

Министерство образования и науки Украины  
Днепропетровский национальный университет железнодорожного  
транспорта имени академика В. Лазаряна

На правах рукописи

ХАРЧЕНКО ОЛЕСЯ ИВАНОВНА

УДК 656.21.073

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ  
СРЕДСТВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ

Специальность 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
Босов Аркадий Аркадьевич,  
доктор технических наук,  
профессор

Днепропетровск – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Раздел 1 Анализ подходов к повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиций устойчивого развития .....	10
1.1 Анализ методов оценки эффективности функционирования железных дорог.....	11
1.1.1 Традиционные методы оценки функционирования сложных систем.....	12
1.1.2 Концепция устойчивого развития и ее реализация при управлении сложными системами.....	17
1.2 Анализ разработок в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог.....	21
1.3 Направления повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог.....	30
Выводы по первому разделу.....	34
Раздел 2 Теоретические основы повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиций устойчивого развития.....	36
2.1 Разработка системы показателей, характеризующих повышение эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и их устойчивое развитие.....	36
2.2 Математическая постановка задачи повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и обеспечения их устойчивого развития.....	43
2.3 Разработка математических моделей функционирования железнодорожных станций.....	55
2.3.1 Модель функционирования железнодорожных станций на макроуровне.....	61
2.3.2 Модель функционирования железнодорожной станции на микроуровне.....	65
Выводы по второму разделу.....	71
Раздел 3 Экспериментальные исследования в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог (на примере решения задачи рациональной организации работы грузовых станций на Приднепровской железной дороге).....	73

3.1 Оценка параметров, характеризующих эффективность эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиции их устойчивого развития.....	73
3.1.1 Разработка граф-модели для решения сетевой задачи на макроуровне.....	74
3.1.2 Разработка функций для определения оптимального количества транспортных средств железнодорожных станций.....	80
3.1.3 Разработка функции оптимизации распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития.....	83
3.2 Разработка плана эксперимента.....	88
3.3 Результаты моделирования процесса организации работы железнодорожных станций на Приднепровской железной дороге.....	97
3.4 Оценка воспроизводимости эксперимента.....	102
Выводы по третьему разделу.....	104
Раздел 4 Анализ результатов исследований по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог.....	106
4.1 Регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований.....	106
4.2 Проверка адекватности и информационной способности регрессионных моделей.....	112
4.3 Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиции их устойчивого развития.....	117
4.4 Оценка синергетического эффекта от внедрения мероприятий по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог.....	133
Выводы по четвертому разделу.....	138
Выводы.....	140
Список использованных источников.....	143
Приложение А Листинг программной реализации модели функционирования железнодорожных станций.....	159
Приложение Б Результаты регрессионного анализа.....	165
Приложение В Акты внедрения.....	178

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Основной целью функционирования железных дорог является своевременное обеспечение потребностей торговых и производственных предприятий, а также населения в качественных транспортных услугах.

Не смотря на то, что железнодорожный транспорт является базовой отраслью национальной экономики и основой транспортной системы страны уровень качества обслуживания не отвечает европейскому уровню и уровню конкуренции в транспортной отрасли. К основным проблемам железнодорожной отрасли относятся: существенный износ транспортных средств, недостаточный объем инвестиций, необходимых для обновления транспортных средств и т.д. Это, при дальнейшем развитии ситуации, может привести к потере возможности бесперебойного удовлетворения растущих потребностей общества в транспортных услугах и к ухудшению показателей безопасности движения.

Существующие методы оценки эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог не стимулируют их обновление. В связи с этим тема диссертации, направленная на комплексное решение задач повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог с учетом ресурсосберегающих, экологических и социальных показателей их функционирования является актуальной как для железнодорожной отрасли, так и для экономики Украины.

**Связь с научными программами, планами, темами.** Работа выполнена в соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта на период до 2020 года», распоряжением Кабинета Министров Украины от 16 декабря 2009 г. № 1555-р, с «Транспортной стратегией Украины на период до 2020 года», утвержденной решением № 2174-р Кабинета Министров Украины от 20.10.2010 г. Диссертационная работа также выполнена в рамках научно-исследовательской работы Днепропетровского национального уни-

верситета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна «Анализ соответствия технического оснащения железнодорожного транспорта ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (регистрационный номер 0111U009657).

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является повышение эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог за счет реализации базовых принципов концепции устойчивого развития.

Для достижения поставленной цели в рамках работы необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ подходов к повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиции их устойчивого развития.
- разработать систему показателей для оценки эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог, которая позволяет охарактеризовать их устойчивое развитие.
- разработать математическую модель функционирования железнодорожных станций и ее программное обеспечение для оценки параметров, которые характеризует повышение эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и их устойчивое развитие.
- провести исследования влияния параметров спроса на транспортные средства железных дорог на показатели устойчивого развития.
- оценить синергетический эффект от внедрения мероприятий по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог.

**Объектом исследования** является процесс эксплуатации транспортных средств железных дорог.

**Предметом исследования** являются закономерности влияния эксплуатационных параметров на эффективность эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиций их устойчивого развития.

**Методы исследования.** При разработке системы показателей использованы методы системного анализа. При разработке моделей функциониро-

вания железнодорожных станций использованы методы и принципы объектно-ориентированного программирования, линейного программирования, а также имитационного моделирования. Планирование полного факторного эксперимента, методы статистического анализа и методология регрессионного анализа использованы для установления зависимостей между показателями, характеризующими спрос на транспортные средства и показателями устойчивого развития. Оценка эффективности мероприятий по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог проведена с использованием принципов синергетики.

**Научная новизна полученных результатов** состоит в предложенном подходе к повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиций их устойчивого развития.

*Впервые* предложен критерий для оценки эффективности эксплуатации транспортных средств, который, в отличие от существующих, позволяет в комплексе оценить эффективность использования транспортных средств по основным направлениям устойчивого.

*Впервые* разработана методика решения задачи рационального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития, который позволяет определить наиболее приоритетное направление развитие железных дорог на основании параметров спроса на транспортные средства.

*Получил дальнейшее развитие* объектно-ориентированный подход к моделированию процесса функционирования железнодорожных станций, который ранее не использовался для создания моделей функционирования железнодорожных станций на макроуровне.

*Получила дальнейшее развитие* методика оценки эффективности эксплуатации транспортных средств железных, что позволяет проводить предварительную оценку эффекта от реализации мероприятий по обеспечению устойчивого развития.

**Практическое значение полученных результатов** состоит в разработке методики определения рационального распределения ресурсов по

направлениям устойчивого развития железных дорог. Предложенные имитационные модели функционирования железнодорожных станций могут использоваться для решения задачи оптимальной эксплуатации средств транспорта в рамках железной дороги, а также для оптимизации средств обеспечения транспортных и погрузо-разгрузочных работ железнодорожных станций.

Основные результаты диссертационного исследования приняты к внедрению в службе и отделах коммерческой работы и маркетинга Приднепровской железной дороги, что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Результаты работы используются в учебном процессе Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна при подготовке специалистов и магистров по специальности «Организация перевозок и управление на железнодорожном транспорте» и при выполнении дипломных проектов студентами этой же специальности, что подтверждается соответствующим актом.

**Личный вклад соискателя.** Все положения и результаты теоретических и экспериментальных исследований, которые выносятся на защиту и приведены в диссертационной работе, получены автором самостоятельно, а результаты их реализации приведены в работах [1-16] В научных работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в следующем:

- в работе [1] диссертантом предложены методы восстановления локальных связей и построение по ним системы структур математических моделей;
- в статье [3] обоснованы экономические показатели работы железнодорожной станции, сформулирована инженерная постановка и выполнено решение задачи оценки влияния показателей на экономическую составляющую работы станции.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы были раскрыты в докладах, обговорены и приняты на:

- 4-й Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортных систем в условиях реформирования же-

лезнодорожного транспорта: управление, экономика и технология» (ДЕТУТ, Киев, 26-27 февраля 2008 г.);

– Межгосударственной научно-методической конференции «Проблемы математического моделирования» (ДДТУ, Днепродзержинск, 21-23 мая 2008 г.);

– 69, 71 Международных научно-практических конференциях «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (ДНУЖТ, Днепропетровск, 21-22 мая 2009 г., 14-15 апреля 2011г.);

– 2-ой Международной научно-практической конференции «Интеграция Украины в международную транспортную систему» (ДНУЖТ, Днепропетровск, 27-28 мая 2010 г.);

– Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании» (ДНУЖТ, Днепропетровск, 12-13 мая 2011 г.);

– 7-й Международной научно-практической конференции «Проблемы экономики транспорта» (ДНУЖТ, Днепропетровск, 24-25 апреля 2014 г.)

– 8-й Международной научно-практической конференции «Проблемы экономики транспорта» (ДНУЖТ, Днепропетровск, 23-24 апреля 2015 г.).

Диссертационная работа в полном объеме докладывалась и была одобрена в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна на межкафедральном научном семинаре.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 16 научных работ: 7 статей в специализированных научных изданиях, которые входят в перечень Министерства образования и науки Украины, среди которых 3 статьи – в изданиях, которые входят в международные наукометрические базы, 8 тезисов докладов на международных научно-практических конференциях и получено 1 авторское свидетельство.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов, трех приложений и списка использо-

ванных источников. Полный объем работы составляет 180 страниц, в том числе 142 страниц основного текста. Работа проиллюстрирована 44 рисунками, приведено 21 таблицу. Приведенные приложения размещены на 22 страницах. Список использованных литературных источников состоит из 137 наименований на 16 страницах.

## РАЗДЕЛ 1

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ПОЗИЦИЙ ИХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Железнодорожный транспорт имеет особое значение в экономике страны, поэтому перед государством стоит важное задание относительно повышения эксплуатационных возможностей и конкурентоспособности, а также реализации основных принципов устойчивого развития железнодорожной отрасли (в частности железных дорог). Совершенствование железнодорожных перевозок не может быть обеспечено без повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог.

Рассматривая задачи повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиции их устойчивого развития, необходимо учитывать множество факторов, определяющих основные параметры технологических процессов и особенности их организации. На современном этапе развития науки о транспорте парадигмой в управлении процессами функционирования транспортных объектов, в соответствии с [17-19], является подход системный. В [20] указывается, что основу построения и функционирования сложных систем составляет реализация принципа системного подхода, который проявляется, прежде всего, в интеграции и однозначном определении параметров взаимодействия всех элементов системы.

Поэтому для решения задач повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог на этапе анализа необходимо определить принципы управления развитием сложных систем, проанализировать существующие методы рационализации (оптимизации) и подходы к повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог, а также выделить направления, по которым целесообразно проводить исследования по повышению эффективности.

## 1.1 Анализ методов оценки эффективности функционирования железных дорог

Сложной системой, в соответствии с [21], является система, включающая большое число взаимодействующих элементов (подсистем) и обеспечивающая решение достаточно сложной (комплексной) задачи. К таким системам относятся информационные сети, транспортно-логистические системы, производственно-технологические процессы, системы управления сложными (многоканальными, нелинейными, неопределенными) динамическими объектами. Железные дороги относятся к сложным системам по нескольким признакам из приведенного определения: включают подсистему информационных сетей, в них осуществляются технологические процессы переработки материального потока, для них характерны процессы управления многоканальными динамическими объектами (парком маневровых локомотивов, фронтами погрузочно-разгрузочных работ, складским хозяйством и т.п.).

Для сложных систем управления технологическими процессами характерны следующие признаки [22,23]:

- комплексный тип управляемого процесса (объекта), предполагающий включение в его состав нескольких взаимосвязанных и более простых элементарных объектов;
- необходимость последовательного решения задачи управления, т.е. поочередного выполнения операций основного и (или) локальных объектов;
- иерархическая структура задачи управления, т.е. подчиненность подзадач, формирующих сложную комплексную задачу управления.

Основным в понятиях сложной задачи и сложной системы является их структурированность, т.е. возможность разбиения на компоненты меньшей сложности. Выбор таких компонент неоднозначен, а используемая при этом терминология (например, названия уровней иерархии) достаточно условна.

Для решения задач управления сложными системами используются как подходы, относящиеся на сегодняшний день к традиционным (оптимальное

управление, адаптивное управление, рефлексивное управление и др.), так и более новые подходы, направленные на переосмысление сложившихся парадигм управления.

### 1.1.1 Традиционные методы оценки функционирования сложных систем

При управлении сложными системами принято выделять имеющие различный уровень иерархии стратегическую задачу, а также тактические и локальные задачи управления [24].

К стратегическим задачам управления относят задачи технологического характера (формирование грузового пакета, обработка грузовой единицы на складском комплексе, управление работой грузового фронта и др.), т.е. задачи поддержания определенной последовательности действий сложного (комплексного) объекта. Тактическая задача является элементом общей стратегической задачи, устанавливающей требования к поведению каждого элементарного объекта сложной системы и (или) осуществлению элементарного режима функционирования. Локальная задача является задачей изменения или поддержания состояния элементарного объекта.

Таким образом, понятие сложной задачи предусматривает возможность расчленения общей стратегической задачи на ряд более простых задач, решаемых последовательно или параллельно. На основании этого положения формируются следующие принципы управления сложными системами:

- декомпозиция – разбиение сложной задачи и сложного объекта на более простые компоненты (подзадачи и локальные объекты);
- децентрализация – выделение внутренних устройств управления или программных средств (алгоритмов), обеспечивающих решение отдельных подзадач и управление функционированием локальных объектов;
- иерархическое управление – введение строго определенной подчиненности подзадач разного уровня сложности, а также соответствующей

подчиненности подразделений управленческого аппарата, используемого при решении задач управления;

- многорежимное управление (временная декомпозиция) – последовательное переключение решаемых задач и устройств управления.

Многорежимное управление может осуществляться одним из следующих способов:

- по командам оператора;
- по заранее установленной жесткой программе;
- методами самоорганизации, предусматривающими автоматический выбор режимов с учетом возникшей ситуации (решение в таких случаях обычно предусматривают использование процедур самообучения и нечетко-логических схем управления [25]).

Управление в сложных системах принципиально отличается от принятой совокупности подходов к управлению, получивших в литературе название оптимального (программного) управления, сутью которых является перевод управляемой системы в желаемое состояние по некоторому оптимальному пути [26]. Основной причиной этого отличия является то, что сложные системы слабо предсказуемы, определить их желаемое или практически достижимое состояние обычно невозможно, тем более невозможно выбрать и навязать системе оптимальный (в детерминистическом или статистическом смысле) путь перехода из одного состояния в другое, поскольку структура и функции системы не могут быть выражены аналитически. По содержанию и механизму действия управление сложными системами, в том числе самоуправление, наиболее близко к физиологическим процессам возбуждения и торможения, иначе говоря, внешнего и внутреннего стимулирования. Прямые и обратные связи, все виды и формы воздействия, если они не приводят к разрушению системы, являются стимулами, возбуждающими или тормозящими внутрисистемные процессы, ход и последствия которых в основном определяются внутри системы.

Проблема управления сложными системами состоит в исследовании влияния возбуждающих и тормозящих стимулов на поведение системы и конечный результат, а также в применении стимулирующих воздействий с целью достижения требуемой эффективности системы. Возбуждение может перейти в торможение, и наоборот, поэтому априорная оценка характера воздействия затруднительна. Цели управления при этом должны достигаться с относительно малыми затратами ресурсов. Типичным в этом смысле является информационное управление, при котором энергетические ресурсы, затрачиваемые на управление, незначительны по сравнению с энергетическими ресурсами объектов управления. Для сложных систем характерно не только потребность в больших количествах энергетических ресурсов, но наличие большей динамической инерционности.

Адаптивное управление применяется в случаях, когда влияние традиционных факторов, обеспечивающих функционирование системы, является относительно не сильным или таковым, что влияние этих факторов можно изменить в течение относительно короткого интервала времени.

При управлении сложными системами невозможно выделить такие управленческие воздействия, результаты которых однозначно влияют на изменение состояния управляемой системы. Управленческие воздействия при этом должны влиять на факторы внутренней мотивации системы; это достижимо, если факторы мотивации системы известны (по крайней мере, частично). Следует отметить, что при этом однозначные оптимальные решения выделить практически невозможно.

Адаптивное управление с подражательным механизмом предполагает использование при управлении методов адаптации к стохастической ситуации, оптимальные в среднем. Сложность применения таких методов состоит в том, что для сложных систем характерны неповторяющиеся ситуации поведения, а для единичных ситуаций известные методы стохастической адаптации малопригодны.

Методом, находящимся на стыке стохастической оптимизации и целенаправленного изменения поведения объекта управления, является метод массовых проб [27]. Метод используется в случаях, когда поведение управляемого объекта неопределенно, однако не может быть описано стохастическими величинами. Суть метода массовых проб состоит в преобразовании сложной системы как объекта управления в систему квазистохастическую с последующим поиском оптимального (квазиоптимального) решения.

