТС в заданных условиях ГАП и в зависимости от характера заявки представлены по отдельным критериям эффективности на рисунке 4.7.

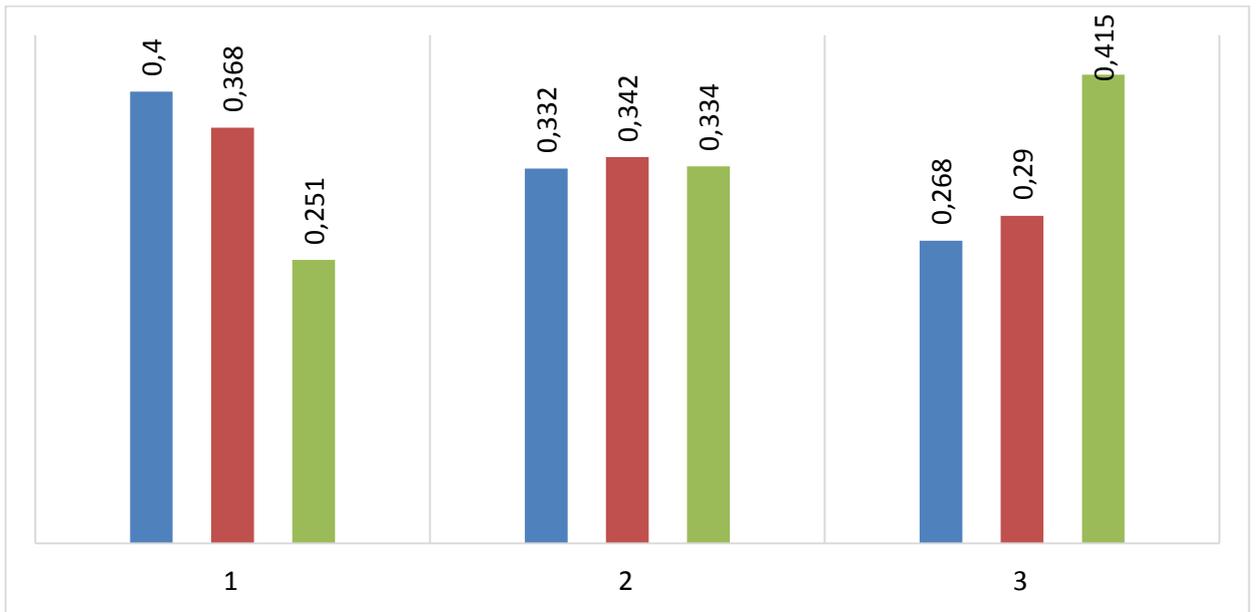


Рисунок 4.7 – Диаграмма изменения значений показателей по отдельным критериям эффективности

Разработанный протокол маршрутизации позволяет оценивать эффективность отдельных действий дифференцировано для различных критериев эффективности. При этом каждый из рассматриваемых критериев непосредственно отражает дифференцированную тарификацию ГАП. На основании данных рисунка 4.6 можно сформировать структуру для определения эффективности ГАП по тому или иному виду заявок учётом уровней (коэффициентов) доминирования решений. (таблица 4.5)

Таблица 4.5 – Значения определения эффективности ГАП по различным типам заявок

Характер заявки	Коэффициент доминирования решения (K_d)
1. Постоянный	0,4264
2. Непостоянный	0,0852
3. Эпизодический	0,4884

Показатель экономической эффективности ГАП по каждому варианту перевозок можно определить по формуле.

$$d_{\varepsilon_i} = K_{Д_i} \sum_{j=1}^n T_j b_{ij}, \quad (4.19)$$

где b_{ij} – нормированное значение показателя или эффективность i -го действия по j -го критерию, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.

T_j – тариф, соответствующий критерию оптимизации ГАП (руб./т; руб./км; руб./час)

$K_{Д_i}$ – коэффициент, отражающий уровень доминирования решения.

Тогда показатель экономической эффективности ГАП (D_{ε}) при заданном распределении по заявкам и с учётом уровня доминирования вариантов характера перевозок определяется по формуле:

$$D_{\varepsilon_k} = \sum_{i=1}^m \Pi_{ik} d_{\varepsilon_i}, \quad k = 1, 2, \dots, p, \quad (4.20)$$

где Π_{ik} – доля заявок i -го типа k -му варианту распределения провозных возможностей АТП при оперативно-производственном планировании ГАП.

Наиболее эффективный вариант распределения провозных возможностей АТП по типам заявок должен выполняться с соблюдением условия:

$$D_{\varepsilon_{opt}} = \max_k D_{\varepsilon_k}, \quad (4.21)$$

где D_{ε_k} – возможные варианты распределения провозных возможностей по типам поступивших заявок при оперативно-производственном планировании перевозок.

Таким образом, разработанный протокол маршрутизации позволяет не только определить оптимальный маршрут АТС, но и эффективно распределять АТС по типам заявок с учетом актуальных тарифов на перевозки. Приведем пример расчёта эффективности применения АТС для заданных условий ГАП и с учётом действующих тарифов исследуемого предприятия приведены представлены на в табл. 4.6 и 4.7.

Таблица 4.6 – Определение показателя экономической эффективности ГАП по каждому варианту перевозок

Характер заявки	k_1	k_2	k_3	$d_э$
1. Постоянный	62,00	14,72	343,87	59,77
2. Непостоянный	51,46	13,68	457,58	14,84
3. Эпизодический	41,54	11,6	568,55	101,21

Таблица 4.7 – Определение эффективного варианта распределения провозных возможностей АТП по типам заявок

Характер заявки	Вариант распределения					
	1	2	3	4	5	6
1.Постоянный	1	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6
2.Непостоянный	0	0,2	0,2	0,2	0,1	0
3.Эпизодический	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4
	$\Pi_{ik}d_{эi}$					
4.Постоянный	59,7798	47,820	41,8459	35,8679	35,8679	35,8679
5.Непостоянный	0	2,96905	2,96905	2,96905	1,48452	0
6.Эпизодический	0	0	10,1211	20,2422	30,3633	40,4844
	$D_{эk}$					
	59,7798	50,7929	54,9360	59,0791	67,7157	76,3523

На рисунках 4.8 и 4.9 приведены диаграммы, отражающие влияние распределения провозных возможностей АТП в зависимости от характера заявки на значение интегрального показателя эффективности ГАП.

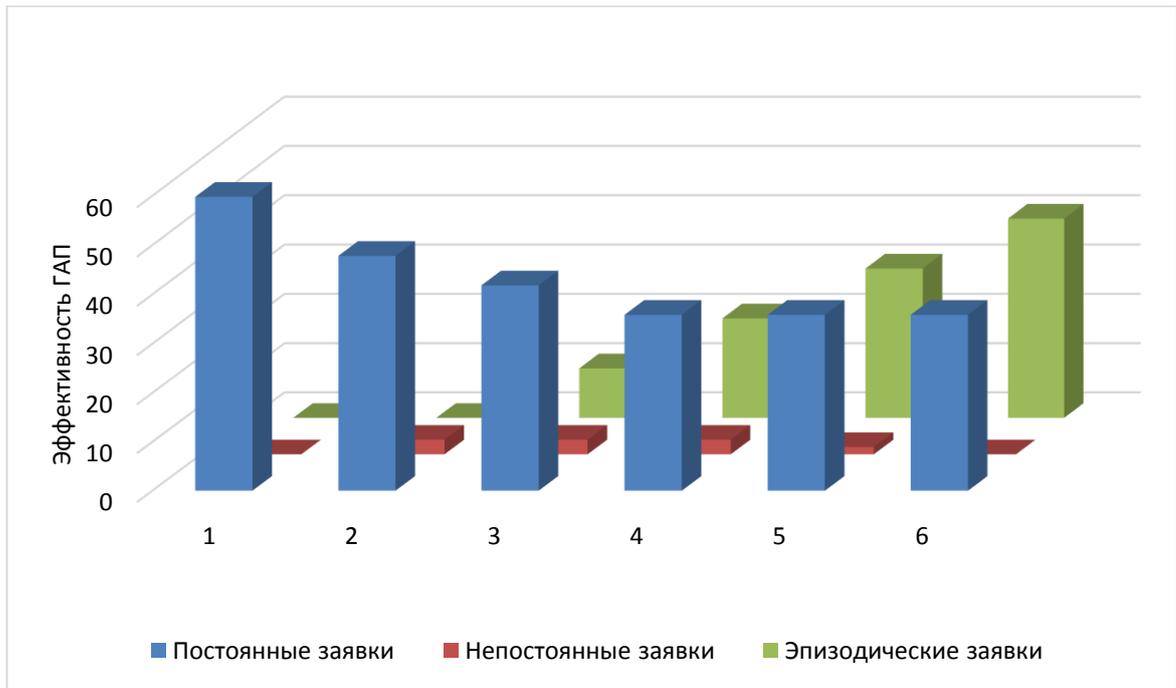


Рисунок 4.8 – Значение интегрального показателя эффективности ГАП по типам заявок и в зависимости от распределения провозных возможностей АТС

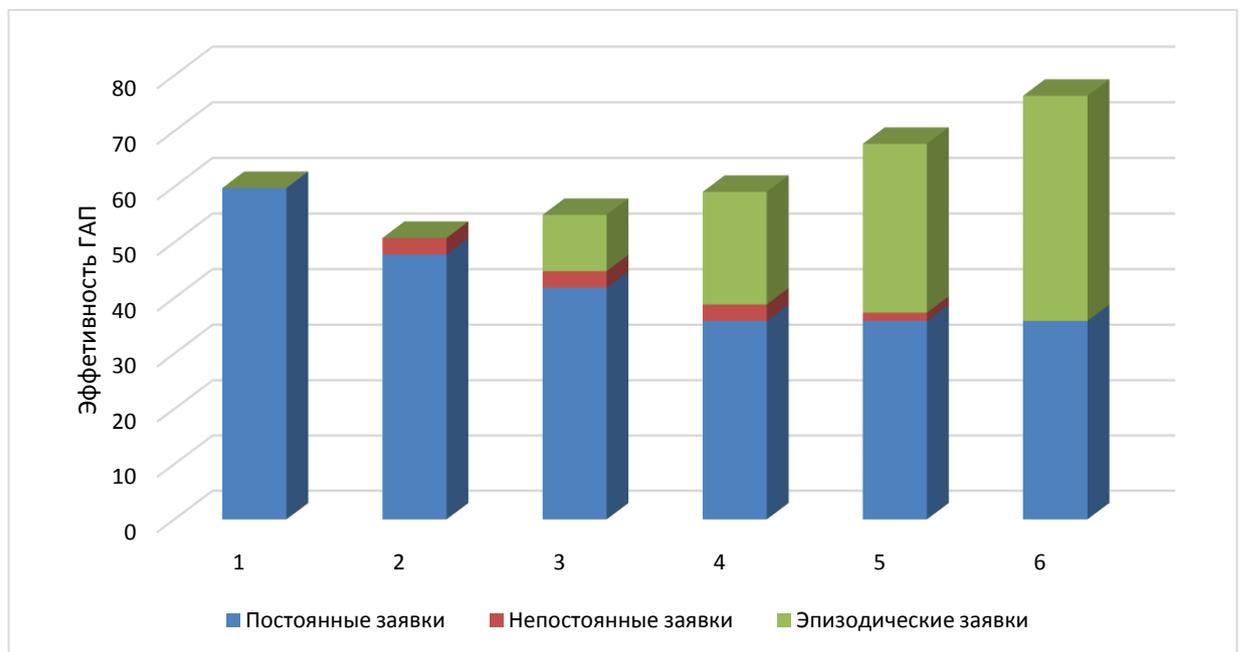


Рисунок 4.9 – Значение суммарного показателя эффективности ГАП в зависимости от распределения провозных возможностей АТС