Рефлексивное управление направлено на непрерывное решение потока задач, направленных на устранение проблем, которые порождает динамично изменяющаяся внешняя и внутренняя среда, а так же результат итерации когнитивной и воздействующей функции [28]. Множество решений при применении подхода рефлексивного управления находится в пространстве проблем. Проблемное пространство представляет собой не просто физическое пространство, ассоциированное с проблемой, – в него могут входить отношения, ценности, восприятия и убеждения. Проблемное пространство определяется всеми элементами как физической, так и нефизической природы, которые создают проблему, или способствуют ей [29]. Чтобы решить проблему управления сложной системой необходимо сформировать пространство решений. Пространство решений содержит альтернативы и ресурсы позволяющие преодолеть, преобразовать проблему или избежать её. Однако если сформированное пространство решений направлено лишь на часть элементов проблемного пространства, возникает недостаточное решение. Пространство решений должно быть шире проблемного пространства, иначе полученные решения могут оказаться неадекватными.

Одним из наиболее популярных подходов к управлению сложными системами является нечеткое управление [30-33]. Среди причин широкого распространения методов нечеткого управления обычно выделяют следующие факторы [34]:

- особые качества систем управления с нечеткой логикой, в частности
- малая чувствительность к изменению параметров объекта управления;

– синтез систем управления с нечеткой логикой при применении современных средств аппаратной и программной поддержки зачастую проще, чем традиционных.

Как и у любых систем управления у систем с нечеткой логикой существует область, в которой их применение является наиболее предпочтительным. В качестве таких областей, как правило, выделяют [34]:

- системы регулирования, для которых модель объекта управления определена лишь качественно;
- надстройка над традиционными системами регулирования для придания им адаптивных свойств;
- воспроизведение действий человека-оператора;
- системы организационного управления верхнего уровня.

Основными предпосылками, обуславливающими целесообразность применения нечетких систем управления, являются, с одной стороны – наличие неопределенности, связанной как с отсутствием информации, так и со сложностью системы и невозможностью или нецелесообразностью ее описания традиционными методами, а с другой стороны – наличие об управляемом объекте информации исключительно или преимущественно качественного характера.

### 1.1.2 Концепция устойчивого развития и ее реализация при управлении сложными системами

Понятие устойчивого развития (англ. – sustainable development) впервые было введено в 1987 г. Международной комиссией по окружающей среде и развитию, созданной Генеральной Ассамблеей ООН (Комиссия Г.Х. Брундтланд), в докладе [35]. При этом под устойчивым развитием понималось такое развитие, которое удовлетворяет потребности нынешнего поколения, не подрывая возможностей будущих поколений удовлетворять их собственные потребности. Данное понятие может употребляться применительно

ко всей планете в целом, а также по отношению к отдельным странам, регионам, разным видам хозяйственной деятельности. В докладе [36] также отмечалось, что стратегия устойчивого развития направлена на достижение гармонии между обществом и окружающей средой.

В коллективной монографии [37] устойчивое развитие определяется как стабильное сбалансированное социально-экономическое развитие, не разрушающее окружающую природную среду и обеспечивающее непрерывный прогресс общества. Авторы монографии выделяют четыре основных направления, позволяющие обеспечить переход к устойчивому развитию:

- сохранение естественных экосистем;
- стабилизация численности населения;
- экологизация производства;
- рационализация потребления.

Концепции устойчивого развития свойственно сочетание различных методологических подходов и уровней теоретического осмысления глобальных проблем современности [37]:

– историческая направленность: проявляется в изучении и анализе кризисов и катастроф, происходивших в результате деятельности человека, и в оценке конкретно-исторической ситуации в мире;

– футурологическая направленность: специфическая комбинация поисковых и нормативных прогнозов, способствующая созданию проектов, в которых делается особый акцент на предсказание возможных последствий их осуществления для мирового развития;

– эвристическая направленность: проявляется в расширении проблемного поля современной глобалистики благодаря постановке вопросов, принципиально важных для определения путей и перспектив всемирного развития, генерировании импульса, инициировавшего исследование инновационного плана в областях естественных, технических и общественных наук, а также в непосредственном выдвижении новых теоретических положений и практических рекомендаций, которые, прежде всего, касаются выработки не-

известных ранее альтернатив современному пути эволюции цивилизации и представлений о мире в целом;

– междисциплинарный характер: весь комплекс проблем устойчивого развития исследуется на основе методологии системного анализа.

Кроме того, в концепции устойчивого развития, по сравнению со многими другими глобалистскими и футурологическими теориями, оказался существен политологический аспект (присутствие материалов, которые могли бы принести пользу лицам, занимающимся практической политикой) [38].

Концепция устойчивого развития тяготеет к универсальности, имеет в своей основе комплексную междисциплинарную систему знаний, которая рассматривает в неразрывном единстве тенденции естественной эволюции, этапы развития техносферы и социально-политические процессы становления на планете прогрессивной цивилизации [39].

В настоящий момент существует несколько вариантов расчета индикаторов (измерителей) устойчивого развития – показателей, выводимых из накопленных знаний, которые обычно нельзя использовать для интерпретации изменений, позволяющих судить о состоянии или изменении экономической, социальной или экологической переменной. В основе этих расчетов в основном лежат два подхода:

1) построение обобщенного, агрегированного индикатора; основанного на нескольких других индикаторах; из-за ряда статистических (отсутствие необходимой и достоверной статистической базы), методологических проблем, а также сложности расчета общепризнанного интегрированного индикатора устойчивого развития пока не существует;

2) построение системы индикаторов: этот подход более распространен и базируется на построении системы показателей, которые могут отражать отдельные аспекты устойчивого развития.

Наиболее яркий пример второго подхода – это методология Комиссии ООН по устойчивому развитию. Также задача построения системы индикаторов рассматривается [40-42]:

- в методологии расчета индикаторов для ежегодного доклада Всемирного Банка «The World Development Indicators»;

- в совместной системе индикаторов Всемирного Банка, Программы ООН по окружающей среде (UNEP) и Международного центра тропического сельского хозяйства (CIAT), используемой для оптимизации управления природопользованием в Центральной Америке («Developing indicators. Experience from Central America»);

- в системе экологических индикаторов Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР),

- в системе индикаторов США и Великобритании.

Изначально в методологии Комиссии ООН по устойчивому развитию, которая была первой комплексной разработкой в этой области, общее число предложенных индикаторов составляло 132. Все индикаторы были разделены на четыре группы [43]:

- социальные (41 индикатор),
- экономические (26 индикаторов),
- экологические (55 индикаторов)
- организационные (10 индикаторов).

Однако в последнее время в мире все чаще, наряду с системами, содержащими достаточно большое количество показателей, разрабатываются сжатые системы индикаторов, сокращенные списки так называемых ключевых (или базовых) индикаторов устойчивого развития. Комиссия ООН по устойчивому развитию также сократила число используемых индикаторов более чем в 2 раза [40].

Проблема индикаторов устойчивого развития очень сложна, существующие предложения разноплановы и противоречивы [37]. Как правило, перечень критериев, которым должны удовлетворять индикаторы устойчивого развития, включает в себя следующие требования:

- должна быть реализована возможность использования индикаторов на различных уровнях;

- индикаторы должны иметь однозначную интерпретацию для различных категорий лиц, принимающих решения;
- индикаторы должны иметь количественное выражение;
- индикаторы должны опираться на имеющуюся систему национальной статистики и не требовать значительных издержек для сбора информации и расчетов;
- индикаторы должны соответствовать особенностям принятия решений;
- индикаторы должны быть репрезентативны для международных поставлений;
- количество индикаторов должно быть конечным и др.

В современных методологиях расчета индикаторов, как правило, используются методы с применением количественных показателей, которые искажают действительность. К таким методам в [37] отнесены:

- монетарный учет изменений: монетарные оценки являются относительной и недостаточно информативной мерой;
- оценка в натуральных единицах: в рамках данного подхода может существовать столько единиц измерения, сколько наименований содержат разнообразные ценности, однако нельзя сопоставить различные единицы измерения (тонны, метры, человеко-часы и т.д.);
- безразмерные оценки, такие, например, как проценты к предыдущему году, бальные шкалы, доли от целого, условные единицы и т.д.: отсутствие размерности таких индикаторов является иллюзорной, поскольку в них неявно используются либо какие-то измеримые величины, либо искусственно, без соответствующего обоснования введенные шкалы, которые не дают возможности адекватно оценивать реальные процессы [44].

Таким образом, существующие количественные показатели не решают проблемы соизмерения разнокачественных понятий, не являются аддитивными, субъективны, а также не позволяют оценить эффективность действий и обеспечить устойчивое развитие.

Применение концепции устойчивого развития и ее реализация при управлении сложными системами (в том числе – при управлении железных дорог) подразумевает, в первую очередь, учет экологической и социальной составляющих процессов функционирования сложных систем, а также внедрение ресурсосберегающих технологий. Одной из основных теоретических задач является разработка показателей оценки эффективности функционирования сложных систем, позволяющих реализовать принципы устойчивого развития.

## 1.2 Анализ разработок в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог

Исследованиями, связанными с повышением эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог путем совершенствования работы отдельных элементов транспортных сложных систем, установлением связей между элементами и созданием моделей функционирования, как отдельных подсистем, так и их комплексов проводились многими учеными. Этим вопросам посвящены работы отечественных представителей научной школы, а именно докторов технических наук, профессорам Шафита Е.М., Нагорного Е.В., Бутько Т.В., Данька М.И., Жуковицкого И.В., Бобровского В.И., Котенко А.М., Яновского П.О. Также этим вопросом занимались и представители русских и белорусских научных школ – доктора технических наук, профессора Смахов А.А., Сотников Е.А., Угрюмов А.К., Негрей В.Я., Грунтов П.С. и др. [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54]

Анализ теоретических разработок в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог позволяет выделить ряд характерных работ, которым присущи следующие особенности:

– в большинстве работ [55-57,60, 65, 67,68, 74, 75, 81, 82, 84] в качестве критерия эффективности (целевой функции) используются комплексные показатели экономического характера, однако существуют также методы и

подходы, которые рассматривают процессы повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог на базе технологических показателей [58, 59, 61, 63, 64, 66, 70] или показателей качества [83], а также показателей, учитывающих экологическую составляющую технологических процессов [94-98];

– одними из наиболее часто употребляемых методов определения оптимальных параметров работы железных дорог в проанализированных теоретических разработках являются методы линейного программирования и их производные [56, 57, 60, 66, 67], при этом обычно используется инструментарий, характерный для решения транспортной задачи как разновидности задачи линейного программирования;

– существующие теоретические разработки, как правило, не используются широко в практике управления железными дорогами в связи с отсутствием специализированного программного обеспечения (среди проанализированных работ только в [78,98] предлагаются специализированные программные комплексы), реализующего соответствующие модели оптимизации и рационализации, а также методических рекомендаций практического характера.

В теоретических разработках, использующих в качестве критерия эффективности показатели экономического характера, наиболее часто используются суммарные затраты: макроэкономические затраты [55], сумма затрат транспортных и затрат на хранение [56], затраты на задержку при выполнении технологических операций [57], суммарные затраты на транспортировку, хранение и корректировку программ производства [60], суммарные затраты логистической системы [65], эксплуатационные затраты локомотивного хозяйства [82], затраты на перевозку [67, 74]. Кроме того, в качестве экономических показателей эффективности также используются прибыль [68, 79] или ее производные [70].

В [74] предложены новые подходы к совершенствованию экономико-математической модели управления эксплуатационными расходами на пред-

приятиях железнодорожного транспорта, позволяющие путем введения соответствующих нормативов реагировать на изменения элементов внешней и внутренней среды предприятия. На основе предлагаемой методики автором получена возможность определения себестоимости перевозки по каждому участку, которая позволяет оценить долю расходов различных подразделений в части расходов, зависящих и независящих от размеров материалопотока. Данное направление исследований развивается в работе [79], автором которой разработаны методические основы формирования механизма использования амортизационного фонда с целью повышения эффективности работы железных дорог за счет его депонирования на банковском счету. В [79] разработаны методика формирования амортизационного фонда и соответствующий механизм его внедрения на предприятиях железной дороги. Среди других работ подобного характера следует отметить диссертацию [84], автор которой предлагает методику определения себестоимости перевозок в условиях рыночной экономики, на основании которой составлена калькуляция для разных видов перевозок, тяги и сообщений, а также работу [82], в которой разработана экономико-математическая модель формирования эксплуатационных затрат локомотивного хозяйства с использованием нормативно-экономических измерителей и матриц, позволяющих проводить комплексную оценку затрат, а также оценивать экономическую эффективность отдельных структурных подразделений железнодорожного транспорта.

Ряд работ в области управления на транспорте направлен на выявление связей между элементами в составе системы железных дорог [65-67, 75-77, 82].

В диссертации [75] обоснована применимость модели внутреннего рынка для совершенствования системы управления экономической деятельностью железных дорог. Автором проанализированы прямые и обратные финансово-экономические связи между структурными подразделениями железнодорожного транспорта, произведена их классификация по характеру отношений, а также разработан и апробирован алгоритм функционирования внут-

ренного рынка на уровне структурного подразделения железнодорожного транспорта и разработана методика формирования внутрифирменных цен.

В [76] автором предложена обобщенная методика системного анализа для разработки основных направлений развития структурного подразделения железной дороги (дистанции) на основе формирования целей и критериев управления, функций и задач, прогнозов и нормативов планирования с помощью методик, базирующихся на экономических оценках вариантов планов и их корректировки и выбора наилучшего варианта по критерию прибыли.

В диссертации [77] проведен системный анализ структуры и содержания производственно-хозяйственной деятельности предприятий железной дороги. Автором показано, что переход на новые принципы организации производства и управления акцентирует внимание на рациональном поведении самостоятельных субъектов компании в отношении экономного расходования ресурсов, а также предложена концепция эффективного управления кадровыми ресурсами предприятий отрасли, которая предполагает выделение самостоятельных бизнес-структур в организационной структуре корпорации, обеспечивающих рациональное управление ресурсами и реализацию комплексного взаимодействия отдельных подсистем железной дороги.

Авторы статьи [67] предлагают двухуровневую модель, содержащую оптимизационные задачи для первого уровня – управление работой каждого вида транспорта, и для второго уровня (координирующего центра) – на базе единой системы управления парком грузовых вагонов. Математический аппарат, использованный при разработке модели управления, является характерным для группы работ [56, 57, 60, 66, 67], использующих методы линейного программирования при управлении подразделениями железной дороги.

Первый уровень модели предполагает решение оптимизационных задач линейного программирования:

$$\sum_{i=1}^{I_k} \sum_{j=1}^J C_{ij} \cdot Q_{ij}^{(\Pi)} \rightarrow \min, \quad (1.1)$$

при следующих ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^J a_{ij} \cdot Q_{ij}^{(\Pi)} \leq \tau_{ik}, \quad i=1, \dots, I_k, \\ \sum_{j=1}^J Q_{ij}^{(\Pi)} \geq Q_{ij}^{(\Phi)}, \quad j=1, \dots, J, \\ Q_{ij}^{(\Pi)} \geq 0, \quad i=1, \dots, I_k, \quad j=1, \dots, J, \end{array} \right. \quad (1.2)$$

где  $I_k$  – количество типов подвижного состава или транспортных средств  $k$ -ого вида транспорта;

$J$  – общее количество направлений перевозок;

$C_{ij}$  – затраты на перевозку 1 т груза  $i$ -ым типом подвижного состава  $k$ -ого вида транспорта, грн/т;

$a_{ij}$  – трудоемкость перевозок  $i$ -ым типом подвижного состава  $k$ -ого вида транспорта на  $j$ -ом направлении, ч/т;

$\tau_{ik}$  – бюджет времени работы  $i$ -ого типа  $k$ -ого вида транспорта, ч;

$Q_{ij}^{(\Pi)}$ ,  $Q_{ij}^{(\Phi)}$  – запланированный и фактический объемы перевозок на  $j$ -ом направлении для  $i$ -ого типа подвижного состава  $k$ -ого вида транспорта соответственно, т.

На втором уровне при управлении предполагается решение задачи

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{I_k} \sum_{j=1}^J d_{kij} \cdot Q_{kj}^{(\Phi)} \rightarrow \min, \quad (1.3)$$

с учетом следующей системы ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^J Q_{ij}^{(\Phi)} \leq \tau_{ik}, j=1, \dots, J, \\ \sum_{k=1}^K Q_k = \sum_{i=1}^{I_k} \max(t_{ik} \cdot a_{ij}^{-1}), k=1, \dots, K, \\ \sum_{k=1}^K Q_{kj}^{(\Phi)} \geq 0, j=1, \dots, J, \\ Q_{kj}^{(\Phi)} \geq 0, j=1, \dots, J, k=1, \dots, K, \end{array} \right. \quad (1.4)$$

где  $K$  – количество различных видов транспорта, взаимодействующих в транспортном узле;

$\sum_{k=1}^K Q_k$  – общий объем перевозок всех видов транспорта, т;

$d_{kij}$  – удельные затраты на перевозку грузов  $i$ -ым типом подвижного состава  $k$ -ого вида транспорта на  $j$ -ом направлении, грн/т.

Приведенная двухуровневая модель, в отличие от модели, предложенной в работе [66], может быть использована в процессе управления взаимодействием различных подразделений железнодорожного транспорта. Основным недостатком такой модели, как и большинства других теоретических разработок, является использование в качестве исходных данных детерминированных показателей спроса и экономико-технологических показателей. Как отмечается в [103], такая особенность существенно снижает адекватность моделей и, как следствие, корректность результатов их использования при управлении железными дорогами.

Более адекватно описывает реальные процессы функционирования железных дорог комплекс моделей стохастического программирования, предложенный в работе [65]. В отличие от традиционных, предложенный подход предполагает определение оптимальной массы груза на маршруте и минимизацию объема груза «на колесах» с разработкой рекомендаций относительно формирования единой технологии функционирования инфраструктуры железных дорог в соответствии с изменением грузопотоков.

В статье [85] предложен новый подход к решению задачи распределения потоков поездов по участкам железнодорожного полигона на основе метода векторной оптимизации. Данная задача решается оперативно-диспетчерским аппаратом железных дорог на основе не формализованных факторов, в основном за счет опыта персонала. Особый научный и практический интерес вызывают вопросы распределения поездопотоков в условиях наличия нескольких собственников отдельных участков железных дорог.

Автор работы [59] при управлении железными дорогами предлагает использовать имитационное моделирование для решения задач прогнозирования продолжительности оборота контейнеров при альтернативных способах организации логистических цепочек, а также задач прогнозирования времени нахождения контейнера в региональной транспортно-логистической системе с учетом пропускной способности терминальной инфраструктуры, а также альтернативных способов организации продвижения материального потока. Следует отметить, что имитационное моделирование как методология решения задач управления работой транспорта приобрело широкое распространение в теоретических разработках [70-73]. Основным преимуществом данной методологии, кроме непосредственного учета вероятностной природы технологических процессов, является возможность детализации существующих моделей, их непрерывное совершенствование при управлении сложными динамическими системами с целью повышения их адекватности.

Вопросы усовершенствования работы железнодорожных узлов и их отдельных элементов освещались в публикациях молодых ученых, таких как Козаченко Д.Н., Коробьева Р.Г., Мацюк В.И., Березовый Н.И. [86-93].

Особое внимание привлекает работа [93], которая посвящена вопросам усовершенствования технологий технической переработки местного вагонопотока в развитых (крупных) железнодорожных узлах. Метод, построенный на принципах разработанного комплекса математических моделей, имеет существенные преимущества, поскольку его алгоритм дает возможность определить оптимальное место концентрации технической переработки

местных вагонов, соответственно выбранным параметрам и критериям оценки, независимо от сложности, физической конфигурации, корреспонденции и других местных условий развитых узлов.

Экологическая составляющая процессов функционирования железных дорог при эксплуатации транспортных средств рассматривается в работах [94-98].

В диссертации [94] проведена комплексная оценка развития железнодорожного транспорта на основании системно-структурного анализа показателей производственно-хозяйственной деятельности и финансового состояния отрасли, а также определены качественные и количественные параметры влияния железнодорожного транспорта на атмосферу, водные и земельные ресурсы, что позволило охарактеризовать его экологическую опасность и обосновать основные направления уменьшения негативного влияния железнодорожного транспорта на окружающую среду. Особый интерес представляет проведенное автором транспортно-экологическое районирование территории Украины на основании многокритериального анализа с учетом протяженности железных дорог, объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и объемов забора водных ресурсов.

Автором работы [98] предложена методология управления системой природопользования на железнодорожном транспорте в целом и ее составляющими, основанная на применении системного подхода и отражающая внутри каждого объекта железнодорожного транспорта взаимосвязь и взаимное влияние производственных процессов и компонентов окружающей среды. В работе предложены абсолютный и относительный показатели экологической безопасности природопользования, определяемые следующим образом:

$$\text{ЭПЭБ}_{\text{пр}} = (S_1 - S_2) - \left( \frac{K}{n_1} + \frac{\text{Э}}{n_2} + P \right), \quad (1.5)$$

$$КЭБ_{пр} = \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot ЭПЭБ_{пр}}{n_2 \cdot K + n_1 \cdot Э + n_1 \cdot n_2 \cdot P}, \quad (1.6)$$

где ЭПЭБ<sub>пр</sub> – экономический показатель экологической безопасности природопользователя от реализации природоохранных мероприятий;

КЭБ<sub>пр</sub> – относительный показатель эколого-экономической эффективности природопользования на железнодорожном транспорте;

$S_1, S_2$  – ущерб окружающей среде, наносимый загрязняющими факторами природопользователя до и после реализации природоохранных мероприятий соответственно;

$K$  – капитальные вложения (инвестиции) природопользователя в соответствующие природоохранные мероприятия;

$n_1$  – гарантированный срок реализации природоохранных мероприятий при неизменной их эффективности;

$Э$  – эксплуатационные расходы на реализацию соответствующих природоохранных мероприятий;

$n_2$  – период обслуживания природоохранных мероприятий;

$P$  – плата за загрязнение окружающей среды и другие виды вредного воздействия на нее.

Предложенные критерии экологической безопасности позволяют получить оценку как разницу для двух различных состояний управляемого объекта (т.е. оценка является относительной), однако не позволяют получить точечную оценку (для текущего состояния, без учета состояний предыдущих). По этой причине критерии (1.5) и (1.6) не могут быть использованы в составе комплексного показателя эффективности функционирования железных дорог.

Существующие работы позволяют оптимизировать использование ресурсов, учесть экологическую составляющую технологических процессов функционирования железных дорог, однако проанализированные работы не содержат моделей, позволяющих предложить мероприятия, которые учитывают основные требования к устойчивому развитию в комплексе.

### 1.3 Направления повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог

В [104] отмечается, что стратегическим ориентиром инновационного развития железных дорог является достижение режима полного соответствия предложения транспортных услуг наивысшего качества спросу на эти услуги при условии достижения высокого уровня безопасности движения, выполнения норм экологической безопасности, внедрения ресурсосберегающих и безотходных технологий.

Руководством Укрзализниці на основании потребностей в коренном технологическом переоснащении материально-технической базы железных дорог принято решение основные усилия по инновационному развитию железнодорожного транспорта на перспективу сконцентрировать по следующим направлениям [105]:

- создание новых поколений подвижного состава;
- модернизация путей для внедрения скоростного движения;
- электрификация базовых направлений железнодорожных перевозок;
- развитие средств связи и автоматизированных систем управления на железнодорожном транспорте;
- оборудование приграничных станций;
- разработка природоохранных мероприятий по соблюдению норм экологической безопасности;
- создание комплексов для организации новых видов перевозок (контейнерные, терминалы, перегрузочные пункты и др.);
- реконструкция международных транспортных коридоров.

Как видим, данные направления соответствуют в целом основным принципам концепции устойчивого развития.

В [106] указывается, что экономическая ситуация на железнодорожном транспорте способствует централизованному управлению процессами инно-

вадий. В том числе, существует возможность при необходимости определять потребности в замене использующихся техники и технологий, а также внедрять инновационные решения на железных дорогах. Для реализации таких мероприятий необходимо осуществлять поиск и разработку инновационных решений, их оценку относительно экономической эффективности, а также технического и технологического совершенства, обоснования возможностей их реализации собственными силами или приобретения по принципу аутсорсинга [107].

В качестве элементов управления инновационной деятельностью со стороны Укрзализниці в [108] рекомендуется рассматривать планирование, прогнозирование, разработку маркетинговой стратегии, сбыта, производства, проведения мониторинга, организации, подбора высококвалифицированных кадров, что обеспечит достижение социального, экономического, научно-технического эффекта.

В качестве стратегических направлений управления инновационной деятельностью железных дорог в [106] предлагается выделить следующие направления:

- обновление парка локомотивов, пассажирских и грузовых вагонов, путевой техники, инфраструктуры и совершенствование ремонтной базы подвижного состава;
- совершенствование системы управления перевозочным процессом и транспортной логистикой;
- развитие высокоскоростного движения;
- упорядочение эксплуатации и содержания международных транспортных коридоров;
- разработка и внедрение инновационных спутниковых технологий;
- восстановление собственного транспортного машиностроения;
- создание системы управления качеством услуг и охраны окружающей среды.

Перспективные направления развития железных дорог, представленные в [105] и [106], в общих чертах согласуются между собой и содержат схожие позиции. Среди этих позиций основными направлениями технологического характера являются рационализация существующего парка подвижного состава, автоматизация технологических процессов обслуживания клиентуры и совершенствование существующих технологических схем обслуживания.

Проанализированные работы в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог содержат соответствующие модели, позволяющие решить задачи совершенствования технологии по указанным направлениям развития, однако концепция устойчивого развития предполагает не только совершенствование технологии. Ряд проанализированных работ направлен на повышение экологической безопасности эксплуатации транспортных средств железных дорог, однако эта задача решается обособленно от задачи повышения экономической эффективности технологических процессов. При этом можно утверждать, что социальная составляющая функционирования железных дорог, учет которой является еще одним из принципов концепции устойчивого развития, в проанализированных научных работах не рассматривается вообще.

Для решения задач повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиций их устойчивого развития целесообразно выделить следующие основные направления, которые будут рассматриваться в данной работе как комплекс мероприятий:

- формирование технологий совершенствующих процессы функционирования железных дорог: решение задач формирования рациональной структуры парка маневровых локомотивов, а также обоснование рациональной перерабатывающей способности фронтов погрузо-разгрузочных работ;
- комплексная оценка экологической составляющей процессов функционирования и ее учет в задачах совершенствования технологий;

– учет социальной составляющей процессов функционирования железных дорог за счет включения в математические модели принятия решений совокупности параметров, отражающих финансовые показатели социальной составляющей функционирования железных дорог – объем денежных средств, выделяемых на повышение заработной платы работников железных дорог, отчисления на социальные программы и программы по обучению работников.

Для реализации комплекса указанных мероприятий необходима разработка модели процесса функционирования железных дорог как сложной стохастической системы. При этом в соответствии с основными принципами системного анализа, в рамках такой модели необходимо определить:

– управляющие переменные, которые позволяют численно описать транспортные средства, обеспечивающие функционирование железных дорог;

– критерий (критерии) эффективности, позволяющий численно оценить результат эксплуатации транспортных средств железных дорог; формирование критерия эффективности является ключевой задачей, поскольку критерий должен отражать все ключевые принципы концепции устойчивого развития;

– показатели, описывающие влияние внешней среды на систему; данные показатели обуславливают стохастическое поведение системы и являются, как правило, случайными величинами; обоснование параметров случайных величин является трудоемкой задачей, требующей обработки большого объема статистической информации;

– элементарный состав железных дорог как сложной системы и структуру связей между элементами; для описания структуры связей необходимо численно охарактеризовать каждый элемент системы.

## Выводы по первому разделу

1. Железные дороги относятся к сложным системам управления, поэтому при разработке мероприятий по повышению эффективности эксплуатации их транспортных средств необходимо учитывать стохастический характер не только внешних воздействий, но и связей между элементами внутри системы. Современной тенденцией в управлении хозяйственными системами является использование концепции устойчивого развития при разработке мероприятий по повышению эффективности их функционирования.

2. Проведенный анализ разработок в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог позволяет сделать вывод, что существующие модели могут использоваться при оптимизации использования транспортных средств, учете экологической составляющей технологических процессов функционирования железнодорожных станций и эксплуатации средств транспорта, однако проанализированные работы не содержат моделей, позволяющих предложить мероприятия, которые учитывают основные требования к устойчивому развитию в комплексе.

3. Проведенный анализ позволяет выделить в качестве основных направлений повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиций их устойчивого развития – формирование технологий, совершенствующих процессы функционирования железных дорог, комплексную оценку экологической составляющей технологических процессов и ее учет в задачах формирования технологий совершенствующих процессы функционирования, а также учет социальной составляющей процессов функционирования железных дорог.

## РАЗДЕЛ 2

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ЖЕ- ЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ПОЗИЦИЙ ИХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

2.1 Разработка системы показателей, характеризующих эффективность эксплуатации транспортных средств железных дорог и их устойчивое развитие

Результаты теоретических исследований показали, что действующая система показателей оценки работы транспортных средств ориентирована на работу железных дорог в условиях роста объемов перевозок и повышения интенсивности использования транспортных средств и постоянных устройств. При падении же объемов работы и образовании резервов транспортных средств, пропускных, провозных и перерабатывающих способностей перегонов, станций и узлов применение статистической оценки работы железных дорог может привести к принятию ошибочных решений способствующих снижению эффективности ее функционирования. Новые методы оценки эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог должны быть направлены на комплексную оценку их функционирования.

Поэтому показатели устойчивого развития железных дорог должны отражать мероприятия по разработке и внедрению технологий совершенствующих процессы функционирования, а также характеризовать экологическую и социальную составляющие процесса функционирования железных дорог. При этом проведение мероприятий по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог необходимо проводить с учетом оценки качества обслуживания клиентуры, поэтому к показателям оценки эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог также целесообразно отнести критерии, позволяющие охарактеризовать качество обслуживания клиентуры.

В качестве показателя, который характеризует развитие железных дорог, в направлении совершенствования технологических процессов функционирования железных дорог, предлагается использовать интегральный критерий эффективности, отображающий приведенную по стоимости технического оснащения  $i$ -ого типа сумму:

$$E_{\text{тех}} = \sum_i \Delta R_i \cdot c_{Ri}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta R_i$  – сокращение (прирост) технического оснащения  $i$ -ого типа вследствие внедрения мероприятий по совершенствованию технологических процессов силами железных дорог;

$c_{Ri}$  – стоимость использования технического оснащения  $i$ -ого типа в процессе функционирования железных дорог.

В качестве основных видов технического оснащения, обеспечивающих технологические процессы железных дорог, рассматриваются производственное и энергетическое оснащение, обеспеченное соответствующими трудовыми, финансовыми и информационными ресурсами. К производственному оснащению относится подвижной состав, а также средства механизации погрузочно-разгрузочных работ (ПРР), механизации и автоматизации сортировочных устройств на сортировочных, участковых и грузовых станциях, а также средства механизации содержания и ремонта пути. Энергетическое оснащение можно разделить по типу на электрическое, обеспечивающее функционирование электрифицированных участков железных дорог и сортировочных комплексов на станциях, а также оснащение топливное, обеспечивающее выполнение движущих операций на не электрифицированных участках и в транспортных узлах (сортировочных, участковых и грузовых станциях).

Численно производственное оснащение может быть описано суммарным временем работы механизмов соответствующего типа (локомотивов, механизмов сортировочных устройств или погрузо-разгрузочных механиз-

мов), стоимость его использования выражается стоимостью 1 часа работы механизма. Энергетическое оснащение численно измеряется в кВт·ч для затрат электроэнергии и в количестве использованного топлива (литры или тонны) для затрат топлива соответственно.

С учетом выделенных типов технического оснащения, показатель совершенствования процессов функционирования железных дорог можно представить в виде:

$$E_{\text{тех}} = \Delta T_{\text{лок}} \cdot c_{\text{лок}} + \Delta T_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} + \Delta R_{\text{т}} \cdot c_{\text{т}} + \Delta R_{\text{эл}} \cdot c_{\text{эл}}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta T_{\text{лок}}$  – изменение суммарного времени работы локомотивов железных дорог, ч;

$\Delta T_{\text{м}}$  – изменение суммарного времени работы погрузо-разгрузочных механизмов (ПРМ) и других механизмов железных дорог, ч;

$\Delta R_{\text{т}}$  – изменение суммарного количества топлива, использованного при эксплуатации транспортных средств железных дорог вне грузовых технических станций (при перемещении вагонов по транспортной сети между грузовыми техническими станциями), т;

$\Delta R_{\text{эл}}$  – изменение суммарного количества электрической энергии, использованной при эксплуатации транспортных средств железных дорог, кВт·ч;

$c_{\text{лок}}, c_{\text{м}}$  – стоимость 1 часа работы локомотивов, а также 1 часа работы механизмов сортировочных устройств и ПРМ соответственно, грн/ч;

$c_{\text{т}}, c_{\text{эл}}$  – стоимость 1 тонны топлива и 1 киловатт-часа электроэнергии соответственно, грн/т и грн/кВт·ч.

Следует отметить, что себестоимость работы локомотивов и механизмов  $c_{\text{лок}}$  и  $c_{\text{м}}$  на станциях железных дорог включает, кроме прочих статей затрат, стоимость энергоресурсов. Изменение затрат энергоресурсов  $\Delta R_{\text{т}}$  и  $\Delta R_{\text{эл}}$  в формуле (2.2) рассматривается для передвижения транспортных средств по участкам транспортной сети.

Экологическую составляющую  $E_{\text{эк}}$  устойчивого развития процесса эксплуатации транспортных средств железных дорог целесообразно оценивать на основании показателей, отображающих приведенное к денежному эквиваленту изменение выбросов вредных веществ в атмосферу и шумовое загрязнение окружающей среды [97]:

$$E_{\text{эк}} = \Delta M_{\text{атм}} \cdot c_{\text{эк}} + \Delta D_{\text{шум}} \cdot c_{\text{шум}}, \quad (2.3)$$

где  $\Delta M_{\text{атм}}$  – изменение выбросов вредных веществ в атмосферу, усл. т;

$c_{\text{эк}}$  – денежный эквивалент ущерба, причиняемого в результате выброса 1 тонны окиси углерода в атмосферу, грн/усл. т;

$\Delta D_{\text{шум}}$  – изменение шумового загрязнения от работы транспортных средств и механизмов сортировочных устройств железнодорожного транспорта за счет технического усовершенствования ходовой части подвижного состава и средств механизации, дБА;

$c_{\text{шум}}$  – денежный эквивалент ущерба, причиняемого в результате шумового загрязнения окружающей среды, грн/дБА.