Из представленных диаграмм видно, что решение о выборе маршрута перевозки грузов в современных условиях мегаполиса в многом зависит не только от ТЭП работы АТС, но и от факторов нестабильной конъюнктуры рынка. Например, значение результативных показателей ГАП при реализации эпизодических заявок значительно выше, чем при реализации заявок, носящих постоянный или непостоянный характер. Полученные результаты говорят о значительной степени влияния многочисленных факторов технико-эксплуатационного и экономического характера на эффективность процесса ГАП в ГДТС. Решать объективно данные задачи в условиях значительной степени неопределенности стохастической природы факторов в «ручном» режиме невозможно. Разработанный аналитический аппарат (маршрутизатор) и программное обеспечение на его основе (протокол маршрутизации) позволяют в автоматизированном режиме формировать оптимальные развозочные, сборные и развозочно-сборные маршруты в динамически нестабильных внешних условиях и с учетом неограниченного количества критериев эффективности.

Выводы по четвёртой главе

В четвёртой главе была апробирована разработанная методика определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок оперативно-производственного планирования перевозок, состоящая из двух основных элементов: теоретического обеспечения (маршрутизатора) и реализующего его программного обеспечения (протокола маршрутизации). Аналитический аппарат маршрутизатора предполагает возможность выбора эффективного действия при наличии стохастической неопределённости, когда отсутствует информация, гарантирующая обоснованное применение известных стохастических законов распределения случайных величин (нормальный, логарифмически нормальный и др.).

1. При формировании исходного для расчётов графа исследуемой системы в качестве дискретных состояний могут и должны рассматриваться не только участки, где АТС прекращает движение в связи с необходимыми процедурами грузопереработки, но и состояния сети, где происходит резкое изменение режимов движения АТС. Например, в силу загруженности «пробки» на том или ином участке сети, что особенно важно в условиях мегаполисов.
2. Разработанная модель работает с неограниченным количеством входов в систему (показателей), поэтому в базы данных могут и должны быть включены не только результативные показатели АТС (пробег, объем перевозки, грузооборот и т. д.), но результативные показатели грузоперерабатывающих пунктов (производительность ПРР, время ожидания при ПРР и т. д.)
3. Для условий сложная структура тарифообразования, то есть, когда применяются различные тарифы в зависимости от расстояния перевозок, объёма перевозок или времени, разработан интегральный показатель экономической эффективности ГАП, позволяющий определить эффективность распределения провозных возможностей АТП по типам заявок в динамически нестабильных условиях рыночной конъюнктуры.

Перечисленные особенности разработанной модели маршрутизатора позволяют повысить достоверность оперативно-производственного планирования грузовых перевозок, исключить субъективные ошибки, определяемые наличием «человеческого фактора» и создать автоматизированную «интеллектуализированную» систему управления перевозками в автотранспортном предприятии (АТП) или транспортно-логистической компании (ТЛК). Апробация разработанной методики показала, что применение её в условиях мегаполиса (г. Санкт-Петербург) на одном постоянно действующем развозочном кольцевом сокращает сумму затрат на 48,458 тыс. руб./сут., а экономический эффект составит 35 136 тыс. руб./год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании установлено, что процессы оперативно-производственного планирования работы ТС, происходящие в динамически изменяющихся условиях среды взаимоотношений «потребитель-перевозчик» могут быть эффективно управляемы при переносе понятия объект управления с транспортного потока на отдельное транспортное средство, отдельную партию груза или отдельного пассажира. При этом требуется формирование объектно-ориентированных моделей управления в транспортной сети, определяющих оптимальные траектории перемещения отдельных объектов. Задача маршрутизации становится особенно актуальной при многовариантности и многоаспектности (многокритериальности) распределения грузовых потоков в динамически изменяющихся условиях внешней среды. В этом случае задача оптимальной маршрутизации может быть решена только на основе разработки специализированного математического аппарата, как аналитического инструмента принятия эффективных решений ПО на его основе.

Настоящим диссертационным исследованием обеспечена разработка методики определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок, позволяющей системно с учётом многокритериальной среды эксплуатации управлять коммерческой эксплуатацией подвижного состава грузовых автотранспортных предприятий:

- формализовать ГДТС, опираясь на информационные состояния системы, которые, в свою очередь, определяются возможными внутренними и внешними возмущениями.
- определены критерии делимости ГДТС, учитывающие гетерогенность элементов системы.
- разработаны инструменты управления и оптимизации функционирования в ГДТС с учётом потенциальных возможностей существующих методов теории принятия решений, позволяющие избежать недостатков

эвристических методов получения эффективных решений по определению весовых коэффициентов факторов;

- процедура получения ВКП полностью формализована, а, следовательно, легко реализуется в ПО.

Разработана аналитическая платформа ГДТС на основе задачи динамического программирования и метода районирования по принципу иерархического соотношения между вероятностями, позволяющая: выполнять обработку больших объемов данных ГДТС; выполнять анализ среды функционирования ГДТС с применением алгоритмов искусственного интеллекта неограниченному количеству критериев или признаков эффективности.

Выполнена разработка оптимизационной аналитической модели объектно-ориентированного управления и алгоритмов на ее основе:

1. Алгоритм и ПО решения задачи динамического программирования, реализующая принцип Беллмана, позволяющий оптимальную траекторию (маршрут) перемещения груза в ГДТС;
2. Аналитическая модель, алгоритм, методика и ПО определения оптимальных маршрутов при оперативно-производственном планировании перевозок в динамически изменяющихся условиях базируется на интеграции в задачу динамического программирования результатов решения задачи многокритериальной оптимизации при выборе управляющего действия для каждого дискретного состояния ГДТС.

Принципиальными преимуществами разработанной модели поиска эффективных решений в сложных информационно-аналитических системах больших баз данных и ПО на их основе являются: отсутствие формализованной связи между весами, получаемых для отдельных критериев и различных вариантов действий в ГДТС; полученное решение является максимально возможным с учётом исходных значений показателей эффективности по рассматриваемым критериям. Решение, получаемое в модели, позволит не только получить искомые Парето-оптимальные решения, но и значительно сократить количество вычислительных процедур, необходимых для их поиска.

Определена целесообразность применения терминов «протокол маршрутизации» и «маршрутизатор», как аналогов в модели поиска оптимальных решений на основе теории планирования и передачи пакетов данных по Интернету. Таким образом, разработанная методика, состоит из двух основных элементов: теоретического обеспечения (маршрутизатора) и реализующего его программного обеспечения (протокола маршрутизации). Аналитический аппарат маршрутизатора предполагает возможность выбора эффективного действия при наличии стохастической неопределённости, когда отсутствует информация, гарантирующая обоснованное применение известных стохастических законов распределения случайных величин и обладает следующими уникальными возможностями:

1. При формировании исходного для расчётов графа исследуемой системы в качестве дискретных состояний могут и должны рассматриваться не только участки, где АТС прекращает движение в связи с необходимыми процедурами грузопереработки, но состояния сети, где происходит резкое изменение режимов движения АТС. Например, в силу загруженности «пробки» на том или ином участке сети, что особенно важно в условиях мегаполисов.
2. Разработанная модель работает с неограниченным количеством входов в систему (показателей), поэтому в базы данных могут и должны быть включены не только результативные показатели АТС (пробег, объем перевозки, грузооборот и т. д.), но результативные показатели грузоперерабатывающих пунктов (производительность ПРР, время ожидания при ПРР и т. д.)

Для условий сложной структура тарифообразования, то есть, когда применяются различные тарифы в зависимости от расстояния перевозок, объёма перевозок или времени, разработан интегральный показатель экономической эффективности ГАП, позволяющий определить эффективность распределения провозных возможностей АТП по типам заявок в динамически нестабильных условиях рыночной конъюнктуры.

Причисленные особенности разработанной модели маршрутизатора позволяют повысить достоверность оперативно-производственного планирования грузовых перевозок, исключить субъективные ошибки, определяемые наличием «человеческого фактора» и создать автоматизированную «интеллектуализированную» систему управления перевозками в автотранспортном предприятии (АТП) или транспортно-логистической компании (ТЛК).

Апробация разработанной методики показала, что применение её в условиях мегаполиса (г. Санкт-Петербург) на одном постоянно действующем развозочном кольцевом сокращает сумму затрат на 48,458 тыс. руб./сут., а экономический эффект составит 35 136 тыс. руб./год.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АТ – автомобильный транспорт
- АТП – автотранспортное предприятие
- БАТСДГ – большая автотранспортная система доставки грузов
- ГАП – грузовые автомобильные перевозки
- ГАПТ – грузовое автотранспортное предприятие
- ДСУ – динамическая система управления
- ИС – информационная система
- ИСУ – интеллектуальная система управления
- ИТС – интеллектуальная транспортная система
- ЛПР – лицо, принимающее решение
- ООМУ – объектно-ориентированные модели управления
- ООП – объектно-ориентированный подход
- ОТС – общая теория систем
- ПО – программное обеспечение
- ПОП – предметно-ориентированный подход
- СПР – стратегия принятия решений
- СТП – система транспортного планирования
- СУБД – система управления базами данных
- ТЛК – транспортно-логистический комплекс
- ТЛС – транспортно-логистические системы
- ТСС – теория сложных систем
- ТЭП – технико-эксплуатационные показатели

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. №1734-р.
2. Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики. Грузовые перевозки в России: обзор текущей статистики. Выпуск №53, сентябрь 2019. Электронный ресурс. Режим доступа. <http://www.ac.gov.ru/publications/>
3. Николин В. И., Ветвицкий Е.Е., Молчалин С. М. Грузовые автомобильные перевозки. – Омск: Вариант-Сибирь, 2004. – 480 с.
4. Миротин Л.Б., Ташбаев Ы.Э., Гудков В. А. Транспортная логистика: Учебник для транспортных вузов. / Под общ. ред. Л.Б. Миротина. – М.: Издательство «Экзамен», 2002. – 512 с.
5. Грузовые автомобильные перевозки: учебник для вузов / А.В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. В. Куликов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 560 с.
6. Горев А.Э. Грузовые автомобильные перевозки: учеб. пособие. 5-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 288 с.
7. Мишарин А.С., Евсеев О. В. Актуализация Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 20230 года/Транспорт Российской Федерации» № 2 (45) 2013 г, С 4–13.
8. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 395 с.
9. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. - М.: Высшая школа, 2001. - 208 с.
10. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов, — 6-е изд. стер. - М.: Высш. шк., 1999. - 576 с.
11. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Высш. шк., 2001. - 479 с.
12. Джексон, П. Введение в экспертные системы, 3-е изд. -М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 624 с.

13. US Public Law 102-240, Intermodal Surface Transportation Efficiency Act of 1991
14. US Public Law 105-178 Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA-21), 1998
15. Arterial Control and Integration // WS DOT, 1990
16. History of Intelligent Transportation Systems // U.S. department of transportation, report FHWA-JPO-16-329, 2016.
17. Arterial Control and Integration // WS DOT, 1990
18. US Public Law 102-240, Intermodal Surface Transportation Efficiency Act of 1991
19. US Public Law 105-178 Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA-21), 1998.
20. Integrated arterial and freeway operation control strategies for IVHS advanced traffic management // The university of Texas at Austin, 1998
21. ITMS Operational Test of Advanced Traffic Management and Traveler Information Systems in the Twin Cities Metropolitan Area // Minnesota Department of Transportation, 1992.
22. Ma J. An efficiency-Equity Solution to The Integrated Transportation Corridor Control Design Problem // University of California, 2008
23. 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.
24. Coordination of Freeway Ramp Meters and Arterial Traffic Signals Field Operational Test // Institute of Transportation Studies, California PATH Program, 2013
25. Coordinated Freeway and Arterial Operations Handbook // FHWA, 2006
26. Tian Z.Z., Balke K., Engelbrecht R., Rilett L. Integrated Control Strategies for Surface Street and Freeway Systems // Transportation Research Record 1811, Paper No. 02-2537, 2002.
27. Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice // National Cooperative Highway Research Program, 2010.

28. Highway Traffic Operations and Freeway Management: State-of-the-Practice // U.S. department of transportation, report FHWA-OP-03-076, 2013
29. Synthesis of Active Traffic Management Experiences in Europe and the United States // FHWA, 2010.
30. Active Traffic Management for Arterials // National Cooperative Highway Research Program, 2013.
31. Inter-jurisdictional Coordination for Traffic Management in “Large City Technical Exchange and Assistance Program” // New York University, 2000.
32. Building the ITI: Putting the National Architecture into Action, Mitretek Systems, FHWA, April 1996.
33. Егунов М. М., Шувалов В. П. Анализ структурной надёжности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54–60.
34. Холодов Я. А. и др. Моделирование транспортных потоков—актуальные проблемы и перспективы их решения // ТРУДЫ МФТИ. 2010. Т. 2. № 4. С. 152.
35. Дышленко С. Г. Маршрутизация в транспортных сетях/ Интеллектуальные ИТ в управлении//ИТНОУ. 2018. №1. – С 15–20.
36. Лёвин Б. А. Информационное моделирование при управлении транспортом // Перспективы науки и образования. 2017. № 3 (27). С. 50–54.
37. Цветков В. Я. Информационные модели объектов, процессов и ситуаций // Дистанционное и виртуальное обучение. 2014. № 5. С. 4–11.
38. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Объектные и ситуационные модели при управлении транспортом // Наука и технологии железных дорог. 2017. № 2 (2). С. 2–10.
39. Лотоцкий В.Л. Информационная ситуация и информационная конструкция // Славянский форум. 2017. № 2 (16). С. 39–44.
40. Tsvetkov V.Ya. Information Interaction as a Mechanism of Semantic Gap Elimination // European researcher. Series A. 2013. № 4–1 (45). p. 782–786.
41. Цветков В. Я. Ситуационное моделирование в геоинформатике // Информационные технологии. 2014. № 6. С. 64–69.

42. Розенберг И. Н. Информационная ситуация как сложная система // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 3 (20). С. 69–77.
43. Павлов А. И. Пространственная информационная ситуация // Славянский форум. 2016. ПРИКЛАДНАЯ ГЕОИНФОРМАТИКА 20 ИТНОУ. 2018. № 1. № 4 (14). С. 198–203.
44. Цветков В. Я. Логистика информационных потоков в распределенных системах // Наука и технологии железных дорог. 2017. № 1 (1). С. 34–44.
45. Корячко В. П., Перепелкин Д. А. Анализ и проектирование маршрутов передачи данных в корпоративных сетях. – М.: Горячая линия –Телеком, 2012. 236 с.
46. Цветков В. Я., Алпатов А. Н. Управление распределенными транспортными потоками // Государственный советник. 2014. № 3. С. 55–60.
47. Андреев К. П., Терентьев В. В. Информационное моделирование в проектировании транспортных сетей городов // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2016. №. 117–2. С. 108–110.
48. Бабичева Т. С. и др. Двухстадийная модель равновесного распределения транспортных потоков //Труды Московского физико-технического института. 2015. Т. 7. №. 3. С. 31–41.
49. Вельможин, А.В. Об особенностях функционирования транспорта в условиях рынка / А.В. Вельможин, В. А. Гудков//. Бизнес и логистика-2003: матер. V Московского межд. логистического форума, Москва. - 2003.- С.144 – 146.
50. Вельможин, А.В., Теории транспортных процессов и систем: Учебное пособие / А.В. Вельможин, В. А. Гудков, Л.Б. Миротин. - М.: Транспорт, 1998. – 167 с.
51. Вельможин, А.В.Технология, организация и управление грузовыми автомобильными перевозками: Учебник для вузов. / А.В. Вельможин, В. А. Гудков, Л.Б. Миротин. – Волгоград: ВГТУ, 1999. – 296 с.
52. Витвицкий, Е.Е. Автомобильные перевозки строительных грузов в городах / Е.Е. Витвицкий // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2005. - № 2. – С. 53–67.

53. Воркут, А.И. Грузовые автомобильные перевозки: Учебное пособие, 2-е изд., перераб. и доп. / А.И. Воркут. - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. - 447 с.
54. Горев, А.Э. Основы теории транспортных систем: Учебное пособие / А.Э. Горев. - СПб.: СПбГАСУ, 2010. - 214 с.
55. Гудков, В.А. Обеспечение безопасности и эффективности межрегиональных автомобильных перевозок / В. А. Гудков, Е. Ю. Серова // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: Матер. межд. науч.-техн. конф., Пенза: ПГУАС. - 2012. - С. 45–49.
56. Корчагин, В.А. Маркетинг на транспорте: Учебное пособие / В. А. Корчагин. - Липецк: ЛГТУ, 1999. – 230 с.
57. Корчагин, В.А. Методические основы управления потоковыми процессами на автомобильном транспорте: Учебное пособие для вузов / В. А. Корчагин, С.А. Ляпин. - Липецк: ЛГТУ, 2007. – 246 с.
58. Корчагин, В. А. Кибернетический подход к управлению открытыми автотранспортными системами / В. А. Корчагин, А. А. Турсунов, Ю. Н. Ризаева // Вестник ТТУ. – 2010. - № 1 (9). - С. 50–53.
59. Корчагин, В.А. Математическая модель управления грузовыми транспортно-логистическими системами с переменной структурой / В. А. Корчагин, С.А. Ляпин, Ю. Н. Ризаева, Е. А. Лебедев // Транспорт: наука, техника, управление. – 2012. - № 3. – С. 30–32.
60. Лукинский, В.С. Логистика автомобильного транспорта: концепции, методы, модели: Учебник для вузов / В.С. Лукинский, В.И. Бережной, Е.В. Бережная, И.А. Цвиринько. - М: Финансы и статистика, 2000. – 280 с.
61. Миротин, Л.Б. Логистика интегрированных цепочек поставок: Учебник / Л.Б. Миротин, А. Г. Некрасов. - М.: Издательство «Экзамен», 2003. - 256 с.
62. Пугачев, И.Н. Методология развития эффективного и безопасного функционирования транспортных систем городов: Монография / И. Н. Пугачев. - Владивосток: Дальнаука, 2009. – 260 с.
63. 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.
64. Рассоха, В.И. Ситуационное управление автотранспортными системами (Ч. 2. Синтез системы управления) / В.И. Рассоха // Вестник ОГУ. - 2009. - № 10. - С. 144–150.
65. Варакин В. В. Совершенствование сменно-суточного планирования работы подвижного состава грузового автотранспортного предприятия: автореф. дис. ... к-та. техн. наук: 05.22.10. / Варакин Владислав Владимирович. – Омск 2012. – 18 с.
66. Войтенков С. С. Совершенствование оперативного планирования перевозок грузов помашинными отправлениями в городах: дис. ... к-та. техн. наук: 05.22.10/ Войтенков Сергей Сергеевич. – Иркутск 2011, - 233 с.
67. Менухова Т. А. Оптимизация оперативного планирования междугородных грузовых автомобильных перевозок: дис. ... к-та. техн. наук: 05.22.10/ Менухова Татьяна Анатольевна. – Санкт-Петербург, -124 с.
68. Ёлкин А. В. Оптимизация парка автотранспортных и погрузочных средств на предприятиях пивоваренной отрасли с учетом неравномерности потребления готовой продукции: дис. ... к-та. техн. наук: 05.13.10/ Ёлкин Андрей Вячеславович. - Тверь, 2006–136 с.
69. Котова И. В. Динамическая оптимизация величины и структуры парка подвижного состава для отгрузки готовой продукции металлургического комбината: дис. ... к-та. техн. наук: 05.22.01, Котова Ирина Викторовна. – Липецк, 2015, - 185 с.
70. Шаповал Д.В. Совершенствование оперативного планирования перевозок мелкопартионных грузов автомобилями на радиальных маршрутах в городах. дис. ... к-та. техн. наук: 05.22.10/ Шаповал Дмитрий Владимирович. –Омск, 2012, - 138 с.
71. Никаноров В. М. Математические методы решения задачи маршрутизации мелкопартионных перевозок/ Научно-технические ведомости. Экономические науки. СПбГПУ, №6. 2011, С 222–226.