В отработавших газах двигателей локомотивов кроме паров воды находится более 200 химических соединений и элементов. Наиболее опасными для окружающей среды и здоровья людей являются окись углерода ( $\text{CO}$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), серные соединения ( $\text{SO}_x$ ), несгоревшие углеводороды ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ) и твердые аэрозоли (сажа).

В соответствии с типовой методикой и рекомендациями Института комплексных транспортных проблем величина выбросов  $M$  отработанных газов определяется по формуле:

$$M = \sum_{i=1}^n A_i \cdot m_i, \quad (2.4)$$

где  $n$  – общее количество видов примесей, выбрасываемых в атмосферу;

$A_i$  – показатель относительной агрессивности примеси  $i$ -ого вида, усл. т/т (табл. 2.1);

$m_i$  – масса выброса примеси  $i$ -го вида в атмосферу, т.

Следует отметить, что изменение количества выбросов вредных веществ в атмосферу достигается как за счет изменения количества локомотивов, работающих на дизельном топливе, так и за счет электрификации участков транспортной сети в рамках железных дорог.

Таблица 2.1 – Значения показателя относительной агрессивности примеси [98]

Вредное вещество	Показатель относительной агрессивности вещества
Окись углерода	1,0
Серный газ	16,5
Сероводород	41,5
Серная кислота	49,0
Окислы азота в пересчете (по массе)	42,1
Углеводные пары (по углероду)	1,5

Оценка шумового загрязнения от работы транспортных и механизмов сортировочных устройств железнодорожного транспорта может быть осуществлена на основании «Методических рекомендаций по учету шумового загрязнения в составе территориальных комплексных схем охраны среды городов» [111].

Шумовой характеристикой потоков железнодорожных поездов является эквивалентный уровень  $L_{A\text{экв}}$ , дБА, на расстоянии 25 м от оси железнодорожного пути, ближайшего к расчетной точке. Расчет шумовой характеристики железнодорожного потока выполняется по формуле:

$$L_{A\text{экв}} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{n_p} 10^{0,1 \cdot L_{A\text{max}(i)}} - \Delta L_{A1} \pm \Delta L_A, \quad (2.5)$$

где  $n_{п}$  – количество поездов на участке железных дорог в течение расчетного периода;

$L_{A\max(i)}$  – максимальное значение уровня звука при прохождении единичного  $i$ -ого поезда, дБА;

$\Delta L_{A1}$  – поправка на длину составов, дБА;

$\Delta L_A$  – поправка в зависимости от скорости движения, дБА.

Значения  $L_{A\text{экв}}$  в зависимости от интенсивности движения и скоростей движения приведены в табл. 2.2 и табл. 2.3.

Таблица 2.2 – Характеристика шума железнодорожных поездов, дБА

Тип поездов	Интенсивность движения, поездов./ч					
	2	5	10	15	20	30
Пассажирские	86	90	93	95	96	98
Электропоезда	89	93	96	98	99	101
Грузовые	88	92	95	97	98	100

Таблица 2.3 – Поправки к характеристике железнодорожного потока с учетом скоростей движения, дБА

Тип поездов	Численная величина поправки						
	-15	-10	-5	0	5	10	15
Пассажирские	-	30	40	60	90	-	-
Электропоезда	30	-	40	60	80	100	-
Грузовые	-	30	-	0	100	-	-

Социальная составляющая  $E_{\text{соц}}$  процесса функционирования железных дорог может быть оценена непосредственно суммой денежных отчислений на мероприятия по повышению заработной платы работников, а также на социальные программы (затраты на здравоохранение, санаторно-курортные расходы и т.п.) и программы по обучению работников железных дорог:

$$E_{\text{соц}} = \Delta C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{обуч}}, \quad (2.6)$$

где  $\Delta C_{\text{зп}}$  – денежные средства, направляемые на повышение заработной платы работников железных дорог, грн;

$C_{\text{соц}}$  – отчисления на социальные программы, грн;

$C_{\text{обуч}}$  – отчисления на программы по обучению работников, грн.

Средства на социальную составляющую развития железных дорог выделяются из чистой прибыли дороги за предыдущий период.

Развитие железных дорог в направлении повышения качества обслуживания грузовладельцев предлагается оценивать на основании показателя, характеризующего уменьшение суммарного времени обработки вагонопотока за счет совершенствования технологии обслуживания. Данный показатель определяется на основании изменения суммарного времени обработки вагонов в транспортных узлах и грузовых пунктах, а также средневзвешенной стоимости 1 часа простоя груженого вагона.

Показатель развития  $E_k$  по направлению повышения качества обслуживания оценивается по формуле:

$$E_k = \Delta T_{\text{ваг}} \cdot c_{\text{ваг}}, \quad (2.7)$$

где  $\Delta T_{\text{ваг}}$  – изменение суммарного времени обработки вагонов в транспортных узлах и грузовых пунктах железной дороги, а также при осуществлении передвижения вагонопотока в пределах участка транспортной сети дороги, ч;

$c_{\text{ваг}}$  – средневзвешенная стоимость 1 часа простоя груженого вагона, грн/ч.

Поскольку представленные выше численные показатели оценки развития железной дороги имеют одинаковую единицу измерения – сумма денежных средств, то интегральный показатель устойчивого развития  $E_{\text{и}}$  может быть представлен в виде арифметической суммы указанных показателей:

$$\begin{aligned}
E_{\text{и}} &= E_{\text{тех}} + E_{\text{эк}} + E_{\text{соц}} + E_{\text{к}} = \\
&= \Delta T_{\text{лок}} \cdot c_{\text{лок}} + \Delta T_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} + \Delta R_{\text{т}} \cdot c_{\text{т}} + \Delta R_{\text{эл}} \cdot c_{\text{эл}} + \\
&\quad + \Delta M_{\text{атм}} \cdot c_{\text{эк}} + \Delta D_{\text{шум}} \cdot c_{\text{шум}} + E_{\text{соц}} + \Delta T_{\text{ваг}} \cdot c_{\text{ваг}}.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Следует отметить, что составляющими предложенного интегрального показателя устойчивого развития являются совокупность констант ( $c_{\text{лок}}$ ,  $c_{\text{м}}$ ,  $c_{\text{т}}$ ,  $c_{\text{эл}}$ ,  $c_{\text{эк}}$ ,  $c_{\text{шум}}$ ,  $c_{\text{ваг}}$  и  $E_{\text{соц}}$ ) и совокупность показателей, характеризующих результат совершенствования технологии эксплуатации транспортных средств железных дорог (изменение суммарного времени  $\Delta T_{\text{лок}}$ ,  $\Delta T_{\text{м}}$  и  $\Delta T_{\text{ваг}}$ , потребления энергетических ресурсов  $\Delta R_{\text{т}}$  и  $\Delta R_{\text{эл}}$ , а также выбросов вредных веществ в атмосферу  $\Delta M_{\text{атм}}$  и шумового загрязнения  $\Delta D_{\text{шум}}$ ). В общем виде представленный критерий устойчивого развития является полиномом со свободным членом, при этом свободный член численно равен социальной составляющей, коэффициентами полинома являются константы, отображающие средневзвешенную стоимость технологических операций, а переменными – показатели результата усовершенствования системы железных дорог.

## 2.2 Математическая постановка задачи повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и обеспечения их устойчивого развития

Задача повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и обеспечения их устойчивого развития на основании предложенного интегрального критерия эффективности определяется как максимизация значения критерия:

$$E_{\text{и}} = E_{\text{тех}} + E_{\text{эк}} + E_{\text{соц}} + E_{\text{к}} \rightarrow \max. \tag{2.9}$$

К оптимизационным мероприятиям технологического характера, обеспечивающим повышение критерия эффективности (2.9), относятся [112, 113]:

- оптимизация количества поездных и маневровых локомотивов на перегонах и станциях железной дороги;

- оптимизация мощности погрузо-разгрузочных механизмов на станциях и других механизмов в составе железной дороги;

- оптимизация маршрутов перемещения материалопотока по транспортной сети в рамках железной дороги.

Реализация оптимизационных мероприятий обеспечивает повышение критерия эффективности, что обуславливается увеличением значений составляющих  $E_{\text{тех}}$ ,  $E_{\text{эк}}$  и  $E_{\text{к}}$ .

К мероприятиям по повышению эффективности функционирования железной дороги, имеющим технический характер, относятся [112, 113]:

- модернизация путей сообщения в рамках дороги в направлении их электрификации (данное мероприятие обеспечивает увеличение составляющей  $E_{\text{эк}}$  критерия эффективности за счет ликвидации выбросов вредных веществ на электрифицированных участках, а также увеличение составляющей  $E_{\text{тех}}$  за счет меньшей стоимости энергетических затрат для электрифицированных участков пути);

- модернизация ходовой части и сцепных устройств подвижного состава, а также средств механизации сортировочных устройств на станциях с целью снижения уровня шумовых воздействий на окружающую среду при осуществлении передвижения подвижного состава и операций по формированию-расформированию составов (данное мероприятие обеспечивает увеличение составляющей  $E_{\text{эк}}$  за счет положительного значения  $\Delta D_{\text{шум}}$ ).

Реализация мероприятий по совершенствованию технологии функционирования, определяющих значения составляющих  $E_{\text{тех}}$ ,  $E_{\text{эк}}$  и  $E_{\text{к}}$ , а также социальные отчисления осуществляются за счет прибыли железной дороги за предыдущий период. На основании доли денежных средств  $\delta_{\text{ур}}$ , выделяемых на обеспечение устойчивого развития, сумма средств на развитие определяется по формуле:

$$C_{\text{ур}}^t = \Pi_{\text{ЖД}}^{(t-1)} \cdot \delta_{\text{ур}}, \quad (2.10)$$

где  $C_{\text{ур}}^t$  – финансовые средства, выделяемые на обеспечение устойчивого развития, в период  $t$ , грн;

$\Pi_{\text{ЖД}}^{(t-1)}$  – чистая прибыль дороги за период  $(t - 1)$ , грн.

Сумма  $C'_{ур}$  составляет финансовые средства, выделяемые по направлениям устойчивого развития железной дороги, – на развитие технологий совершенствующих процессы функционирования железных дорог ( $\Delta_{тех}$ ), на снижение воздействия на окружающую среду ( $\Delta_{эк}$ ), на социальную составляющую функционирования ( $\Delta_{соц}$ ) и на повышение качества обслуживания клиентуры ( $\Delta_{к}$ ). При этом каждое из направлений характеризуется различной эластичностью затрат ресурсов – отношением соответствующей составляющей критерия эффективности к сумме выделенных ресурсов. Критерий эффективности с учетом разделения выделяемых ресурсов по направлениям устойчивого развития можно представить в следующем виде:

$$E_{и} = \Delta_{тех} \cdot \varepsilon_{тех} + \Delta_{эк} \cdot \varepsilon_{эк} + \Delta_{соц} \cdot \varepsilon_{соц} + \Delta_{к} \cdot \varepsilon_{к} \rightarrow \max, \quad (2.11)$$

где  $\varepsilon_{тех}$ ,  $\varepsilon_{эк}$ ,  $\varepsilon_{соц}$ ,  $\varepsilon_{к}$  – функции эластичности затрат ресурсов по направлениям развития технологий совершенствующих процессы функционирования железных дорог, снижения вредного воздействия на окружающую среду, обеспечения социальной составляющей функционирования и повышения качества обслуживания клиентуры соответственно.

Если сумма денежных средств, выделяемых на устойчивое развитие в течение периода  $t$ , неизменна ( $C'_{ур} = \text{const}$ ), то целевую функцию  $F_{ц}$  задачи обеспечения наиболее эффективного варианта устойчивого развития железной дороги можно представить следующим образом:

$$F_{ц} = \frac{E_{и}}{C'_{ур}} = \delta_{тех} \cdot \varepsilon_{тех} + \delta_{эк} \cdot \varepsilon_{эк} + \delta_{соц} \cdot \varepsilon_{соц} + \delta_{к} \cdot \varepsilon_{к} \rightarrow \max, \quad (2.12)$$

где  $\delta_{тех}$ ,  $\delta_{эк}$ ,  $\delta_{соц}$ ,  $\delta_{к}$  – доля ресурсов в общем объеме по направлениям развития технологий совершенствующих процессы функционирования железных дорог, снижения вредного воздействия на окружающую среду, обеспечения социальной составляющей функционирования и повышения качества обслуживания клиентуры соответственно.

Следует отметить, что  $\delta_{\text{тех}} = \frac{\Delta_{\text{тех}}}{C_{\text{ур}}}$ ,  $\delta_{\text{эк}} = \frac{\Delta_{\text{эк}}}{C_{\text{ур}}}$ ,  $\delta_{\text{соц}} = \frac{\Delta_{\text{соц}}}{C_{\text{ур}}}$  и  $\delta_{\text{к}} = \frac{\Delta_{\text{к}}}{C_{\text{ур}}}$  являются

безразмерными показателями, как и величина  $F_{\text{ц}}$ .

Очевидным ограничением при решении задачи (2.12) является полное использование ресурсов, выделяемых на устойчивое развитие. Данное ограничение в переменных целевой функции записывается в виде:

$$\delta_{\text{тех}} + \delta_{\text{эк}} + \delta_{\text{соц}} + \delta_{\text{к}} = 1. \quad (2.13)$$

Наличие других ограничений связано с тем, что во множестве функций эластичности затрат ресурсов  $\varepsilon_{\text{тех}}$ ,  $\varepsilon_{\text{эк}}$  и  $\varepsilon_{\text{к}}$  существуют пары функций, значения которых определяются общими параметрами, характеризующими технологические процессы эксплуатации транспортных средств железных дорог.

Определим функцию эластичности затрат ресурсов  $\varepsilon_i$  по  $i$ -ому направлению обеспечения устойчивого развития, как отношение эффекта  $E_i$ , полученного от мероприятий, на которые выделено и израсходовано сумма ресурсов  $P_i$ :

$$\varepsilon_i = \frac{E_i}{P_i}. \quad (2.14)$$

Для направления обеспечения социальной составляющей функционирования железной дороги в качестве эффекта выступает непосредственно сумма выделенных ресурсов, поэтому  $\varepsilon_{\text{соц}} = 1$ .

Направления внедрения технологий совершенствующих процессы эксплуатации транспортных средств железных дорог и повышения качества обслуживания клиентуры реализуются за счет оптимизационных мероприятий технологического характера: оптимизации парка маневровых и поездных локомотивов, оптимизации мощности ПРМ и других средств механизации технологических процессов, а также оптимизации маршрутов доставки грузов в рамках транспортной сети железной дороги. Возможные затраты ресурсов на реализацию данных мероприятий требуются для приобретения дополнитель-

ного количества маневровых локомотивов, погрузо-разгрузочных механизмов и других средств механизации технологических процессов.

Если для моделируемой железной дороги известны средневзвешенные балансовые стоимости локомотивов  $B_l$  и  $B_g$ , то затраты ресурсов на внедрение технологий совершенствующих процессы эксплуатации транспортных средств железных дорог  $P_{\text{тех}}$  и повышения качества обслуживания клиентуры  $P_k$  можно определить следующим образом:

$$P_{\text{тех}} = P_k = \begin{cases} \Delta N_l \cdot B_l + \Delta N_g \cdot B_g, & \text{при } \Delta N_l \geq 0 \text{ и } \Delta N_g \geq 0, \\ \Delta N_l \cdot B_l, & \text{при } \Delta N_l \geq 0 \text{ и } \Delta N_g < 0, \\ \Delta N_g \cdot B_g, & \text{при } \Delta N_l < 0 \text{ и } \Delta N_g \geq 0, \\ 0, & \text{при } \Delta N_l < 0 \text{ и } \Delta N_g < 0, \end{cases} \quad (2.15)$$

где  $\Delta N_l$ ,  $\Delta N_g$  – приращение количества маневровых и поездных локомотивов, а также ПРМ и других средств механизации соответственно по всем грузовым станциям железной дороги для разницы между значениями показателей для текущего состояния системы дороги и оптимизированного по количеству единиц, обслуживающих вагонопотоки, ед.