72. Беллман, Р. Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере/ Р. Беллман // Кибернетический сборник. – 1964. – Вып. 9. – С. 219–222.
73. Геронимус, Ю.В. Имитационное моделирование производственно-транспортной системы / Ю.В. Геронимус // Основные методические положения применения имитационного моделирования в экономических исследованиях: сб. ст. / под ред. К.А. Багриновского. – М.: ЦЭМИ АН СССР, 1988. – 220 с.
74. Житков, В.А. Планирование автомобильных перевозок грузов мелкими партиями / В. А. Житков. – М.: Транспорт, 1976. – 112 с.
75. Житков, В.А. Методы оперативного планирования грузовых автомобильных перевозок / В. А. Житков, К. В. Ким. – М.: Транспорт, 1984. – 213 с.
76. Канторович, Л.В. Проблемы эффективного использования и развития транспорта / Л. В. Канторович. – М.: Наука, 1989. – 304 с.
77. Ким, С.В. Об одной задаче составления графика / С. В. Ким, Г.А. Крайнов, Е.В. Сурменов // Экономика и математические методы. – 1976. – № 4. – С. 768–772.
78. Литтл, Дж. Алгоритм решения задачи коммивояжера // Экономика и математические методы [Текст] / Дж. Литтл и др. – 1965. – № 1. – С. 94–107.
79. Мартин, Э. Алгоритм приближенного решения задачи о часовых графиках [Текст] / Э. Мартин // Механизация учета, отчетности и вычислительных работ. – Вып. 2. – М.: Статистика, 1967. – С. 83–84.
80. Орлов, Д.М. Составление почасовых графиков поставок бетона с учетом минимизации простоев бетономешалок и автотранспорта/ Д. М. Орлов // Оперативное управление производством: тез. докл. – Л.: ЛДНТИ, 1968. – 36 с.
81. Clark, G. Sheduling of vehicles from a central depot to a few delivery points [Text] / G. Clark, J. Wright // Operational Research Quarterly. – 1964. – Vol. 12, no. 4. – P. 568–581.

82. Evans, S.R. The impact of a decision-support system for vehicle routing in foodservice supply situation / S.R. Evans, J.P. Norback // *Operational Research Quarterly*. – 1985. – Vol. 36, no. 4. – P. 467–472.
83. Groes, G. A Method for Solving Travelling Salesman Problems [Text] / G. Groes // *Operations Research*. – 1958. – Vol. 6, no. 5. – P. 791–812. 18. Miller, C.E. Integer programming formulation of travelling salesman problems [Text] / C.E. Miller, A.W. Tucker, R.A. Zemlin // *J. Assoc. Comput. Mach.* – 1960. – No. 4. – P. 326–329.
84. Филиппов Д.В. Управление и оптимизация процесса формирования маршрутов поставок потребительских товаров в распределительных центрах: автореф. дис. ... к-та. экон. наук: 08.00.05/ Филиппов Дмитрий Вячеславович. – Москва 2012, - 23 с.
85. Прудовский, Б.Д. Количественные методы управления автомобильным транспортом. – М.: Транспорт, 1976 г., 87 с
86. Прудовский, Б.Д. Математическое обеспечение АСУ в транспортном управлении. Б.Д. Прудовский, М.Г. Керзнер, Г. И. Трофимова. – М.: Транспорт, 1976 г., 89 с.
87. Прудовский, Б.Д. Управление технической эксплуатацией автомобилей по нормативным показателям / Б.Д. Прудовский, В.Б. Ухарский. –М.: Транспорт, 1990 г. – 239 с.
88. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // *Numerische mathematik*. 1959. Т. 1. № 1. С. 269–271.
89. Hiroki Sayama. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. — Open SUNY Textbooks, Milne Library. State University of New York at Geneseo, 2015. - 498p.
90. Цветков, В.Я. Эмерджентизм /В. Я. Цветков // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2017. – № 2–1. – С. 137-138.
91. Эшби, У.Р. Принципы самоорганизации/У. Р. Эшби — М.: Мир, 1966. 332с.

92. Цветков, В.Я. Когнитивные аспекты построения виртуальных образовательных моделей/ В. Я. Цветков// Перспективы науки и образования- 2013. -№3. С38-46.
93. Simon, H.A. “The architecture of complexity” Proceedings of the American Philosophical Society, vol. 106, no. 6, pp. 467–482, 1962 год.
94. Корнаков, А.Н. Модель сложной организационно-технической системы // Перспективы науки и образования/А.Н.Корнаков — 2015. — №2. – с.44-50.
95. Парсонс, Т. Социальные системы/Т. Парсонс //Личность. Культура. Общество. – 2003. – Т. 5. – №. 1-2. – С. 169-203.
96. Цветков, В.Я. Систематика сложных систем/ В. Я. Цветков//Современные технологии управления. [№7 \(79\)](#). Номер статьи: 7903. Дата публикации: 31.07. 2017-07-3. Режим доступа: <https://sovman.ru/article/7903/>.
97. Tsvetkov V. Ya., Lobanov A.A. Big Data as Information Barrier // European researcher, Series A. 2014, Vol. (78), № 7-1, p. 1237-1242.
98. *Гитман М.Б.* Управление социально- техническими системами с учетом нечетких предпочтений: Учебн. пособие /М.Б. Гитман, В.Ю. Столбов, Р.Л. Гилязов. - М.: Высшая школа, 2011, 272 с.
99. *Губко М. В.* Теория игр в управлении организационными системами: Учебн. пособие / М. В. Губко, Д.А. - М.: Синтег, 2002. 148 с.
100. *Новиков Д. А.* Курс теории активных систем: Учебн. пособие / Д. А. Новиков, С. Н. Петраков. - М.: Синтег, 1999. 108 с.
101. Динер, И.Я. Районирование множества векторов состояния природы и задача выбора решения/И.Я. Динер //В кн.: Исследование операций. М.: Наука, 1972. С. 43–62.
102. Cooper, W. W. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software / W. W. Cooper, L. M. Seiford, K. Tone. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. – 318 p.
103. Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Application / A. Charnes, W. W. Cooper, A. Y. Lewin, L. M. Seiford. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994. – 513 pp.

104. Data Envelopment Analysis and Regression Approaches to Efficiency Estimation and Evaluation / W. F. Bowlin, A. Charnes, W. W. Cooper, H. D. Sherman // Annals of Operations Research. – 1985. – Vol. 2. – P. 113–138.p
105. Charnes, A. Measuring the Efficiency of Decision-Making Units / A. Charnes, W. W. Cooper, E. Rhodes // European Journal of Operational Research. – 1978. – Vol. 2. – P. 429–444.
106. Farrell, M. J. The Measurement of Productive Efficiency / M. J. Farrell // Journal of The Royal Statistical Society, Series A (General), Part III. – 1957. – Vol. 120. – P. 253–281.
107. Grossi, G. National Tourism Policy/ G. Grossi, A. Scappini//Analytical Frameworkfor the Evaluation of Efficiency and Effictiveness: The Case of Itali University della SvizzeraItaliana 2010. P.85.
108. Анализ эффективности функционирования сложных систем/ В. Е. Кривоножко, А. И. Пропой, Р. В. Сеньков, И. В. Родченков, П. М. Анохин // Автоматизация проектирования. – 1999. – № 1. – С. 2–7.
109. 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.
110. *Терентьев, А.В.* Многокритериальный показатель качества автомобиля. А. В. Терентьев. Вестник гражданских инженеров. – СПб: СПбГАСУ, 2015. –1(48), - С. 201–204.
111. *Терентьев, А.В.* Методы решения автотранспортных задач (статья) А. В. Терентьев. Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/125-19863>.
112. Терентьев А. В. Векторная оптимизация [Текст] / 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.

113. Терентьев А. В. Методы принятия решений в условиях неопределённого состояния «внешней среды» [Текст] / А. В. Терентьев, Б. Д. Прудовский // Транспортное планирование и моделирование: сб. трудов Международной научно-практической конференции (26–27 мая 2016) СПбГАСУ. – СПб., 2016. С. 145–149
114. Терентьев А. В. Методы районирования, как методы оптимизации автотранспортных процессов / А. В. Терентьев, Д. Б. Ефименко, М. Ю. Карелина // [Вестник гражданских инженеров](#). – СПб: СПбГАСУ, 2017. [№ 6 \(65\)](#). С. 291–294.
115. Б.Д. Прудовский. Методы определения множества Парето в некоторых задачах линейного программирования/ Б.Д. Прудовский, А. В. Терентьев // Записки Горного института. Том 211. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. С. 86–90
116. 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) СПбГАСУ. – СПб., 2016. С. 145–149.
117. Аналитические методы снятия неопределённости – основа цифровизации автотранспортного производства. А. В. Терентьев, С.С. Евтюков, Е. А. Карелина, Е. В. Куракина/ - СПб: Издательский дом «Петрополис», 2018 г. - 210 с.
118. *Edsger W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik, 1:269–271, 1959.*
119. *Boris V. Cherkassky, Andrew V. Goldberg, and Tomasz Radzik. Shortest paths algorithms. Mathematical Programming, Series A, 73:129–174, 1996.*
120. *Boris V. Cherkassky, Andrew V. Goldberg, and Craig Silverstein. Buckets, heaps, lists, and monotone priority queues. In Proceedings of the 8th Annual ACM–SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA'97), pages 83–92. IEEE Computer Society Press, 1997.*

121. *George B. Dantzig*. Linear Programming and Extensions. Princeton University Press, 1962.
122. *Eric V. Denardo and Bennett L. Fox*. Shortest-route methods: 1. Reaching, pruning, and buckets. *Operations Research*, 27(1):161–186, 1979.
123. *Ittai Abraham, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck*. Alternative routes in road networks. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, 18(1):1–17, 2013.
124. *Michael L. Fredman and Robert E. Tarjan*. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. *Journal of the ACM*, 34(3):596–615, July 1987.
125. *Andrew V. Goldberg*. A practical shortest path algorithm with linear expected time. *SIAM Journal on Computing*, 37:1637–1655, 2008.
126. *Ulrich Meyer*. Single-source shortest-paths on arbitrary directed graphs in linear average-case time. In *Proceedings of the 12th Annual ACM–SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA’01)*, pages 797–806, 2001.
127. *Mikkel Thorup*. Integer priority queues with decrease key in constant time and the single source shortest paths problem. In *35th ACM Symposium on Theory of Computing*, pages 149–158, New York, NY, USA, 2003. ACM
128. *Richard Bellman*. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 16:87–90, 1958.
129. *Christian Sommer*. Shortest-path queries in static networks. *ACM Computing Surveys*, 46(4), 2014.
130. *Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Andreas Nowatzyk, and Renato F. Werneck*. PHAST: Hardware-accelerated shortest path trees. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 73(7):940–952, 2013
131. *Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Thomas Pajor, and Renato F. Werneck*. Customizable route planning in road networks. submitted for publication, 2013.
132. *Robert Geisberger and Christian Vetter*. Efficient routing in road networks with turn costs. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental*