Затраты ресурсов  $P_{\text{эк}}$  на реализацию мероприятий по обеспечению экологической безопасности эксплуатации транспортных средств железной дороги, кроме стоимости механизмов, также включают затраты на электрификацию участков транспортной сети и затраты на техническое перевооружение парка вагонов и локомотивов, а также сортировочных устройств приспособлениями, снижающими шумовое загрязнение окружающей среды при выполнении технологических операций:

$$P_{\text{эк}} = P_{\text{тех}} + n_{\text{пс}}^{\text{мод}} \cdot d_{\text{шум}}^{\text{пс}} + n_{\text{су}}^{\text{мод}} \cdot d_{\text{шум}}^{\text{су}} + L_{\text{пс}}^{\text{эл}} \cdot d_{\text{эл}} \quad (2.16)$$

где  $n_{\text{пс}}^{\text{мод}}$  – количество подвижного состава, оснащенного в текущем периоде приспособлениями, снижающими шумовое загрязнение приспособлениями, ваг.;

$n_{\text{су}}^{\text{мод}}$  – количество сортировочных устройств, оснащенных в текущем периоде снижающими шумовое загрязнение приспособлениями, ед.;

$L_{\text{ис}}^{\text{эл}}$  – протяженность путей сообщения в границах дороги, электрифицированных в текущем периоде, км;

$d_{\text{шум}}^{\text{пс}}$  – стоимость оснащения вагона оборудованием, снижающим уровень шума при осуществлении технологических операций, грн/ваг.;

$d_{\text{шум}}^{\text{су}}$  – стоимость оснащения сортировочных устройств станций железной дороги оборудованием, снижающим уровень шума при осуществлении технологических операций, грн/ед.;

$d_{\text{эл}}$  – стоимость электрификации 1 км участка транспортной сети в границах железной дороги, грн/км.

Изменение суммарного времени работы локомотивов железной дороги  $\Delta T_{\text{лок}}$  вследствие оптимизации парка транспортных средств функционально зависит от количества локомотивов, использующихся для осуществления маневровых работ на грузовых технических станциях:

$$\Delta T_{\text{лок}} = \sum_{i=1}^{N_c} [t_{\text{pi}}^{\text{лок}}(N_l^t) - t_{\text{pi}}^{\text{лок}}(N_l^{t-1})], \quad (2.17)$$

где  $N_c$  – количество грузовых технических станций в составе дороги;

$t_{\text{pi}}^{\text{лок}}(N_l^t)$  – функциональная зависимость суммарного времени работы маневровых локомотивов от их количества  $N_l^t$  для  $i$ -ой грузовой технической станции дороги, ч.

Изменение суммарного времени работы погрузо-разгрузочных и других механизмов подразделения  $\Delta T_{\text{м}}$  оценивается аналогично – на основании функциональных зависимостей суммарного времени работы механизмов  $t_{\text{pi}}^{\text{м}}$  от их количества для каждой из станций железной дороги:

$$\Delta T_{\text{м}} = \sum_{i=1}^{N_c} [t_{\text{pi}}^{\text{м}}(N_l^t, N_g^t) - t_{\text{pi}}^{\text{м}}(N_l^{t-1}, N_g^{t-1})]. \quad (2.18)$$

Суммарное время работы погрузо-разгрузочных и других механизмов станции зависит также от количества маневровых локомотивов, обслуживающих вагонопоток, поэтому функции  $t_{pi}^M$  являются функциями двух аргументов.

Изменение выбросов вредных веществ в атмосферу  $E_{\text{выбр}}$  может быть обеспечено за счет электрификации отдельных участков транспортной сети, а также за счет использования при обработке вагонов на станциях оптимального количества маневровых локомотивов и мощности ПРМ. Соответственно, в формуле (2.3) первое слагаемое составляющей экологической эффективности, позволяющее оценить изменение выбросов вредных веществ в атмосферу, как функция от параметров, характеризующих рационализаторские и оптимизационные мероприятия, может быть представлена в следующем виде:

$$E_{\text{выбр}} = E_{\text{эл}}(L_{\text{эл}}^t) + E_{\Delta T}(N_l^t, N_g^t), \quad (2.19)$$

где  $E_{\text{эл}}(L_{\text{эл}}^t)$  – экологическая эффективность мероприятий по электрификации в  $t$ -ом периоде участков транспортной сети длиной в  $L_{\text{эл}}^t$ , грн;

$E_{\Delta T}(N_l^t, N_g^t)$  – экологическая эффективность мероприятий по оптимизации в  $t$ -ом периоде количества производственных мощностей  $N_l^t$  и  $N_g^t$  на грузовых станциях дороги, грн.

Экологическая эффективность мероприятий по электрификации как функция от протяженности электрифицированных участков путей сообщения может быть определена следующим образом:

$$E_{\text{эл}} = c_{\text{эк}} \cdot m_{1\text{км}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{эл}}} \left[ (L_{\text{эли}})^2 \cdot \frac{\lambda_i}{v_{\text{учи}}} \right], \quad (2.20)$$

где  $m_{1км}$  – удельное приведенное значение выбросов вредных веществ в атмосферу при перемещении железнодорожного состава тепловозом, усл. т/км;

$N_{эл}$  – количество участков транспортной сети, электрификация которых запланирована;

$\lambda_i$  – среднее значение интенсивности движения на  $i$ -ом участке пути, ед./ч;

$v_{учi}$  – средняя участковая скорость поезда на  $i$ -ом участке пути, км/ч.

Экологическая эффективность мероприятий по оптимизации количества транспортных мощностей достигается за счет сокращения суммарной продолжительности работы маневровых и поездных локомотивов при обслуживании вагонопотока на станциях железной дороги:

$$E_{\Delta T} = c_{эк} \cdot m_{1ч} \cdot \Delta T_{лок} = c_{эк} \cdot m_{1ч} \cdot \sum_{i=1}^{N_c} [t_{pi}^{лок}(N_l^t) - t_{pi}^{лок}(N_l^{t-1})], \quad (2.21)$$

где  $m_{1ч}$  – удельное приведенное значение выбросов вредных веществ в атмосферу за 1 ч работы маневровых локомотивов, усл. т/ч.

Составляющая критерия эффективности  $E_{шум}$ , учитывающая изменение шумового загрязнения от работы транспортных средств железнодорожного транспорта, может быть оценена следующим образом:

$$E_{шум} = c_{шум} \cdot \left[ \Delta D_{шум}^{cy} \cdot \sum_{i=1}^{N_c} N_{cyi} + \Delta D_{шум}^{ваг} \cdot \sum_{i=1}^{N_c} \frac{n_{вагi}^{мод}}{n_{вагi}} \cdot t_{обри}^{ваг}(N_l^t, N_g^t) \right], \quad (2.22)$$

где  $\Delta D_{шум}^{cy}$  – приведенное изменение шумового загрязнения за счет модернизации сортировочных устройств на станциях дороги, дБА;

$N_{cyi}$  – количество модифицированных сортировочных устройств на  $i$ -ой станции железной дороги;

$\Delta D_{шум}^{ваг}$  – удельное изменение шумового загрязнения при обслуживании вагонов за счет технического усовершенствования ходовой части вагонов, дБА/ваг.·ч;

$n_{\text{ваг}i}^{\text{МОД}}$  – количество вагонов с модифицированной ходовой частью, обслуживаемых на  $i$ -ой станции, ваг.;

$n_{\text{ваг}i}$  – общее количество вагонов, обслуживаемых на  $i$ -ой станции в составе железной дороги, ваг.;

$t_{\text{обр}i}^{\text{ваг}}(N_l^t, N_g^t)$  – функциональная зависимость суммарного времени обработки вагонов на  $i$ -ой станции от количественных характеристик перерабатывающей способности станции, ваг.·ч.

Составляющая эффективности (2.7) как функция от характеристик транспортных средств определяется следующим образом:

$$E_k = c_{\text{ваг}} \cdot \left[ \sum_{i=1}^{N_c} (t_{\text{обр}i}^{\text{ваг}}(N_l^t, N_g^t) - t_{\text{обр}i}^{\text{ваг}}(N_l^{t-1}, N_g^{t-1})) + T_M \cdot \bar{n}_b \cdot \sum_{j=1}^{N_{\text{уч}}} \frac{L_{\text{уч}j}}{v_{\text{уч}j}} \cdot (\lambda_j^t - \lambda_j^{t-1}) \right], \quad (2.23)$$

где  $T_M$  – продолжительность периода времени, для которого рассматривается процесс функционирования железной дороги, ч;

$\bar{n}_b$  – среднее по дороге значение количества грузовых вагонов в железнодорожном составе, ваг.;

$N_{\text{уч}}$  – количество участков транспортной сети в границах железной дороги;

$L_{\text{уч}j}$  – протяженность  $j$ -ого участка транспортной сети, км;

$\lambda_j^t$  – интенсивность движения грузовых составов на  $j$ -ом участке транспортной сети в  $t$ -ом периоде, ед./ч.

Производственным оснащением грузовых технических станций, обеспечивающими обработку материалопотока, являются маневровые локомотивы, погрузо-разгрузочные механизмы и устройства механизации и автоматизации сортировочных работ. Количество устройств механизации и автоматизации сортировочных работ определяется на основании количественных характеристик вторичного спроса на услуги грузовых технических станций – потребностей, возникших в процессе обслуживания входящего вагонопотока на станциях. При этом удовлетворение первичного спроса обеспечивается за

счет перемещения вагонов по территории станции и их обслуживания на грузовых фронтах. Таким образом, можно утверждать, что для грузовых технических станций количество устройств механизации и автоматизации сортировочных работ на станциях функционально зависит от количества вагонов, поданных на переработку, а значит – от количества маневровых локомотивов и ПРМ.

Описанные зависимости позволяют утверждать, что численные характеристики производственного оснащения железных дорог являются аргументами функций эластичности затрат ресурсов  $\varepsilon_{\text{тех}}$ ,  $\varepsilon_{\text{эк}}$  и  $\varepsilon_{\text{к}}$ :

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{тех}} = f(\mathbf{N}_l, \mathbf{N}_g), \\ \varepsilon_{\text{эк}} = f(\mathbf{N}_l, \mathbf{N}_g), \\ \varepsilon_{\text{к}} = f(\mathbf{N}_l, \mathbf{N}_g), \end{cases} \quad (2.24)$$

где  $\mathbf{N}_l, \mathbf{N}_g$  – векторы количества маневровых локомотивов и ПРМ соответственно на грузовых технических станциях железной дороги:

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_l &= \begin{vmatrix} N_{l1} & N_{l2} & \dots & N_{lN_c} \end{vmatrix}, \\ \mathbf{N}_g &= \begin{vmatrix} N_{g1} & N_{g2} & \dots & N_{gN_c} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Из совокупности функциональных зависимостей (2.24) численные характеристики производственного оснащения могут быть выражены через соответствующие обратные функции:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_l = \varphi(\varepsilon_{\text{тех}}), \mathbf{N}_g = \psi(\varepsilon_{\text{тех}}), \\ \mathbf{N}_l = \varphi(\varepsilon_{\text{эк}}), \mathbf{N}_g = \psi(\varepsilon_{\text{эк}}), \\ \mathbf{N}_l = \varphi(\varepsilon_{\text{к}}), \mathbf{N}_g = \psi(\varepsilon_{\text{к}}), \end{cases} \quad (2.26)$$

где  $\varphi(\cdot), \psi(\cdot)$  – функциональные зависимости векторов количества маневровых локомотивов и ПРМ соответственно от значений функций эластичности затрат ресурсов.

Поскольку значения элементов векторов  $\mathbf{N}_l$  и  $\mathbf{N}_g$  должно быть одинаковым для совокупности функций (2.24), то при решении задачи обеспечения наиболее эффективного варианта устойчивого развития железной дороги необходимо учитывать систему следующих пар ограничений:

$$\begin{cases} \varphi(\varepsilon_{\text{рес}}) = \varphi(\varepsilon_{\text{ЭК}}), \psi(\varepsilon_{\text{рес}}) = \psi(\varepsilon_{\text{ЭК}}), \\ \varphi(\varepsilon_{\text{рес}}) = \varphi(\varepsilon_{\text{К}}), \psi(\varepsilon_{\text{рес}}) = \psi(\varepsilon_{\text{К}}), \\ \varphi(\varepsilon_{\text{ЭК}}) = \varphi(\varepsilon_{\text{К}}), \psi(\varepsilon_{\text{ЭК}}) = \psi(\varepsilon_{\text{К}}). \end{cases} \quad (2.27)$$

Система ограничений (2.27) используется при оптимизации целевой функции задачи (2.12) относительно векторов производственного оснащения  $\mathbf{N}_l$  и  $\mathbf{N}_g$ .

Оптимизация целевой функции (2.12) относительно переменных  $\delta_{\text{тех}}$ ,  $\delta_{\text{ЭК}}$ ,  $\delta_{\text{соц}}$  и  $\delta_{\text{К}}$  (определение распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития) должно осуществляться с учетом совокупности ограничений по нижней ненулевой границы переменных.

С учетом ограничения (2.13) система ограничений для решения задачи оптимального распределения ресурсов на обеспечение устойчивого развития железной дороги, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \delta_{\text{тех}} + \delta_{\text{ЭК}} + \delta_{\text{соц}} + \delta_{\text{К}} = 1, \\ \delta_{\text{тех}} \geq \delta_{\text{тех}}^{\min}, \\ \delta_{\text{ЭК}} \geq \delta_{\text{ЭК}}^{\min}, \\ \delta_{\text{соц}} \geq \delta_{\text{соц}}^{\min}, \\ \delta_{\text{К}} \geq \delta_{\text{К}}^{\min}, \end{cases} \quad (2.28)$$

где  $\delta_i^{\min}$  – установленная нижняя граница доли ресурсов на обеспечение  $i$ -ого направления устойчивого развития железной дороги.

В указанной постановке задачу (2.12) с ограничениями (2.28) можно отнести к классу задач линейного программирования [114-116]. В общем виде задача линейного программирования определяется как максимизация це-

левой функции  $F$  при наличии ограничений, выраженных системой неравенств:

$$F = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x} \rightarrow \max : \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \forall \mathbf{x} \geq 0, \quad (2.29)$$

где  $\mathbf{c}$  – вектор целевых элементов;  
 $\mathbf{x}$  – вектор управляющих переменных;  
 $\mathbf{A}$  – матрица системы ограничений;  
 $\mathbf{b}$  – вектор системы ограничений.

Вектор целевых элементов в задаче оптимального распределения ресурсов на обеспечение устойчивого развития представляет собой набор численных значений функций эластичности затрат ресурсов  $\varepsilon_{\text{тех}}$ ,  $\varepsilon_{\text{эк}}$ ,  $\varepsilon_{\text{соц}}$  и  $\varepsilon_{\text{к}}$ , определяемых для известных значений векторов  $\mathbf{N}_l$  и  $\mathbf{N}_g$ :

$$\mathbf{c} = \left| \varepsilon_{\text{тех}} \quad \varepsilon_{\text{эк}} \quad 1 \quad \varepsilon_{\text{к}} \right|. \quad (2.30)$$

В качестве управляющих переменных при этом выступают значения долей ресурсов по направлениям:  $\mathbf{x} = \left| \delta_{\text{тех}} \quad \delta_{\text{эк}} \quad \delta_{\text{соц}} \quad \delta_{\text{к}} \right|$ .

В виде  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$  систему ограничений (2.28) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \delta_{\text{тех}} + \delta_{\text{эк}} + \delta_{\text{соц}} + \delta_{\text{к}} \leq 1, \\ -\delta_{\text{тех}} - \delta_{\text{эк}} - \delta_{\text{соц}} - \delta_{\text{к}} \leq -1, \\ -\delta_{\text{тех}} \leq -\delta_{\text{тех}}^{\min}, \\ -\delta_{\text{эк}} \leq -\delta_{\text{эк}}^{\min}, \\ -\delta_{\text{соц}} \leq -\delta_{\text{соц}}^{\min}, \\ -\delta_{\text{к}} \leq -\delta_{\text{к}}^{\min}. \end{cases} \quad (2.31)$$

Таким образом, матрица системы ограничений  $\mathbf{A}$  и вектор  $\mathbf{b}$  для рассматриваемой задачи принимают следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}, \mathbf{b} = \begin{vmatrix} 1 \\ -1 \\ -\delta_{\text{тех}}^{\min} \\ -\delta_{\text{эк}}^{\min} \\ -\delta_{\text{соц}}^{\min} \\ -\delta_{\text{к}}^{\min} \end{vmatrix}. \quad (2.32)$$

Решение задачи оптимального распределения ресурсов на обеспечение устойчивого развития железной дороги в приведенной постановке осуществляется симплекс-методом [117].

### 2.3 Разработка математических моделей функционирования железнодорожных станций

Эффективным способом решения задачи поиска рациональных путей повышения эффективности эксплуатации транспортных средств являются математические модели. Одной из основных задач исследования было построение модели железнодорожной станции и ее различных технологических процессов на общей методологической основе.

Железнодорожная станция является сложной системой, которая функционирует во взаимосвязи с внешней средой, которая представлена другими станциями железной дороги. Элементами железнодорожной станции, как сложной системы, в свою очередь, являются сложными технико-технологическими подсистемами, поэтому для решения задач ее технико-эксплуатационной оценки используется системный подход и станция рассматривается на двух иерархических уровнях:

- микроуровень – железнодорожная станция в целом как совокупность элементов, которая непосредственно обеспечивает продвижение материало-потока и подъездные пути как отдельный элемент станции, который удовлетворяет спрос средствами подъездного пути;

- макроуровень – железнодорожная станция как элемент железнодорожной транспортной системы, который объединен соответствующими пу-

тиями сообщений с другими элементами, которые в процессе функционирования создают и обеспечивают продвижение материального потока.

Для каждого из этих уровней характерны свои задачи исследования и методы их решения, при этом полученные на верхнем уровне данные служат исходными данными для исследований на нижнем уровне.

Макроуровень представляет собой совокупность элементов (железнодорожных станций), имеющих соответствующую сложную структуру. Математически такой объект целесообразно описывать при помощи аппарата теории множеств [118]. Программная реализация объектов, образующих данную систему, осуществляется на уровне классов, при этом свойства объектов описываются как соответствующие поля классов, а процессы их функционирования реализовываются в методах классов [119].

На верхнем иерархическом уровне система представляет собой совокупность станций, объединенных путями сообщений, и в процессе функционирования создают и обеспечивают продвижение материальных потоков:

$$\text{ЖД} = \{C; \text{ПС}; F_M\}, \quad (2.33)$$

где  $C$  – совокупность станций в составе железных дорог;

$\text{ПС}$  – совокупность объектов путей сообщения;

$F_M$  – материальные потоки, циркулирующие в системе.

На микроуровне станция содержит группу элементов, которые непосредственно обеспечивают процессы продвижения материального потока (станционные пути, маневровые локомотивы, фронты погрузо-разгрузочных работ, сортировочные устройства), а также группу других элементов, которые обеспечивают функционирование элементов первой группы (ремонтные мастерские, локомотивные депо, административный аппарат станции и др.). Элементы железнодорожной станции как обслуживающей системы функционируют в процессе удовлетворения потребностей на транспортные услуги, которые в моделях формализовываются как потоки грузовых поездов, курсирующих между станциями и прибывающими на станции.

При этом по типу и объемам выполняемых технологических операций станции железных дорог делятся на промежуточные, участковые, сортировочные и грузовые [120].

Промежуточные станции являются наиболее распространенным видом отдельных пунктов на сети железных дорог. Станции данного типа обеспечивают пропуск грузовых поездов без остановок, а также прием и отправку поездов, имеющих остановки (как правило, сборные и вывозные поезда). Характер работы промежуточных станций определяется организацией пропуска поездов различных категорий, методами обработки сборных и вывозных поездов, с которыми прибывают (или отправляются) вагоны под погрузку-выгрузку, и обслуживанием подъездных путей промышленных предприятий. Основными элементами промежуточных станций являются станционные пути, административные здания, а также грузовые склады и площадки.

Основными функциями участковых станций являются обработка транзитных поездов, смена локомотивов и локомотивных бригад, формирование и расформирование участковых и сборных поездов, выполнение грузовых и коммерческих операций. К элементам участковых станций относятся станционные пути, сортировочные горки малых мощностей, локомотивное и вагонное хозяйство, грузовой двор.

Сортировочные станции располагаются в пунктах слияния нескольких железнодорожных направлений, в крупных промышленных центрах, в районах массовой погрузки и выгрузки грузов (вблизи речных и морских портов, добывающих бассейнов) и предназначены для массовой сортировки вагонов в прибывающих составах путем расформирования и формирования сквозных, участковых, сборных, вывозных и передаточных поездов в соответствии с планом формирования. Сортировочные станции на сети железных дорог являются опорными пунктами в организации вагонопотоков и в выполнении основных показателей перевозочной работы. К основным элементам сортировочных станций относятся станционные пути, сортировочные горки, локомотивное и вагонное хозяйство, грузовой район.

Основными операциями на грузовых станциях являются прием грузов к перевозке, взвешивание, кратковременное хранение, погрузка, выгрузка, сортировка и выдача грузов, оформление перевозочных документов; прием, расформирование, формирование и отправление грузовых поездов, передач вагонов; производство маневров по подаче и уборке вагонов, обслуживание подъездных путей и организация транспортно-экспедиторского обслуживания грузоотправителей и грузополучателей. Элементами грузовых станций являются станционные пути, грузовой район, локомотивное хозяйство [121].

Как видим, станций различного типа имеют сходные основные элементы, при этом типы станций определяются наличием отдельных элементов либо различными их размерами (мощностью).

В модели станции на микроуровне предлагается выделять совокупность элементов, непосредственно обеспечивающих процессы продвижения материального потока, а также спрос на услуги станции [122]:

$$C = \{\Lambda_C; \Omega_C; L_C; S_C; D_C\}, \quad (2.34)$$

где  $\Lambda_C$  – совокупность станционных путей;

$\Omega_C$  – совокупность складов, расположенных на территории станции;

$L_C$  – совокупность маневровых локомотивов станции;

$S_C$  – совокупность сортировочных устройств станции;

$D_C$  – спрос на услуги станции.

Отсутствие какого-либо элемента для станции определенного типа в модели станции отображается включением соответствующего пустого множества в выражении (2.34). Например, для станций грузового типа, характеризующихся отсутствием сортировочных горок,  $S_C = \emptyset$ .

Подъездной путь  $\Lambda$  как элемент станции является подсистемой следующего иерархического уровня, который состоит из совокупности локомотивов, обслуживающих подъездной путь, грузового фронта, относящегося к подъездному пути, и грузовых складов, обслуживаемых на данном подъездном пути. Кроме того, к модели подъездного пути относится транспортный

спрос, удовлетворяемый ресурсами пути. В целом подъездной путь является следующей совокупностью [122]:

$$\Lambda = \{L_{\Lambda}; \Omega_{\Lambda}; \Phi; D_{\Lambda}\}, \quad (2.35)$$

где  $L_{\Lambda}$  – совокупность локомотивов, обслуживающих подъездной путь;

$\Omega_{\Lambda}$  – грузовой склад, обслуживаемый на подъездном пути;

$\Phi$  – грузовой фронт подъездного пути;

$D_{\Lambda}$  – спрос, удовлетворяемый средствами подъездного пути.

Если маневровые локомотивы станции могут обслуживать несколько подъездных путей, то

$$L_{\Lambda} = \bigcap_{\Lambda=1}^{N_{\Lambda}} L_{\Lambda}, \quad (2.36)$$

где  $N_{\Lambda}$  – количество подъездных путей грузовой станции.

Модель фронта погрузки-разгрузки  $\Phi$  формализуется как совокупность объектов ПРМ, которые входят в его состав:

$$\Phi = \bigcup_{i=1}^{N_G} G_i, \quad (2.37)$$

где  $G_i$  –  $i$ -ый ПРМ в составе фронта;

$N_G$  – количество ПРМ в составе фронта погрузки-разгрузки.

Модель путей сообщения между станциями железных дорог можно представить как совокупность участков  $U$ , характеристиками которых являются:

- длина участка  $L$ , км;
- тип по количеству путей  $N_{\Pi}$  (однопутный  $N_{\Pi} = 1$ , двухпутный  $N_{\Pi} = 2$ );
- наличие электрификации участка  $\rho_{\text{эл}}$  (не электрифицированный  $\rho_{\text{эл}} = 0$ , электрифицированный  $\rho_{\text{эл}} = 1$ );
- пункты транспортной сети, ограничивающие участок:  $C^{(1)}$  и  $C^{(2)}$ .

Таким образом,



При этом результаты моделирования на макро- и микроуровнях представляют собой набор исходных данных для решения задачи оптимального распределения ресурсов для обеспечения наиболее эффективного варианта устойчивого развития железных дорог.

### 2.3.1 Модель функционирования железнодорожных станций на макроуровне

В рамках описанной иерархии объектов, использующихся при моделировании процессов функционирования железнодорожной станции, модель системы на макроуровне может быть представлена в виде ориентированного графа  $G_{ЖД}$  [123]. Вершинами графа являются объекты типа  $C$  – станции, а звеньями графа – объекты типа  $U$  – участки путей сообщения (рис. 2.2).

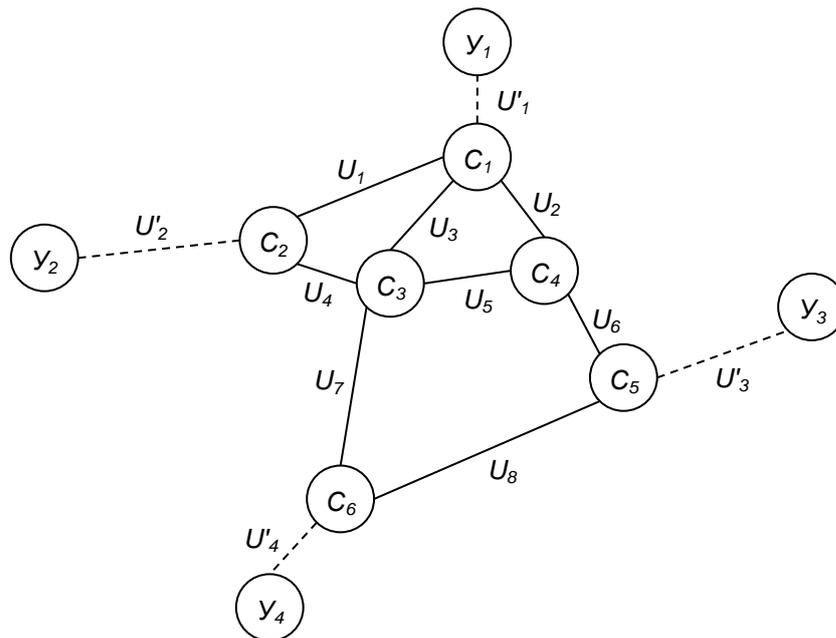


Рисунок 2.2 – Фрагмент граф-модели железных дорог

Спрос на транспортные услуги в рамках транспортной сети формализуется матрицей корреспонденций, отображающей объемы отправления и прибытия грузовых поездов по грузовым станциям дороги. Для формализации в модели объемов прибытия и отправления на станции вне системы предлагается для приграничных станций определить смежные условные станции  $Y_k$ , а

также соответствующие условные участки путей сообщения  $U'_k$ . При этом значение протяженности условных участков принимается равным нулю, а остальные характеристики (наличие электрификации участка, количество путей) принимаются такими, какие реально существуют для смежных участков, относящихся к транспортной сети соседних железных дорог.

Таким образом, матрица корреспонденций, характеризующая спрос на транспортные услуги в рамках железной дороги, является квадратной матрицей размерами  $(N_c + N_y) \times (N_c + N_y)$ , где  $N_y$  – количество смежных условных станций (табл. 2.4).

Таблица 2.4 – Общий вид матрицы корреспонденций, характеризующей спрос на транспортные услуги в рамках железной дороги

Вершина	$C_1$	$C_2$	...	$C_{N_c}$	$Y_1$	$Y_2$	...	$Y_{N_y}$	$Q''_C$
$C_1$	0	$Q_{12}$	...	$Q_{1N_c}$	$Q_{11'}$	$Q_{12'}$	...	$Q_{1N_y'}$	$Q''_{C1}$
$C_2$	$Q_{21}$	0	...	$Q_{2N_c}$	$Q_{21'}$	$Q_{22'}$	...	$Q_{2N_y'}$	$Q''_{C2}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$C_{N_c}$	$Q_{N_c1}$	$Q_{N_c2}$	...	0	$Q_{N_c1'}$	$Q_{N_c2'}$	...	$Q_{N_cN_y'}$	$Q''_{CN_c}$
$Y_1$	$Q_{1'1}$	$Q_{1'2}$	...	$Q_{1'N_c}$	0	$Q_{1'2'}$	...	$Q_{1'N_y'}$	$Q''_{Y1}$
$Y_2$	$Q_{2'1}$	$Q_{2'2}$	...	$Q_{2'N_c}$	$Q_{2'1'}$	0	...	$Q_{2'N_y'}$	$Q''_{Y2}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$Y_{N_y}$	$Q_{N_y'1}$	$Q_{N_y'2}$	...	$Q_{N_y'N_c}$	$Q_{N_y'1'}$	$Q_{N_y'2'}$	...	0	$Q''_{YN_y}$
$Q'_C$	$Q'_{C1}$	$Q'_{C2}$	...	$Q'_{CN_c}$	$Q'_{Y1}$	$Q'_{Y2}$	...	$Q'_{YN_y}$	-

Элементы матрицы содержат значения  $Q_{ij}$ , которые отображают количество грузовых составов, отправляемых с  $i$ -ой грузовой станции железной дороги на  $j$ -ую. Сумма элементов матрицы по столбцам  $Q'_C$  отображает количество грузовых составов, прибывших на  $j$ -ую грузовую станцию, а сумма  $Q'_{Yj}$  – количество грузовых поездов, прибывших на территорию железной дороги с  $j$ -ого направления. Сумма элементов по строкам  $Q''_{Ci}$  при этом отображает объем материалотока, отправленного с  $i$ -ой грузовой станции желез-

ной дороги, а сумма  $Q''_{yi}$  – количество грузовых поездов, отправленных со станций железной дороги в  $i$ -ом направлении.

Для транзитных поездопотоков, требующих сортировки на станциях, на макроуровне целесообразно определить оптимальное распределение грузовой работы между станциями железной дороги. При этом в качестве целевой функции решения оптимизационной задачи рассматриваются суммарные эксплуатационные затраты  $Z_{\Sigma}^{\text{пер}}$  на переработку вагонопотока на станциях железной дороги:

$$Z_{\Sigma}^{\text{пер}} = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_k^T} s_{ij}^{\text{пер}} \cdot q_{ij} \rightarrow \min, \quad (2.40)$$

где  $N_k^T$  – количество корреспонденций транзитного вагонопотока, требующих промежуточной переработки на сортировочных станциях железной дороги ( $N_k^T \leq N_y^2 - N_y$ );

$s_{ij}^{\text{пер}}$  – себестоимость переработки вагонопотока  $j$ -ой корреспонденции на  $i$ -ой сортировочной станции, грн/ваг.;

$q_{ij}$  – объем переработки транзитного вагонопотока  $j$ -ой корреспонденции на  $i$ -ой сортировочной станции, ваг.

В постановке (2.40) задача оптимального распределения грузовой работы между сортировочными станциями дороги приводится к классической транспортной задаче и решается с использованием известных методов линейного программирования.

Сетевая задача повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог на макроуровне определяется как определение такого варианта распределения вагонопотоков по транспортной сети, которое обеспечит минимальные суммарные затраты времени  $T_{\Sigma}$  на перемещение для всех корреспонденций:

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_k} T_i \rightarrow \min, \quad (2.41)$$

где  $T_i$  – общее время перемещения по участкам транспортной сети вагонопотока  $i$ -ой корреспонденции, ч;

$N_k$  – количество корреспонденций:

$$N_k = (N_c - N_y) \cdot (N_c - N_y - 1). \quad (2.42)$$

Постановка задачи в таком виде обеспечивает максимизацию составляющих критерия эффективности по совершенствованию технологий, по экологической составляющей и по составляющей качества обслуживания клиентуры.

Решение задачи (2.41) осуществляется за счет поиска оптимального пути следования для каждой корреспонденции, для которой  $Q_{ij} > 0$ . В качестве основного метода решения целесообразно использовать алгоритм Дейкстры [124, 125], при этом в качестве весовых значений звеньев графа можно использовать время проезда по участку транспортной сети. В случае если для транспортной сети железной дороги справедливо допущение о постоянном значении средней участковой скорости для всех звеньев сети, то в качестве весовых коэффициентов достаточно использовать длины перегонов транспортной сети  $L_i$ .

Приоритетными корреспонденциями (рассматриваемыми при определении пути следования в первую очередь) целесообразно считать корреспонденции с наибольшими значениями, поскольку корреспонденции меньшей мощности можно распределить по не кратчайшим маршрутам следования с меньшими потерями относительно суммарного времени в критерии (2.41). Введение приоритетности является обязательным по причине ограниченной пропускной способности участков транспортной сети. Участок транспортной сети, полностью загруженный до предельного значения пропускной способности по итогам определения пути следования для предыдущих корреспонден-

дений, не рассматривается в модели графа транспортной сети при определении пути следования для последующих корреспонденций.

Результатом решения задачи оперативного управления по определению пути следования грузовых поездов по транспортной сети железной дороги является вектор  $\lambda = |\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_{N_{\text{уч}}}|$ , элементы которого  $\lambda_k$  отображают значения интенсивностей движения на  $k$ -ом участке транспортной сети:

$$\lambda_k = \sum_{i=1}^{n_k} Q_i, \quad (2.43)$$

где  $n_k$  – количество корреспонденций, проходящих через  $k$ -ый участок транспортной сети;

$Q_i$  – объем корреспонденции, для которой определенный в результате оптимизации путь следования проходит через  $k$ -ый участок транспортной сети, ваг.

Данные значения используются для определения составляющей критерия эффективности (2.23), как результат сетевой оптимизации с целью повышения качества обслуживания клиентуры. Также значения вектора  $\lambda$  для неэлектрифицированных участков путей сообщения в рамках железной дороги могут быть использованы в качестве критерия выбора участка транспортной сети для электрификации (по максимальному значению интенсивности вагонопотока).

### 2.3.2 Модель функционирования грузовой технической станций на микроуровне

Грузовые технические станции выполняют технологические операции по обработке входящего и исходящего материало потока. Основными характеристиками спроса на выполнение грузовых операций станций являются случайные величины количества грузовых вагонов в поезде  $N_w$  и интервала поступления поездов  $\zeta$  [122]. Численные характеристики  $N_w$  и  $\zeta$  обуславли-

ваются параметрами матрицы корреспонденций, описывающей спрос на транспортные услуги. (табл. 2.4).