- Algorithms (SEA'11). Vol. 6630 of Lecture Notes in Computer Science, pages 100–111. Springer, 2011.
133. Андреев А. Ю. Алгоритмы маршрутизации в дорожно-транспортной системе/ А. Ю. Андреев, В. Д. Егоров, А. В. Терентьев// Вестник гражданских инженеров. 2021. №2 (85). С. 181–188.
134. *Reinhard Bauer, Daniel Delling, Peter Sanders, Dennis Schieferdecker, Dominik Schultes, and Dorothea Wagner.* Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for Dijkstra's algorithm. ACM Journal of Experimental Algorithmics, 15(2.3):1–31, January 2010. Special Section devoted to WEA'08.
135. *Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck.* Hub label compression. In Proceedings of the 12th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA'13), volume 7933 of Lecture Notes in Computer Science, pages 18–29. Springer, 2013.
136. Демин В. А. Методология планирования, организации и управления терминально-складскими комплексами в транспортно-логистических системах. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.10/Демин Василий Александрович. –Москва, 2019, - 36 с.
137. Горев, А.Э. Грузовые автомобильные перевозки: учеб. пособие. 5-е изд. /А.Э. Горев. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 288 с.
138. Повышение эффективности грузовых перевозок на основе создания устойчивой транспортно-логистической системы модульного типа для высокоскоростной обработки и доставки грузов: монография/ Л.Б. Миротин, А. Г. Некрасов, В. А. Гудков и др. Под общ. ред. Л. Б. Миротина и А. Г. Некрасова. – М.: Техполиграфцентр, 2013. - 232 с. (Серия «Инженерная логистика»).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Листинг программного обеспечения определения оптимальной траектории движения транспортного средства

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Globalization;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
namespace WindowsFormsApp2
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        Calculation1 MainCalculation = new Calculation1();
        Criteria MainCriteria = new Criteria();
        public int[,] Connection; // массив вершин связей
        public int[] ConnectionValue; // массив значений связей
        TaskCompletionSource<bool> _tcs;
        bool button3Visible = true; // видимость кнопки "занести данные"
        bool isColumnAdded = true; // добавление третьего столбца в dataGridView1
        bool CalculationButtonVis = true; // видимость кнопки "выбрать"
        bool button11Vis = true; // видимость кнопки "след связь"
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }
        private void textBox1_TextChanged(object sender, EventArgs e) // ввод количества вершин
        {
            ReadInputValues();
        }
        private void ReadInputValues() // считывает введенное количество вершин
        {
            int temp;
            try
            {
                temp = int.Parse(textBox1.Text);
            }
            catch (FormatException)
            {
                MessageBox.Show("Количество вершин должно быть целым числом");
                return;
            }
            catch (NullReferenceException)
            {
                MessageBox.Show("Значение коэффициента не может быть пустым");
                return;
            }
            catch (ArgumentNullException)
            {
                MessageBox.Show("Значением коэффициента не может быть пустым");
                return;
            }
            MainCalculation.SetVertex(temp);
        }
        private void ReadInputCriteria() // считывает количество критериев
        {
            int temp;
            try

```

```

{
    temp = int.Parse(textBox2.Text);
}

catch (FormatException)
{
    MessageBox.Show("Количество критериев должно быть целым числом");
    return;
}
catch (NullReferenceException)
{
    MessageBox.Show("Значение коэффициента не может быть пустым");
    return;
}
catch (ArgumentNullException)
{
    MessageBox.Show("Значением коэффициента не может быть пустым");
    return;
}
MainCriteriaions.SetN(temp);
}
private void CreateTableForConect(int M) // созд таблицы, M - количество вершин
{
    dataGridView1.ColumnCount = 1;
    if (M == 1)
    {
        MessageBox.Show("Количество вершин не может быть меньше 2");
        M++;
    }
    if (M == 0)
    {
        MessageBox.Show("Количество вершин не может быть меньше 2");
        M += 2;
    }
    dataGridView1.RowCount = Convert.ToInt32(MainCalculation.Factorial_ForConect(M) /
(MainCriteriaions.Factorial(2) * MainCalculation.Factorial_ForConect(M - 2)));
    dataGridView1.RowHeadersWidth = 50;
    dataGridView1.Columns[0].HeaderText = "Вершины";
    dataGridView1.Rows[0].DefaultCellStyle.Alignment =
DataGridviewContentAlignment.MiddleCenter;
    dataGridView1.Columns[0].DefaultCellStyle.Alignment =
DataGridviewContentAlignment.MiddleCenter;
    int[] arr = null;
    int[] set = new int[dataGridView1.RowCount * 2];
    Connection = new int[dataGridView1.RowCount, 2]; // массив связей
    string testoutput = "";
    int k = 0;
    while ((arr = MainCalculation.generateCombinations(arr, M)) != null)
    {
        for (int i = 0; i < 2; i++)
            set[i + k] = arr[i];
        k = k + 2;
    }
    k = 0;
    for (int i = 0; i < dataGridView1.RowCount; i++)
    {
        for (int j = 0; j < 2; j++)
        {
            testoutput += Convert.ToString(set[j + k]) + " ";
            Connection[i, j] = set[j + k];
        }

        dataGridView1[0, i].Value = testoutput;
        testoutput = "";
        k = k + 2;
    }

    MainCalculation.SetConnectionVertex(Connection);
}

```

```

        dataGridView1.AllowUserToAddRows = false;
        dataGridView1.RowHeadersVisible = false;
// добавление чекбоксов в таблицу
        DataGridViewCheckBoxColumn col1 = new DataGridViewCheckBoxColumn();
col1.DataPropertyName = "field1_name";
        dataGridView1.Columns.Add(col1);
        col1.Width = 23;
        for (int i = 0; i < dataGridView1.RowCount; i++)
            dataGridView1.Rows[i].Cells[1].Value = false;
    }
    private void CreateTableForCriteria(int N)
    {
        int[,] probabilityArr = new int[MainCriteriaions.GetFactorialN(), N];
        int[] initialdata = new int[N];
        for (int i = 0; i < N; i++)
            initialdata[i] = i + 1;
        int icountforprobabilityarray = 0;
        MainCriteriaions.Generate(0, N, initialdata, ref probabilityArr, ref
icountforprobabilityarray);
        dataGridView2.Rows.Clear();
        dataGridView2.RowCount = MainCriteriaions.GetFactorialN() < MainCriteriaions.GetM() ?
MainCriteriaions.GetM() : MainCriteriaions.GetFactorialN();
        dataGridView2.ColumnCount = 2;
        for (int i = 0; i < MainCriteriaions.GetFactorialN(); i++)
        {
            dataGridView2[0, i].Value = i + 1;
            for (int j = 0; j < MainCriteriaions.GetN(); j++)
            {
                dataGridView2[1, i].Value += "K" + probabilityArr[i, j] + ">";
            }
            dataGridView2[1, i].Value = dataGridView2[1, i].Value.ToString().Substring(0,
dataGridView2[1, i].Value.ToString().Length - 1);
        }
        dataGridView2.AllowUserToAddRows = false;
        dataGridView2.RowHeadersVisible = false;
// добавление чекбоксов в таблицу
        DataGridViewCheckBoxColumn col1 = new DataGridViewCheckBoxColumn();
col1.DataPropertyName = "field1_name";
        dataGridView2.Columns.Add(col1);
        col1.Width = 30;
    }
    private void button1_Click(object sender, EventArgs e) // кнопка OK
    {
        MainCalculation.SetCOUNT_connectArr(0);
        MainCalculation.SetZeroCOUNT_M(0);
        MainCalculation.SetZerorowIter(0);
        isColumnAdded = true;
        button3.Visible = true;
        CalculationButtonVis = true;
        button11.Visible = true;
        AlldataGridView.Rows.Clear();
        OutputGridView.Rows.Clear();
        dataGridView2.Rows.Clear();
        ReadInputValues();
        CreateTableForConect(MainCalculation.GetV());
        ReadInputCriteria();
        CreateTableForCriteria(MainCriteriaions.GetN());
    }
// обработка нажатия кнопок "определить связь"
    private void dataGridView1_CellClick(object sender, DataGridViewCellEventArgs e)
    {
        for (int i = 0; i < dataGridView1.RowCount; i++)
            if ((e.ColumnIndex == 1) && (e.RowIndex == i))
            {
                int k = 0;

```

```

        MainCriteriaions.SetCOUNTER(k);
    }
}
private void CreateTableForValues(int M, int N, int countConect, int[] tempj)
{
    InputGridView.Rows.Clear();
    InputGridView.RowCount = M;
    InputGridView.ColumnCount = N;
    InputGridView.TopLeftHeaderCell.Value = "СВЯЗИ ";
    for (int i = 0; i < InputGridView.RowCount; i++)
        InputGridView.Rows[i].HeaderCell.Value = countConect.ToString() + " " +
tempj[i].ToString();
    InputGridView.RowHeadersWidth = 80;
    for (int i = 0; i < InputGridView.ColumnCount; i++)
        InputGridView.Columns[i].HeaderCell.Value = "К" + (i + 1).ToString();
}
private void OutputAllData() // вывод решений
{
    int[,] probabilityArr = MainCriteriaions.GetProbabilityArray();
    double[,] decisionArr = MainCriteriaions.GetDecisionCoefficientArray();
    int[] finalDArr = MainCriteriaions.GetFinalDArray();
    OutputGridView.ColumnCount = 4;
    int rowCount = MainCriteriaions.GetFactorialN() < MainCriteriaions.GetM() ?
MainCriteriaions.GetM() : MainCriteriaions.GetFactorialN();
    int rowIter = 0;
    for (int j = 0; j < rowCount; j++)
        OutputGridView.Rows.Add();
    rowIter = MainCalculation.GetrowIter();
    for (int i = 0; i < MainCriteriaions.GetFactorialN(); i++)
    {
        OutputGridView[0, rowIter + i].Value = i + 1;
        for (int j = 0; j < MainCriteriaions.GetN(); j++)
        {
            OutputGridView[1, rowIter + i].Value += "К" + probabilityArr[i, j] + ">";
        }
        OutputGridView[1, rowIter + i].Value = OutputGridView[1, rowIter +
i].Value.ToString().Substring(0, OutputGridView[1, rowIter + i].Value.ToString().Length - 1);
        string tempDvalue = "";
        for (int j = 0; j < MainCriteriaions.GetM(); j++)
            tempDvalue += "D" + (j + 1).ToString() + "=" + decisionArr[i, j] + "; ";
        tempDvalue += "\t\t";
        OutputGridView[2, rowIter + i].Value = tempDvalue + finalDArr[i];
    }
    Random random = new Random();
    int rand1 = 255 - random.Next(30);
    int rand2 = 255 - random.Next(30);
    int rand3 = 255 - random.Next(30);
    for (int i = 0; i < OutputGridView.ColumnCount; i++)
        for (int j = rowIter; j < OutputGridView.RowCount; j++)
            OutputGridView[i, j].Style.BackColor = Color.FromArgb(rand1, rand2, rand3);
    int[,] ConnectArrey = MainCalculation.DeleteRow(Connection);
    int COUNT_connect = 0;
    COUNT_connect = MainCalculation.GetCOUNT_connectArr();
    OutputGridView.RowHeadersWidth = 60;
    OutputGridView.TopLeftHeaderCell.Value = "Вершины";
    OutputGridView.Rows[rowIter].HeaderCell.Value = (COUNT_connect + 1).ToString();
    COUNT_connect++;
    MainCalculation.SetCOUNT_connectArr(COUNT_connect);
    MainCalculation.SetrowIter(rowCount);
}
private void NormalizeButton_Click(object sender, EventArgs e) // нормализовать
{
    for (int i = 0; i < InputGridView.ColumnCount; i++)
    {
        if (!(AlldataGridView[i, AlldataGridView.RowCount - 1].Value.ToString() == "max" ||
AlldataGridView[i, AlldataGridView.RowCount - 1].Value.ToString() == "min"))
        {

```

```

        MessageBox.Show("Не все связи (матрицы оптимизации) занесены в таблицу
нормализации");
        return;
    }
}
try
{
    for (int i = 0; i < AlldataGridView.ColumnCount; i++)
        for (int j = 0; j < AlldataGridView.RowCount - 1; j++)
            double.Parse(AlldataGridView[i, j].Value.ToString());
}
catch (FormatException)
{
    MessageBox.Show("Значением коэффициента может быть целое либо дробное число,
разделенное знаком 'запятая'");
    return;
}
catch (NullReferenceException)
{
    MessageBox.Show("Значением коэффициента не может быть пустым");
    return;
}
catch (ArgumentNullException)
{
    MessageBox.Show("Значением коэффициента не может быть пустым");
    return;
}
for (int i = 0; i < AlldataGridView.ColumnCount; i++)
{
    double maxvalue = 0;
    double minvalue = Int32.MaxValue;
    for (int j = 0; j < AlldataGridView.RowCount - 1; j++)
    {
        if (maxvalue < double.Parse(AlldataGridView[i, j].Value.ToString()) &&
AlldataGridView[i, AlldataGridView.RowCount - 1].Value.ToString() == "max")
        {
            maxvalue = double.Parse(AlldataGridView[i, j].Value.ToString());
        }
        if (minvalue > double.Parse(AlldataGridView[i, j].Value.ToString()) &&
AlldataGridView[i, AlldataGridView.RowCount - 1].Value.ToString() == "min")
        {
            minvalue = double.Parse(AlldataGridView[i, j].Value.ToString());
        }
    }
    double sum = 0;
    if (AlldataGridView[i, AlldataGridView.RowCount - 1].Value.ToString() == "max")
    {
        for (int j = 0; j < AlldataGridView.RowCount - 1; j++)
        {
            sum += double.Parse(AlldataGridView[i, j].Value.ToString()) / maxvalue;
            AlldataGridView[i, j].Value = (double.Parse(AlldataGridView[i,
j].Value.ToString()) / maxvalue).ToString("F3");
        }
    }
    if (AlldataGridView[i, AlldataGridView.RowCount - 1].Value.ToString() == "min")
    {
        for (int j = 0; j < AlldataGridView.RowCount - 1; j++)
        {
            sum += minvalue / double.Parse(AlldataGridView[i, j].Value.ToString());
            AlldataGridView[i, j].Value = (minvalue / double.Parse(AlldataGridView[i,
j].Value.ToString())).ToString("F3");
        }
    }
    for (int j = 0; j < AlldataGridView.RowCount - 1; j++)
        AlldataGridView[i, j].Value = (double.Parse(AlldataGridView[i,
j].Value.ToString()) / sum).ToString("F3");
    }
}
}

```

```

private void button4_Click(object sender, EventArgs e) // Кнопка "определить связи",
{
    InputGridView.Rows.Clear();
    AlldataGridView.Rows.Clear();
    int[,] ConnectionArr = GetConnection();
    button3Visible = true;
    for (int i = 0; i < dataGridView1.RowCount; i++)
    {
        bool isCellChecked = (bool)dataGridView1.Rows[i].Cells[1].Value;
        if (isCellChecked == false)
        {
            ConnectionArr[i, 0] = 0;
            ConnectionArr[i, 1] = 0;
        }
    }
    if (!CheckVertex())
    {
        SetConnection(ConnectionArr);
        Foo();
    }
    else
    {
        MainCalculation.SetCOUNT_connectArr(0);
        MainCalculation.SetZeroCOUNT_M(0);
        MainCalculation.SetZerorowIter(0);
        isColumnAdded = true;
        button3Visible = true;
        button3.Visible = true;
        CalculationButtonVis = true;
        button11Vis = true;
        button11.Visible = true;
        InputGridView.Rows.Clear();
        AlldataGridView.Rows.Clear();
        OutputGridView.Rows.Clear();
        dataGridView2.Rows.Clear();
        ReadInputValues();
        CreateTableForConect(MainCalculation.GetV());
    }
}
private bool CheckVertex() // проверяет наличие связей у всех вершин
{
    int count = 0;
    int temp = 1;
    bool check = false;
    for (int j = 0; j < MainCalculation.GetV() - 1; j++)
    {
        for (int i = 0; i < Connection.GetUpperBound(0) + 1; i++)
            if (Connection[i, 0] == temp)
                count++;
        if (count == 0) check = true;
        count = 0;
        temp++;
    }
    if (check == true) MessageBox.Show("Не для всех вершин установлены связи");
    return check;
}
async Task Foo() // асинхронный метод последовательного решения многокритериальной задачи
{
    int count = 0;
    int tempi = 1; // для запоминания i-ой строки ConnectArrey
    int countConect = 1; // счетчик строк массива ConnectArrey
    for (int j = 0; j < MainCalculation.GetV() - 1; j++)
    {
        int[] tempj = new int[MainCalculation.GetV()];
        int k = 0;
        for (int i = 0; i < Connection.GetUpperBound(0) + 1; i++)
            if (Connection[i, 0] == tempi)
            {

```

```

        count++;
        tempj[k] = Connection[i, 1];
        k++;
    }
    InputGridView.Refresh();
    MainCriterions.SetM(count);
    label4.Text = "Определение связей для вершины " + countConect;
    CreateTableForValues(MainCriterions.GetM(), MainCriterions.GetN(), countConect,
tempj);
//продолжение цикла после нажатия "След связь"
    _tcs = new TaskCompletionSource<bool>();
    await _tcs.Task;
    tempi++;
    count = 0;
    countConect++;
}
}
public void SetConnection(int [,] arrey)
{
    Connection = arrey;
}
public int[] GetConnectionValue()
{
    return ConnectionValue;
}
public int[,] GetConnection()
{
    return Connection;
}
private void button11_Click(object sender, EventArgs e) // определить след связь
{
    _tcs.SetResult(false);
}
// занести данные в общую таблицу для нормализации
private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
{
    try
    {
        for (int i = 0; i < InputGridView.ColumnCount; i++)
            for (int j = 0; j < InputGridView.RowCount; j++)
                double.Parse(InputGridView[i, j].Value.ToString());
    }
    catch (FormatException)
    {
        MessageBox.Show("Значением коэффициента может быть целое либо дробное число,
разделенное знаком 'запятая'");
        return;
    }
    catch (NullReferenceException)
    {
        MessageBox.Show("Значением коэффициента не может быть пустым");
        return;
    }
    catch (ArgumentNullException)
    {
        MessageBox.Show("Значением коэффициента не может быть пустым");
        return;
    }
}
CreateTableForAllData();
if (button3Visible == true) button3.Visible = true;
if (button3Visible == false)
{
    button3.Visible = false;
    button11.Visible = false;
    AlldataGridView.Rows.Add();
    AlldataGridView.Rows[AlldataGridView.RowCount - 1].HeaderCell.Value = "min-max";
    for (int i = 0; i < AlldataGridView.ColumnCount; i++)
        AlldataGridView[i, AlldataGridView.RowCount - 1].Value = "min";
}

```