Задача повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и обеспечения их устойчивого развития на микроуровне (уровне функционирования отдельных станций) формулируется как определение количественных характеристик транспортных средств станции, обеспечивающих оптимальное значение критерия эффективности (2.8) за счет минимизации его составляющей  $E_{\text{тех}}$ .

В качестве основных количественных характеристик транспортных средств, обеспечивающих переработку материалопотока, целесообразно рассматривать количество маневровых локомотивов станции  $N_l$  и количество погрузо-разгрузочных механизмов  $N_g$ . Тогда задача минимизации составляющей  $E_{\text{тех}}$  может быть представлена следующим образом:

$$E_{\text{тех}} = E_{\text{лок}}(N_l) + E_{\text{прм}}(N_g) \rightarrow \min, \quad (2.44)$$

где  $E_{\text{лок}}(N_l)$  – зависимость эксплуатационных затрат на функционирование локомотивов станции от их количества;

$E_{\text{прм}}(N_g)$  – зависимость эксплуатационных затрат на функционирование ПРМ станции от их количества.

Технологический процесс обслуживания материального потока на станциях является стохастическим, что обуславливается влиянием на отдельные подпроцессы большого количества факторов внешней среды. В модели функционирования станции данный факт учитывается за счет рассмотрения продолжительности отдельных технологических операций как случайных величин.

Таким образом, в общем виде, с позиций системного подхода, модель функционирования грузовой технической станций описывается следующей функциональной зависимостью:

$$E_{\text{тех}} = f(N_l, N_g, N_w, \zeta). \quad (2.45)$$

В предлагаемой модели функцией отклика является критерий эффективности  $E_{\text{тех}}$ , в качестве управляющих переменных рассматриваются  $N_l$  и  $N_g$ , а входящие воздействия внешней среды описываются случайными величинами  $N_w$  и  $\zeta$ .

Если рассматривать процесс обслуживания вагонопотока как обслуживания совокупности единиц с одинаковыми техническими и экономическими характеристиками (или же использовать средневзвешенные значения технических и экономических характеристик), при этом для описания обслуживающих средств использовать аналогичный подход (рассматривать локомотивы как единицы с одинаковыми технико-экономическими характеристиками), то зависимость  $E_{\text{лок}}(N_l)$  можно представить следующим образом [122]:

$$E_{\text{лок}} = c_{\text{прост}}^{\text{лок}} \cdot t_{\text{ож}}^{\text{лок}} + c_{\text{пер}}^{\text{лок}} \cdot t_{\text{дв}}^{\text{лок}} + c_{\text{прост}}^{\text{гр}} \cdot t_{\text{ож}}^{\text{гр}} + c_{\text{пер}}^{\text{гр}} \cdot t_{\text{пер}}^{\text{гр}} + c_{\text{прост}}^{\text{пор}} \cdot t_{\text{ож}}^{\text{пор}} + c_{\text{пер}}^{\text{пор}} \cdot t_{\text{пер}}^{\text{пор}}, \quad (2.46)$$

где  $c_{\text{прост}}^{\text{лок}}$  и  $c_{\text{пер}}^{\text{лок}}$  – средневзвешенные удельные затраты на работу маневровых локомотивов при ожидании прибытия вагонов и перемещение подач вагонов соответственно, грн/ч;

$c_{\text{прост}}^{\text{гр}}$  и  $c_{\text{пер}}^{\text{гр}}$  – удельные затраты на простой и перемещение соответственно вагона в загруженном состоянии, грн/ч;

$c_{\text{прост}}^{\text{пор}}$  и  $c_{\text{пер}}^{\text{пор}}$  – удельные затраты на простой и перемещение соответственно порожнего вагона, грн/ч;

$t_{\text{ож}}^{\text{лок}}$  – суммарное время ожидания локомотивами станции прибытия вагонов или окончания их обслуживания на грузовом фронте, ч;

$t_{\text{дв}}^{\text{лок}}$  – суммарное время движения локомотивов станции, ч;

$t_{\text{ож}}^{\text{гр}}$  – суммарное время простоя загруженных вагонов в ожидании перемещения на фронт разгрузки, ч;

$t_{\text{пер}}^{\text{гр}}$  – суммарное время перемещения на грузовой фронт всех вагонов, поступивших на станцию, ч;

$t_{ож}^{пор}$  – суммарное время ожидания вывоза с грузового фронта для всех обслуженных вагонов, ч;

$t_{пер}^{пор}$  – суммарное время перемещения всех обслуженных вагонов при их вывозе с фронта грузовых работ, ч.

Функциональная зависимость  $E_{ПРМ}(N_g)$  для затрат, связанных с выполнением операций по обслуживанию вагонов на грузовом фронте, оценивается с учетом усредненных значений технико-экономических показателей работы механизмов – удельной стоимости  $c_{прост}^{мех}$  простоя ПРМ и удельной стоимости  $c_{пер}^{мех}$  обслуживания вагонов на грузовом фронте:

$$E_{ПРМ} = c_{прост}^{мех} \cdot t_{ож}^{мех} + c_{прост}^{гр} \cdot t_{ож}^{\phi} + (c_{прост}^{гр} + c_{пер}^{мех}) \cdot t_{обсл}, \quad (2.47)$$

где  $t_{ож}^{мех}$  – суммарное время простоя механизмов, ч;

$t_{ож}^{\phi}$  – суммарное время простоя вагонов в загруженном состоянии при ожидании начала обслуживания на фронте грузовых работ, ч;

$t_{обсл}$  – суммарное время обслуживания вагонов на грузовом фронте, ч.

Исследования, проведенные в [122], позволили установить функциональные зависимости временных характеристик функционирования станции ( $t_{ож}^{лок}$ ,  $t_{дв}^{лок}$ ,  $t_{ож}^{гр}$ ,  $t_{пер}^{гр}$ ,  $t_{ож}^{пор}$  и  $t_{пер}^{пор}$ , а также  $t_{ож}^{мех}$ ,  $t_{ож}^{\phi}$  и  $t_{обсл}$ ), как микросистемы, от количественных характеристик транспортных средств  $N_l$  и  $N_g$ .

В результате обработки результатов имитационного эксперимента для модели функционирования станции в работе [122] были получены следующие зависимости для составляющих функциональной зависимости  $E_{лок}(N_l)$ :

$$t_{ож}^{лок} = \begin{cases} 0, & \text{при } t_{дв}^{лок} \geq 24 \cdot N_l, \\ 24 \cdot N_l - 90 \cdot \frac{N_l^{0,664} \cdot \xi_q^{0,884}}{\xi_t^{0,885}}, & \text{при } t_{дв}^{лок} < 24 \cdot N_l, \end{cases} \quad (2.48)$$

$$t_{дв}^{лок} = 90 \cdot \frac{N_l^{0,664} \cdot \xi_q^{0,884}}{\xi_t^{0,885}}, \quad (2.49)$$

$$t_{\text{ож}}^{\text{гр}} = 2172 \cdot \frac{\xi_q^{2,527}}{N_l^{0,429} \cdot \xi_t^{1,979}}, \quad (2.50)$$

$$t_{\text{пер}}^{\text{гр}} = t_{\text{пер}}^{\text{пор}} = 104 \cdot \frac{\xi_q^{1,054}}{\xi_t^{0,961}}, \quad (2.51)$$

$$t_{\text{ож}}^{\text{пор}} = 176 \cdot \frac{\xi_q^{0,978}}{N_l^{0,054} \cdot \xi_t^{0,865}}, \quad (2.52)$$

где  $\xi_q$  – коэффициент, отображающий соотношение количественных характеристик спроса и системы – соотношение математического ожидания количества вагонов  $\mu_w$ , поступающих на станцию в составе грузового поезда, и максимального количества вагонов  $q_w$ , которые могут одновременно быть перемещены локомотивом на фронт грузовых работ;

$\xi_t$  – коэффициент, отображающий соотношение временной характеристики интенсивности спроса и временной характеристики производительности системы – соотношение математического ожидания интервала поступления грузовых поездов  $\mu_\zeta$  к математическому ожиданию времени выполнения локомотивом операции по перемещению  $\mu_{\text{оп}}$ :

$$\xi_q = \frac{\mu_w}{q_w}, \quad \xi_t = \frac{\mu_\zeta}{\mu_{\text{оп}}}. \quad (2.53)$$

Временные характеристики зависимости  $E_{\text{прм}}(N_g)$  в модели функционирования станции, полученные автором [122], имеют следующий вид:

$$t_{\text{ож}}^{\text{мех}} = \begin{cases} 0, & \text{при } t_{\text{обсл}} \geq 24 \cdot N_g, \\ 24 \cdot N_g - t_{\text{обсл}}, & \text{при } t_{\text{обсл}} < 24 \cdot N_g, \end{cases} \quad (2.54)$$

$$t_{\text{ож}}^{\text{ф}} = 48704 \cdot \frac{N_l^{0,305} \cdot \mu_\tau^{1,129} \cdot \xi_q^{2,982}}{N_g^{2,368} \cdot \xi_t^{2,698}}, \quad (2.55)$$

$$t_{\text{обсл}} = 123 \cdot \mu_\tau, \quad (2.56)$$

где  $\mu_\tau$  – математическое ожидание продолжительности обслуживания одного вагона на грузовом фронте, ч.

Таким образом, с учетом зависимостей (2.48) – (2.52), а также (2.54) – (2.56), математическая модель функционирования железнодорожной станции приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{тех}} = & 24 \cdot N_l \cdot c_{\text{прост}}^{\text{лок}} + 90 \cdot \frac{(c_{\text{пер}}^{\text{лок}} - c_{\text{прост}}^{\text{лок}}) \cdot N_l^{0,664} \cdot \xi_q^{0,884}}{\xi_t^{0,885}} + 2172 \cdot \frac{c_{\text{прост}}^{\text{гр}} \cdot \xi_q^{2,527}}{N_l^{0,429} \cdot \xi_t^{1,979}} + \\
 & + 176 \cdot \frac{c_{\text{прост}}^{\text{пор}} \cdot \xi_q^{0,978}}{N_l^{0,054} \cdot \xi_t^{0,865}} + 104 \cdot \frac{(c_{\text{пер}}^{\text{гр}} + c_{\text{пер}}^{\text{пор}}) \cdot \xi_q^{1,054}}{\xi_t^{0,961}} + 24 \cdot c_{\text{прост}}^{\text{мех}} \cdot N_g + \\
 & + 48704 \cdot \frac{c_{\text{прост}}^{\text{гр}} \cdot N_l^{0,305} \cdot \mu_\tau^{1,129} \cdot \xi_q^{2,982}}{N_g^{2,368} \cdot \xi_t^{2,698}} + 123 \cdot (c_{\text{прост}}^{\text{гр}} + c_{\text{пер}}^{\text{мех}} - c_{\text{прост}}^{\text{мех}}) \cdot \mu_\tau.
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

На основании данной модели могут быть определены оптимальные с точки зрения устойчивого развития железной дороги количественные характеристики средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ станций. Оптимальное количество маневровых локомотивов станции и ПРМ в составе фронта грузовых работ определяются как значения частных экстремумов функции (2.57) в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_{\text{тех}}}{\partial N_l} = 0, \\ \frac{\partial E_{\text{тех}}}{\partial N_g} = 0. \end{cases} \tag{2.58}$$

Необходимо отметить, что задача определения оптимальных количественных характеристик средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ станций решается с использованием в качестве исходных данных результаты решения задачи оптимального распределения грузовой работы между станциями дороги. При этом сохраняется принцип иерархичности планиро-

вания процесса функционирования системы – от макроуровня к уровню отдельных элементов.

### Выводы по второму разделу

1. Предложенная система показателей, характеризующих устойчивое развитие железных дорог, позволяет оценить эффективность эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиций основных направлений обеспечения устойчивого развития – внедрения технологий совершенствующих процесс эксплуатации транспортных средств железных дорог, снижения влияния техногенной системы на окружающую среду, обеспечения социальной составляющей развития, а также повышения качества обслуживания клиентуры. Составляющими предложенного интегрального показателя устойчивого развития являются совокупность констант, определяющих экономические параметры эксплуатации транспортных средств дороги, и совокупность показателей, характеризующих результат совершенствования технологий эксплуатации транспортных средств железных дорог.

2. В предложенной постановке задача обеспечения устойчивого развития определяется как задача определения оптимального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития. Решение данной оптимизационной задачи позволяет обеспечить такой вариант развития железных дорог, при реализации которого эксплуатация транспортных средств железных дорог характеризуется максимальным значением предложенного интегрального показателя эффективности.

3. Предложенная модель функционирования железнодорожных станций, основанная на математическом аппарате теории множеств, позволяет структурировать железнодорожную станцию как сложную систему. Данный подход позволяет сформулировать ряд задач, решение которых позволяет определить параметры функционирования системы, оптимальные относительно составляющих предложенного интегрального критерия эффективно-

сти. На базе предложенной модели функционирования железнодорожной станции на макроуровне возможно решение задач оптимального распределения грузовой работы между станциями железной дороги при обслуживании транзитных вагонопотоков, а также сетевой задачи повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог за счет определения оптимального варианта распределения вагонопотоков по транспортной сети. С использованием предложенной модели функционирования грузовой технической станций на микроуровне решается задача определения оптимальных количественных характеристик средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ станций.

## РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОРГАНИЗАЦИИ  
РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ НА ПРИДНЕПРОВСКОЙ  
ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ)

3.1 Оценка параметров, характеризующих эффективность эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиции их устойчивого развития

Устойчивое развитие железных дорог предлагается оценивать на основании предложенного критерия эффективности (2.12). Однако для определения численного значения показателя эффективности необходимо предварительное обоснование численных значений ряда технико-эксплуатационных и технико-экономических показателей, его определяющих. Кроме того, данные показатели должны характеризовать рациональный с позиций устойчивого развития вариант эксплуатации транспортных средств железных дорог.

Под вариантом структуры железнодорожных станций с позиций материально-технической базы для обслуживания грузопотока понимается совокупность маневровых локомотивов и ПРМ на станциях, а также пути сообщения. Рациональный вариант функционирования для железнодорожных станций определяется на основании известных характеристик спроса на транспортные средства, с учетом характеристик существующей транспортной сети.

В работе предлагается следующая последовательность решения задачи оценки параметров, характеризующих устойчивое развитие:

- оптимальное распределение грузовой работы на участках и станциях железной дороги (решение сетевой задачи на макроуровне);

- определение оптимального количества обслуживающих механизмов на грузовых станциях (решение оптимизационных задач на микроуровне);
- решение задачи оптимального распределения ресурсов, выделяемых на обеспечение устойчивого развития, с использованием в качестве исходных данных результаты оптимизации распределения грузовой работы на участках и станциях.

Поскольку параметры спроса на транспортные средства для продвижения материалопотока являются величинами недетерминированными, то для проведения экспериментальных исследований в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог предлагается использовать имитационную модель, содержащую оптимизационные функции (функции оптимизации распределения грузовой работы по станциям, расчета оптимального количества обслуживающих механизмов, а также оптимального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития).

### 3.1.1 Разработка модели железнодорожной станции для решения сетевой задачи на макроуровне

Основой модели функционирования железнодорожной станции на макроуровне является граф-модель. Для разработки графа-модели использован инструментальный Microsoft Visual Studio 2013, при этом в качестве языка программирования выбран C# [126]. В качестве базовой библиотеки при создании данной модели использована библиотека классов Graph.dll, содержащая программную реализацию основных алгоритмов оптимизации графов и разработанная на кафедре транспортных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета [127].

Реализация программной модели представлена в приложении А. В соответствии с разработанной программной моделью, модель железнодорожной станции является экземпляром класса TModel (Transport Model), который наследует класс Graph библиотеки Graph.dll.

Полями базового класса Graph являются коллекции Nodes и Links, содержащий список всех вершин графа и его звеньев соответственно. В модели вершины графа соответствуют станциям в составе железной дороги, а звенья – железнодорожным путям, связывающим станции.

Коллекция Nodes содержит элементы типа Node (вершина графа). Основными полями класса Node из библиотеки Graph.dll являются:

- код вершины графа Code;
- координаты вершины графа X и Y: в предлагаемой программной реализации модели в качестве координат приняты географические долгота и широта станций, полученные с помощью функций Google Maps;
- имя вершины графа Name – название соответствующей станции;
- коллекции OutLinks и InLinks, содержащие списки соответственно исходящих и входящих звеньев, ассоциируемых с вершиной;
- коллекции outFlows и inFlows, содержащие списки соответственно исходящих и входящих потоков, ассоциируемых с вершиной;
- свойство OutFlowsTotalIntencity, возвращающее численное значение суммарной интенсивности исходящих потоков;
- свойство InFlowsTotalIntencity, возвращающее численное значение суммарной интенсивности входящих потоков.

Коллекция Links содержит элементы типа Link (звено графа). Основными полями класса Link из библиотеки Graph.dll являются:

- исходящая и входящая вершины звена OutNode и InNode – являются ссылками на соответствующие вершины из списка Nodes;
- вес звена Weight – содержит численную характеристику веса звена (длина, время, стоимость и т.д.), в предлагаемой программной реализации в качестве веса звена рассматривается длина перегона;
- пропускная способность участка сети Capacity;
- реальная нагрузка на участке сети Load.