```

        MessageBox.Show("Измените в таблице нормализации 'min' на 'max' при необходимости");
    }
    else button3Visible = true;
}
private void CreateTableForAllData() // создание общей таблицы для нормализации
{
    int count = MainCriterions.GetM();
    MainCalculation.SetCOUNT_M(count);
    AlldataGridView.ColumnCount = MainCriterions.GetN();
    AlldataGridView.RowHeadersWidth = 90;
    for (int i = 0; i < AlldataGridView.ColumnCount; i++)
        AlldataGridView.Columns[i].HeaderCell.Value = "K" + (i + 1).ToString();
    int[,] ConnectArrey = MainCalculation.DeleteRow(Connection);
    int COUNT_connect = 0;
    COUNT_connect = MainCalculation.GetCOUNT_connectArr();
    for (int j = 0; j < InputGridView.RowCount; j++)
        AlldataGridView.Rows.Add();
    AlldataGridView.TopLeftHeaderCell.Value = "Вершины";
    AlldataGridView.Rows[MainCalculation.GetCOUNT_M()
InputGridView.RowCount].HeaderCell.Value = (COUNT_connect + 1).ToString();
    if (COUNT_connect == MainCalculation.GetV()-2)
        button3Visible = false; // видимость кнопки "занести данные"
    else button3Visible = true;
    COUNT_connect++;
    MainCalculation.SetCOUNT_connectArr(COUNT_connect);
    Random random = new Random();
    int rand1 = 255 - random.Next(50);
    int rand2 = 255 - random.Next(50);
    int rand3 = 255 - random.Next(50);
    for (int i = 0; i < InputGridView.ColumnCount; i++)
        for (int j = 0; j < InputGridView.RowCount; j++)
        {
            AlldataGridView[i, MainCalculation.GetCOUNT_M() - j - 1].Value =
double.Parse(InputGridView[i, j].Value.ToString());
            AlldataGridView[i, MainCalculation.GetCOUNT_M() - j - 1].Style.BackColor =
Color.FromArgb(rand1, rand2, rand3);
        }
}
// расчет пути, решение массива многокритериальных задач
private void button5_Click(object sender, EventArgs e)
{
    isColumnAdded = true;
    int K_row = MainCriterions.GetFactorialN() < MainCriterions.GetM() ?
MainCriterions.GetM() : MainCriterions.GetFactorialN();
    if (isColumnAdded == true)
    {
        dataGridView1.Columns.Add("newColumnName", "Эффективность");
        dataGridView1.Columns[2].Width = 90;
        for (int j = 0; j < Connection.GetLength(0); j++)
            dataGridView1[2, j].Value = 0;
        if (dataGridView2.CurrentCell.ColumnIndex == 2)
        {
            for (int i = 0; i < K_row; i++)
                dataGridView2.Rows[i].Cells[2].Value = false;
            dataGridView2.Rows[dataGridView2.CurrentCell.RowIndex].Cells[2].Value = true;
MainCalculation.SetIndexofCriteria(dataGridView2.Rows[dataGridView2.CurrentCell.RowIndex].Index);
//запоминаем распределение вероятностей
        }
        isColumnAdded = false;
    }
}

MainCalculation.SetZerorowIter(0);
OutputGridView.Rows.Clear();
MainCalculation.SetCOUNT_connectArr(0);
int count = 0;
int temp = 1;
int[,] ConnectArrey = MainCalculation.DeleteRow(Connection);
int strcount = 0;

```

```

for (int n = 0; n < MainCalculation.GetV() - 1; n++)
{
    for (int i = 0; i < Connection.GetUpperBound(0) + 1; i++)
        if (Connection[i, 0] == temp)
            count++;
    MainCriteriaions.SetM(count);
    double[,] temparr = new double[MainCriteriaions.GetM(), MainCriteriaions.GetN()];
    int temp1 = 0;
    for (int i = strcount; i < (strcount + count); i++)
    {
        for (int j = 0; j < AlldataGridView.ColumnCount; j++)
            temparr[temp1, j] = double.Parse(AlldataGridView[j, i].Value.ToString());
        temp1++;
    }
    MainCriteriaions.SetValueArray(temparr);
    MainCriteriaions.Algorithm();
    OutputAllData();
    double[,] decisionArr = MainCriteriaions.GetDecisionCoefficientArry();
    double[] decisionArrROW = new double[decisionArr.GetLength(1)];
    for (int i = 0; i < decisionArr.GetLength(1); i++)
        decisionArrROW[i] = decisionArr[MainCalculation.GetIndexOfCriteria(), i];

    int[,] teeemp = GetConnection();
    int k = 0;
    int tempCount = count;
    for (int i = 0; i < teeemp.GetLength(0); i++)
    {
        if (teeemp[i, 0] != 0)
        {
            dataGridView1[2, i].Value = decisionArrROW[k];
            teeemp[i, 0] = 0;
            k++;
            tempCount--;
        }
        if (tempCount == 0) break;
    }
    dataGridView1.Columns[2].DefaultCellStyle.Alignment =
DataGridViewContentAlignment.MiddleCenter;
    strcount += count;
    count = 0;
    temp++;
}
ConnectionValue = new int[Connection.GetLength(0)];
for (int i = 0; i < Connection.GetLength(0); i++)
    ConnectionValue[i] = Convert.ToInt32(Math.Round(double.Parse(dataGridView1[2,
i].Value.ToString()) * 10000, 0));
var graph = new Graph<string>();
int[] arr = null;
int[] set = new int[dataGridView1.RowCount * 2];
Connection = new int[dataGridView1.RowCount, 2]; // массив связей
int k1 = 0;
while ((arr = MainCalculation.generateCombinations(arr, MainCalculation.GetV())) != null)
{
    for (int i = 0; i < 2; i++)
        set[i + k1] = arr[i];
    k1 = k1 + 2;
}
k1 = 0;
for (int i = 0; i < dataGridView1.RowCount; i++)
{
    for (int j = 0; j < 2; j++)
        Connection[i, j] = set[j + k1];

    k1 = k1 + 2;
}
int[] tempValue = GetConnectionValue();
for (int i = 0; i < MainCalculation.GetConnectionVertex().GetLength(0); i++)

```

```

    {
        if (tempValue[i] != 0)
            graph.AddEdge(Convert.ToString(Connection[i, 0]), Convert.ToString(Connection[i,
1]), tempValue[i]);
    }
    graph.AddEdge(MainCalculation.GetV().ToString());
    label8.Text = "Наилучший путь" + '\n' + string.Join("-", graph.FindLongestPath("1",
MainCalculation.GetV().ToString()));
    double temp = int.Parse(graph.GetdistanceOut()) * 0.0001;
    label7.Text = "Стоимость пути " + '\n' + temp;
}
private void dataGridView2_CellClick(object sender, DataGridViewCellEventArgs e)
{
    if (e.RowIndex != -1)
        if (dataGridView2.Rows[e.RowIndex].Cells[0].Value != null &&
dataGridView2.CurrentRow.ColumnIndex == 0) //null проверка
            if (e.ColumnIndex == 2)
                if ((bool)dataGridView2.Rows[e.RowIndex].Cells[0].Value == true)
                    for (int k = 0; k <= 200; k++)
                        if (k == dataGridView2.CurrentRow.Index)
                            dataGridView2.Rows[k].Cells[0].Value = false;
}
private void textBox2_TextChanged(object sender, EventArgs e) // считывает кол-во критериев
{
    ReadInputCriteria();
}
}
}

```

// расчет наилучшего пути

```

class Graph<T>
{
    private readonly Dictionary<T, List<Edge>> _adj;
    Calculation1 MainCalculation = new Calculation1();
    private string distanceOut;

    public void SetdistanceOut(string temparr)
    {
        distanceOut = temparr;
    }
    public string GetdistanceOut()
    {
        return distanceOut;
    }
    public Graph()
    {
        _adj = new Dictionary<T, List<Edge>>();
    }

    public void AddEdge(T source)
    {
        _adj[source] = new List<Edge>();
    }

    public void AddEdge(T source, T dest, int weight)
    {
        List<Edge> verticies;
        if (!_adj.TryGetValue(source, out verticies))
        {
            verticies = new List<Edge>();
        }
        verticies.Add(new Edge(dest, weight));
        _adj[source] = verticies;
    }

    private void TopologicalSortHelper(T node, LinkedList<T> result, HashSet<T>
visited)

```

```

{
    if (visited.Contains(node))
        return;
    foreach (var neighbour in _adj[node])
    {
        TopologicalSortHelper(neighbour.Node, result, visited);
    }
    visited.Add(node);
    result.AddFirst(node);
}

private LinkedList<T> TopologicalSort()
{
    var res = new LinkedList<T>();
    var visited = new HashSet<T>();
    foreach (var node in _adj.Keys)
    {
        if (visited.Contains(node))
            continue;
        TopologicalSortHelper(node, res, visited);
    }
    return res;
}

private int CalculateDistance(IEnumerable<T> sortedGraph, T source, T dest)
{
    var distances = new Dictionary<T, int>();
    foreach (var node in _adj.Keys)
    {
        distances[node] = int.MinValue;
    }
    distances[source] = 0;
    var q = new Queue<T>();
    q.Enqueue(source);
    while (q.Count > 0)
    {
        var node = q.Dequeue();
        foreach (var neighbour in _adj[node].Where(n => distances[n.Node]
< distances[node] + n.Weight))
        {
            q.Enqueue(neighbour.Node);
            distances[neighbour.Node] = distances[node] +
neighbour.Weight;
        }
    }
    return distances[dest];
}

public ICollection<T> FindLongestPath(T source, T dest)
{
    var distances = new Dictionary<T, int>();
    var sortedGraph = TopologicalSort();
    foreach (var node in _adj.Keys)
    {
        distances[node] = CalculateDistance(sortedGraph, node, dest);
    }
    string temp = distances.First().ToString();
    int first = temp.IndexOf(',') + 2;
    int second = temp.IndexOf(']');
    SetdistanceOut(temp.Substring(first, second - first));

    var cur = source;
    var res = new LinkedList<T>();
    while (!cur.Equals(dest))
    {

```

```

        var next = _adj[cur][0];
        for (int i = 1; i < _adj[cur].Count; i++)
        {
            // добавляем эффективность (вес) к пути
            if (distances[_adj[cur][i].Node] + _adj[cur][i].Weight >
distances[next.Node] + next.Weight)
                next = _adj[cur][i];
        }
        res.AddLast(cur);
        cur = next.Node;
    }
    res.AddLast(cur);
    return res;
}

private class Edge
{
    public readonly T Node;
    public readonly int Weight;

    public Edge(T node, int weight)
    {
        Node = node;
        Weight = weight;
    }
}

}
class Calculation1
{
    private int V; // количество вершин
    private int COUNT_M; // запоминает число строк в общей таблице для нормализации
    private int[,] VertexArray; // массив вершин
    private int COUNT_connectArr; // количество ненулевых связей (число строк в
[, ]ConnectArray)

    private int rowIter; // для запоминания число строк в таблице OutputGridView
    private int IndexOfCriteria; // запоминает выбранное распределение вероятностей
    private int[,] ConnectionVertex;

    public void SetIndexOfCriteria(int temparr)
    {
        IndexOfCriteria = temparr;
    }
    public void SetrowIter(int temparr)
    {
        rowIter += temparr;
    }
    public void SetZerorowIter(int temparr)
    {
        rowIter = temparr;
    }
    public void SetCOUNT_M(int temparr)
    {
        COUNT_M += temparr;
    }
    public void SetZeroCOUNT_M(int temparr)
    {
        COUNT_M = temparr;
    }
    public void SetVertex(int temparr)
    {
        V = temparr;
    }
    public void SetCOUNT_connectArr(int temparr)
    {
        COUNT_connectArr = temparr;
    }
}

```

```

public void SetConnectionVertex(int[,] arrey)
{
    ConnectionVertex = arrey;
}

public int[,] DeleteRow(int[,] table) // удаление ненулевых строк из массива
{
    int countemp = 0;
    for (int i = 0; i < table.GetUpperBound(0) + 1; i++)
        if (table[i, 1] != 0) countemp++;

    if (countemp == 0) MessageBox.Show("Установите связи");

    int[,] temp = new int[countemp, 2];
    int k = 0;
    for (int i = 0; i < table.GetUpperBound(0) + 1; i++)
        if (table[i, 1] != 0)
        {
            temp[k, 0] = table[i, 0];
            temp[k, 1] = table[i, 1];
            k++;
        }
    return temp;
}

public int[] generateCombinations(int[] arr, int N) // число сочетаний из N по 2 (связи
между вершинами)
{
    if (arr == null)
    {
        arr = new int[2];
        for (int i = 0; i < 2; i++)
            arr[i] = i + 1;
        return arr;
    }
    for (int i = 1; i >= 0; i--)
        if (arr[i] < N - 2 + i + 1)
        {
            arr[i]++;
            for (int j = i; j < 2 - 1; j++)
                arr[j + 1] = arr[j] + 1;
            return arr;
        }
    return null;
}

public long Factorial_ForConect(int x) // вычисление факториала числа
{
    if (x == 0)
    {
        return 1;
    }
    else
    {
        return x * Factorial_ForConect(x - 1);
    }
}

public int GetV()
{
    return V;
}

public int GetCOUNT_M()
{
    return COUNT_M;
}

public int GetCOUNT_connectArr()
{
    return COUNT_connectArr;
}

public int GetrowIter()

```

```

    {
        return rowIter;
    }
    public int GetIndexOfCriteria()
    {
        return IndexOfCriteria;
    }
    public int[,] GetConnectionVertex()
    {
        return ConnectionVertex;
    }
}

class Criterions
{
    private int M; // количество решений i
    private int N; // количество критериев j
    private int COUNTER; // переход на след строку занесения данных в матрицу A
    private double[,] ValueArray; // полный массив данных (матрица A)
    private int[,] ProbabilityArray; // массив всех вариантов распределения вероятностей
    private double[,] CoefficientArray; // массив коэффициентов при значениях (в зависимости от
K 1/K)
    private double[,] DecisionCoefficientArray; // массив коэффициентов решений ( D)
    // public double[] LaplaceCoefficientArray { get; set; }
    private int[] FinalDArray; // конечный массив лучших решений
    private int FactorialN;
    private int[] Darea; // массив D подсчет областей, принадлежащих каждому решению
    private double[] DecisionCoefficientArrayRow; // строка значений D лучшего решения

    public void SetM(int m)
    {
        M = m;
    }

    public void SetN(int n)
    {
        N = n;
        FactorialN = Factorial(N);
    }

    public void SetCOUNTER(int k)
    {
        COUNTER = k;
    }
    public void SetValueArray(double[,] temparr)
    {
        ValueArray = new double[M, N];
        CoefficientArray = new double[M, N];

        for (int i = 0; i < M; i++)
        {
            for (int j = 0; j < N; j++)
            {
                ValueArray[i, j] = temparr[i, j];
                CoefficientArray[i, j] = 0;
            }
        }
    }

    public void Algorithm()
    {
        FindProbabilityArray();
        CalculationCoefficientsArray();
        CalculationDecisionCoefficientsArray();
        FindFinalDArray();
    }
    private void FindFinalDArray()

```

```

{
    FinalDArray = new int[FactorialN];

    for (int i = 0; i < FactorialN; i++)
    {
        double tempdoub = 0.0;
        int tempint = 0;
        for (int j = 0; j < M; j++)
        {
            if (DecisionCoefficientArray[i, j] > tempdoub)
            {
                tempdoub = DecisionCoefficientArray[i, j];
                tempint = j + 1;
            }
        }
        FinalDArray[i] = tempint;
    }
}

private void CalculationDecisionCoefficientsArray()
{
    DecisionCoefficientArray = new double[FactorialN, M];
    for (int i = 0; i < FactorialN; i++)
    {
        for (int j = 0; j < M; j++)
        {
            for (int k = 0; k < N; k++)
            {
                DecisionCoefficientArray[i, j] += (double)CoefficientArray[j, k] *
ValueArray[j, ProbabilityArray[i, k] - 1];
            }
        }
    }
}

private void CalculationCoefficientsArray()
{
    for (int i = 0; i < M; i++)
    {
        double temp = 0.0;
        int tempj = 0;
        for (int j = 0; j < N; j++)
        {
            if (ValueArray[i, j] > temp)
            {
                tempj = j + 1;
                temp = ValueArray[i, j];
            }
        }
        for (int j = 0; j < tempj; j++)
        {
            CoefficientArray[i, j] = (double)1 / tempj;
        }
    }
}

private void FindProbabilityArray() // нахождение всех комбинаций вероятностей (c1<c2<c3)
{
    ProbabilityArray = new int[FactorialN, N];
    int[] initialdata = new int[N];
    for (int i = 0; i < N; i++)
    {
        initialdata[i] = i + 1;
    }
    int icountforprobabilityarray = 0;
    Generate(0, N, initialdata, ref ProbabilityArray, ref icountforprobabilityarray);
}
}

```

```

public void Generate(int k, int n, int[] initialdata, ref int[,] probarr, ref int
icountforprobabilityarray)
{
    if (k == n - 1)
    {
        for (int i = 0; i < n; i++)
        {
            probarr[icountforprobabilityarray, i] = initialdata[i];
        }
        icountforprobabilityarray++;
    }
    else
    {
        for (int j = k; j < n; ++j)
        {
            Swap(ref initialdata[k], ref initialdata[j]);
            k++;
            Generate(k, n, initialdata, ref probarr, ref icountforprobabilityarray);
            k--;
            Swap(ref initialdata[k], ref initialdata[j]);
        }
    }
}

public string GetAreaSolution()
{
    string temp = "";
    int[] temparr = new int[M];
    Array.Clear(temparr, 0, M);
    for (int i = 0; i < FactorialN; i++)
        temparr[FinalDArray[i] - 1]++;

    for (int i = 0; i < M; i++)
        temp += "D" + (i + 1).ToString() + "=" + temparr[i] + '\n';

    Darea = new int[9];

    for (int i = 0; i < Darea.Length; i++)
        Darea[i] = temparr[i];

    int maxValue = Darea.Max(); //
    нахождение максимального элемента
    int index = Array.FindLastIndex(Darea, delegate (int i) { return i == maxValue; }); //
    нахождение индекса макс элемента

    DecisionCoefficientArrayRow = new double[9];
    for (int i = 0; i < Darea.Length; i++)
        DecisionCoefficientArrayRow[i] = DecisionCoefficientArray[index, i];
        string testoutput = "";
        for (int i = 0; i < Darea.Length; i++)
        {
            testoutput
            = testoutput
            +
            Convert.ToString(DecisionCoefficientArrayRow[i]) + " ";
            testoutput += '\n';
        }
        MessageBox.Show(testoutput);

    return temp;
}

private void Swap(ref int a, ref int b)
{
    int temp = 0;
    temp = a;
    a = b;
    b = temp;
}

public int Factorial(int num)
{

```

```
        return (num == 0) ? 1 : num * Factorial(num - 1);
    }

    public double[,] GetDecisionCoefficientArray()
    {
        return DecisionCoefficientArray;
    }
    public int[,] GetProbabilityArray()
    {
        return ProbabilityArray;
    }
    public int[] GetFinalDArray()
    {
        return FinalDArray;
    }
    public int GetFactorialN()
    {
        return FactorialN;
    }
    public int GetM()
    {
        return M;
    }
    public int GetN()
    {
        return N;
    }
    public int GetCOUNTER()
    {
        return COUNTER;
    }
}
```

Документы, подтверждающие практическую значимость исследования
(акты о внедрении)



Акт внедрения
Результатов диссертационной работы

Андреева Андрея Юрьевича на тему: **«Методика определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок»**, представленной на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.22.10 — «Эксплуатация автомобильного транспорта».

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационного исследования Андреева Андрея Юрьевича использованы при реализации мероприятия по анализу действующей системы логистики продукции предприятия, в части определения оптимальных маршрутов для доставки продукции автомобильным транспортом. Предложенная в исследовании методика определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок является эффективным инструментом организации процессов поставок готовой продукции в условиях динамического роста производительности предприятия, вследствие которого растет общий объем отгрузок готовой продукции.

Применение разработанной в исследовании методики определения оптимальных маршрутов позволяет:

- Сократить удельные годовые затраты на ТО и ремонт техники, а также на содержание производственно-технической базы;
- Сократить производственные расходы, связанные с доставкой готовой продукции;
- Сократить время доставки готовой продукции до конечного получателя;
- Обеспечить оперативные поставки и рекламацию продукции в случае необходимости.

Следует отметить оригинальность авторской разработки: определение оптимальных маршрутов именно в динамически изменяющихся условиях впервые применяется в планировании доставки продукции, что, безусловно, является объективным инструментом планирования производственных задач и бюджета, в условиях развития производства и увеличение портфеля заказов.

Директор по развитию
АО «Корпорация «Оборонтех»

Сидоренко Н.Г.



СТЭК СЕВЕРО-ЗАПАД

СЕРВИСНО-ТОРГОВАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДА
WWW.STECN.WJ

ООО «СТЭК Северо-Запад»

Россия, 196240, г. Санкт-Петербург,
Ул. Предпортовая, дом 1, лит. А.
Тел.: +7 (812) 628-29-60
E-mail: info@stecnw.ru
ОКПО 35525609, ОГРН 1147847141397
ИНН/КПП 7839494811/783901001

Исх. № 0000-65 от 02.09.21г.
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «СТЭК Северо-Запад»



Долгов Ю.И.

Акт внедрения

результатов диссертационной работы на тему: «Методика определения оптимальных маршрутов в динамически изменяющихся условиях оперативного планирования автомобильных грузовых перевозок», авторства Андреева Андрея Юрьевича, представленной на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.22.10 — «Эксплуатация автомобильного транспорта».

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационного исследования Андреева Андрея Юрьевича использованы при реализации расчетов доставки грузов ООО «СТЭК Северо-Запад» и будут использованы для формирования конечной стоимости продукции с предоставлением полного сервиса поставки клиентам.

Применение разработанной в исследовании методики определения оптимальных маршрутов позволит предприятию выработать уникальное торговое предложение с учетом сокращения стоимости и сроков поставки, что в свою очередь обеспечит конкурентное преимущество и стремительное развитие предприятия.

Важно отметить необходимость и своевременность данной разработки, учитывая высокий темп развития логистических процессов и автоматизации систем грузопотоков.

Генеральный директор

ООО «СТЭК Северо-Запад»

Долгов Ю.И.