Собственными (не унаследованными от класса Graph библиотеки Graph.dll) для класса TModel являются следующие поля, позволяющие опи-

сать основные технико-эксплуатационные характеристики функционирования:

- словари LocoNum и GearNum типа Dictionary<Node, int>, содержащие значения соответственно количества маневровых локомотивов и погрузо-разгрузочных механизмов на железнодорожных станциях;

- словарь LinksLoad типа Dictionary<Link, double>, содержащий значение загрузки звеньев транспортной сети в абсолютных единицах;

- словари EQ и ET типа Dictionary<Node, double>, которые содержат соответственно значения коэффициента, отображающего соотношение количественных характеристик спроса и обслуживающей системы, и коэффициента, отображающего соотношение временной характеристики интенсивности спроса и временной характеристики производительности обслуживающей системы;

- словари TotalTW, TotalTL и TotalTG типа Dictionary<Node, double>, содержащие соответственно суммарное время обработки вагонов на станциях, суммарное время работы станционных локомотивов по всем станциям, а также суммарное время работы погрузо-разгрузочных механизмов;

- случайные величины sI и sQ типа Stochastic, характеризующие параметры грузопотоков, соответственно – интенсивности потоков поездов на транспортной сети и размера поездов.

Кроме того, полями класса TModel, которые содержат постоянные численные значения, использующиеся при моделировании, являются:

- мощность локомотива;

- математическое ожидание продолжительности обслуживания одного вагона на грузовом фронте;

- математическое ожидание продолжительности обслуживания одного вагона при доставке на грузовой фронт;

- удельные затраты на простой вагона в загруженном и порожнем состоянии соответственно;

- удельная стоимость работы ПРМ;

- средневзвешенные удельные затраты на работу локомотивов при ожидании прибытия вагонов и перемещение подач вагонов соответственно;
- балансовая стоимость локомотивов и ПРМ.

В рамках диссертационной работы с использованием класса TModel разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать процесс функционирования железнодорожных станций в рамках железной дороги.

Загрузка данных о конфигурации транспортной сети в разработанном программном продукте осуществляется из предварительно сформированного accdb-файла (файла базы данных Microsoft Access), содержащего таблицы Nodes и Links с характеристиками станций и перегонов соответственно.

Таблица Nodes файла базы данных содержит обязательные атрибуты: код вершины, ее координаты, имя, количество станционных локомотивов и количество ПРМ, задействованных в процессе обслуживания вагонопотока.

Таблица Links файла базы данных содержит обязательные атрибуты: код звена, коды исходящей и входящей вершины соответственно, а также пропускную способность участка.

Загрузка основных характеристик графа-модели, унаследованных от класса Graph библиотеки Graph.dll, осуществляется в конструкторе класса TModel при помощи функции LoadFromDB. Загрузка не унаследованных характеристик (количества обслуживающих механизмов на станциях) производится в конструкторе с помощью функции loadFacilitiesNum.

На рис. 3.1 представлено рабочее окно разработанного программного обеспечения, содержащее отображение результатов моделирования процесса функционирования железнодорожных станций Приднепровской железной дороги. Вид графа-модели может дополняться подписями вершин, содержащих наименование станций, а также количество обслуживающих механизмов на станции в формате (количество станционных локомотивов, количество ПРМ на фронтах погрузки-разгрузки).



Решение сетевой задачи на макроуровне подразумевает распределение вагонопотока для заданной матрицы корреспонденций, характеризующей спрос, с учетом пропускной способности перегонов. При этом предварительно осуществляется моделирование матрицы корреспонденций в соответствии с известными параметрами случайной величины интенсивности потоков поездов (в модели определена, как переменная  $sI$ ).

Для моделирования матрицы корреспонденций в модели использована функция `SetFlows`, определяемая в базовом классе `Graph` библиотеки `Graph.dll`. Функция позволяет сгенерировать значения случайных величин интенсивностей. При этом создается программная модель поездопотока, как экземпляр класса `Flow` библиотеки `Graph.dll`. Класс `Flow` имеет свойство `ShortestPath` типа `Path`, которое возвращает кратчайший путь для потока с учетом существующей загрузки участков транспортной сети. Для определения кратчайшего пути между исходящей и входящей вершинами потока используется функция `ShortestPath` класса `Graph`, реализующая алгоритм Дейкстры для поиска кратчайшего пути в ориентированном графе [123].

Определение загрузки перегонов транспортной сети для смоделированного варианта матрицы корреспонденций осуществляется с использованием процедуры `DefineLinksLoad`, реализованной в базовом классе `Graph`. Алгоритм функции содержит последовательный перебор всех участков пути для каждого из смоделированных потоков с добавлением сгенерированного значения интенсивности потока (поле `Intensity` класса `Flow`) к текущей загрузке звена (поле `Load` класса `Link`).

В предложенной программной реализации графа-модели загрузка участков транспортной сети, полученная в результате моделирования по описанному алгоритму, графически отображается более широкими линиями соответствующих звеньев для более загруженных участков с цветовой градацией от зеленого цвета (для наименее загруженных участков) до красного цвета (для наиболее загруженных участков).

### 3.1.2 Разработка функций для определения оптимального количества транспортных средств железнодорожных станций

Определение оптимального количества средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ станций, в соответствии с разработанной математической моделью, осуществляется в результате поиска экстремумов функции (2.57) относительно количества маневровых локомотивов и количества ПРМ как аргументов данной функции.

Графический анализ вида функции (2.57) относительно количества маневровых локомотивов и количества ПРМ (рис. 3.2) позволяет утверждать, что экстремальные значения функции являются минимумами, т.е. решение уравнений (2.58) позволит оценить соответствующие оптимальные значения транспортных средств.

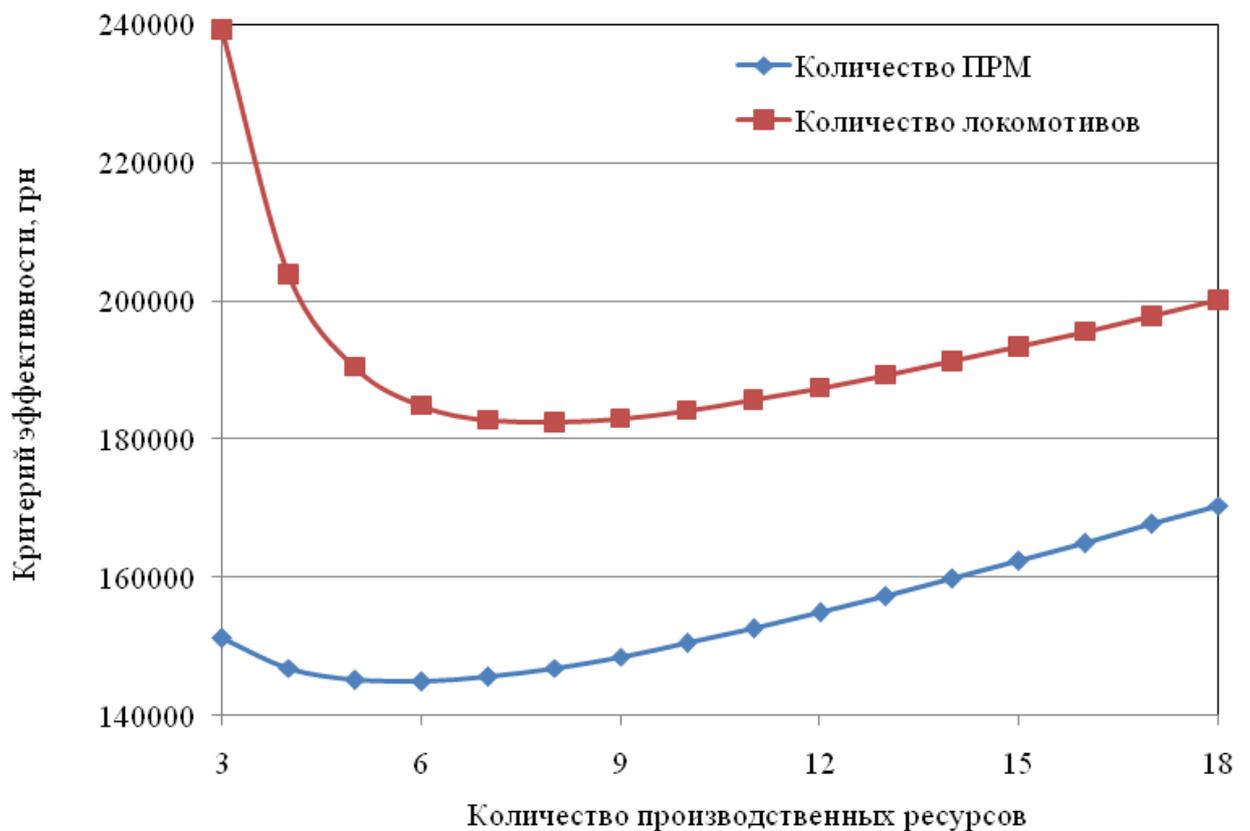


Рисунок 3.2 – Зависимость критерия эффективности от количества средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ станции

Частная производная функции (2.57) относительно количества маневровых локомотивов  $N_l$  имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{\text{тех}}}{\partial N_l} = & 24 \cdot c_{\text{пост}}^{\text{лок}} + 60 \cdot \frac{(c_{\text{пер}}^{\text{лок}} - c_{\text{пост}}^{\text{лок}}) \cdot \xi_q^{0,884}}{\xi_t^{0,885} \cdot N_l^{0,336}} - 932 \cdot \frac{c_{\text{пост}}^{\text{гр}} \cdot \xi_q^{2,527}}{N_l^{1,429} \cdot \xi_t^{1,979}} - \\ & - 9,5 \cdot \frac{c_{\text{пост}}^{\text{пор}} \cdot \xi_q^{0,978}}{N_l^{1,054} \cdot \xi_t^{0,865}} + 14855 \cdot \frac{c_{\text{пост}}^{\text{гр}} \cdot \mu_{\tau}^{1,129} \cdot \xi_q^{2,982}}{N_g^{2,368} \cdot \xi_t^{2,698} \cdot N_l^{0,695}}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Уравнение  $\frac{\partial E_{\text{тех}}}{\partial N_l} = 0$  относительно оптимального количества обслуживающих локомотивов  $N_l^{\text{opt}}$  не имеет аналитического решения. После укрупнения коэффициентов данное уравнение принимает следующий вид:

$$k_0 + k_1 \cdot N_l^{-0,336} + k_2 \cdot N_l^{-1,429} + k_3 \cdot N_l^{-1,054} + k_4 \cdot N_l^{-0,695} = 0, \quad (3.2)$$

где  $k_0 = 24 \cdot c_{\text{пост}}^{\text{лок}}$ ;

$$k_1 = 60 \cdot (c_{\text{пер}}^{\text{лок}} - c_{\text{пост}}^{\text{лок}}) \cdot \xi_q^{0,884} \cdot \xi_t^{-0,885};$$

$$k_2 = -932 \cdot c_{\text{пост}}^{\text{гр}} \cdot \xi_q^{2,527} \cdot \xi_t^{-1,979};$$

$$k_3 = -9,5 \cdot c_{\text{пост}}^{\text{пор}} \cdot \xi_q^{0,978} \cdot \xi_t^{-0,865};$$

$$k_4 = 14855 \cdot c_{\text{пост}}^{\text{гр}} \cdot \mu_{\tau}^{1,129} \cdot \xi_q^{2,982} \cdot N_g^{-2,368} \cdot \xi_t^{-2,698}.$$

Для решения уравнения (3.2) целесообразно использовать метод секущих (метод хорд) [128]. Суть данного метода состоит в том, что нелинейная функция на выделенном интервале  $[a, b]$  заменяется линейной функцией (хордой) – прямой, соединяющей концы нелинейной функции. Метод секущих определяется следующим рекуррентным соотношением:

$$x_n = x_{n-1} - f(x_{n-1}) \cdot \frac{x_{n-1} - x_{n-2}}{f(x_{n-1}) - f(x_{n-2})}, \quad (3.3)$$

где  $x_n$  – оценочное значение корня уравнения для  $n$ -ой итерации;

$f(x_n)$  – значение функции для корня  $x_n$ .

В предлагаемой программной модели метод секущей при определении оптимального количества станционных локомотивов реализован на базе класса Solver библиотеки EquationSolve, разработанной на кафедре транспортных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета [129].

Функция расчета оптимального количества локомотивов реализована в процедуре defLocoNum (приложение А). Начальным интервалом варьирования принят интервал от 1 до 100 обслуживающих единиц, точность расчета функционала принята на уровне  $10^{-3}$ , а начальное количество ПРМ, необходимое для расчета коэффициента  $k_4$ , принято равным 5. Расчет оптимального количества локомотивов проводится в две итерации: на первом этапе оценивается количество локомотивов для начального количества ПРМ, затем определяется потребное количество ПРМ для полученного количества локомотивов, уточняется значение коэффициента  $k_4$ , после чего определяется окончательное значение.

Частная производная функции (2.57) относительно количества ПРМ  $N_g$  имеет следующий вид:

$$\frac{\partial E_{\text{рес}}}{\partial N_g} = 24 \cdot c_{\text{пост}}^{\text{мех}} - 115331 \cdot \frac{c_{\text{пост}}^{\text{гр}} \cdot N_l^{0,305} \cdot \mu_{\tau}^{1,129} \cdot \xi_q^{2,982}}{N_g^{3,368} \cdot \xi_t^{2,698}}. \quad (3.4)$$

Уравнение  $\frac{\partial E_{\text{тех}}}{\partial N_g} = 0$  относительно оптимального количества обслуживающих ПРМ  $N_g^{\text{opt}}$  имеет следующее аналитическое решение:

$$N_g^{\text{opt}} = 12,39 \cdot \frac{N_l^{0,091} \cdot \mu_{\tau}^{0,335} \cdot \xi_q^{0,885}}{\xi_t^{0,801}} \cdot \left( \frac{c_{\text{пост}}^{\text{гр}}}{c_{\text{пост}}^{\text{мех}}} \right)^{0,297}. \quad (3.5)$$

В разработанной программной модели функция расчета оптимального количества ПРМ реализована в процедуре defGearNum (приложение А).

### 3.1.3 Разработка функции оптимизации распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития

Оптимальное распределение ресурсов, выделяемых на обеспечение устойчивого развития, определяется как значение вектора  $\mathbf{x} = |\delta_{\text{тех}} \quad \delta_{\text{эк}} \quad \delta_{\text{соц}} \quad \delta_{\text{к}}|$ , соответствующее оптимальному значению целевой функции (2.12).

Предварительным этапом решения данной оптимизационной задачи является оценка численных значений вектора  $\mathbf{c} = |\varepsilon_{\text{тех}} \quad \varepsilon_{\text{эк}} \quad 1 \quad \varepsilon_{\text{к}}|$  коэффициентов целевой функции – значений функций эластичности затрат ресурсов  $\varepsilon_{\text{тех}}$ ,  $\varepsilon_{\text{эк}}$  и  $\varepsilon_{\text{к}}$ . Определение численных значений проводится в соответствии с методикой, описанной на основании зависимостей (2.15) – (2.23). В программной модели для расчета коэффициентов целевой функции разработана процедура `simplexCoeffs`, которая возвращает соответствующий массив значений (приложение А). В качестве переменных, задействованных при определении значений  $\varepsilon_{\text{тех}}$ ,  $\varepsilon_{\text{эк}}$  и  $\varepsilon_{\text{к}}$ , выступают значения суммарного времени работы обслуживающих устройств на станциях – маневровых локомотивов и ПРМ, а также значение суммарного времени обслуживания вагонов. Эти переменные определяются в программной модели на основании зависимостей (2.48) – (2.56) в соответствующих функциях `defTotalTL`, `defTotalTG` и `defTotalTW`. Данные функции позволяют рассчитать значения временных переменных для заданной вершины графа.

Рассмотрим процедуру решения задачи (2.29) симплекс-методом при условии  $\delta_{\text{тех}}^{\min} = \delta_{\text{эк}}^{\min} = \delta_{\text{соц}}^{\min} = \delta_{\text{к}}^{\min} = 0,1$  (данные численные значения минимальной доли ресурсов, выделяемых на направление устойчивого развития, использованы также при проведении эксперимента). В соответствии с представленной постановкой задачи для матрицы системы ограничений  $\mathbf{A}$  и вектора  $\mathbf{b}$  (2.32) начальный словарь задачи линейного программирования является недостижимым:

$$\begin{cases} x_5 = 1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4, \\ x_6 = -1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4, \\ x_7 = -0,1 + x_1, \\ x_8 = -0,1 + x_2, \\ x_9 = -0,1 + x_3, \\ x_{10} = -0,1 - x_4, \end{cases} \quad (3.6)$$

$$z = \varepsilon_{\text{тех}} \cdot x_1 + \varepsilon_{\text{эк}} \cdot x_2 + x_3 + \varepsilon_{\text{к}} \cdot x_4,$$

где  $x_1, \dots, x_4$  – независимые переменные (вектор  $\mathbf{x}$ );

$x_5, \dots, x_{10}$  – дополнительные переменные;

$z$  – текущее значение целевой функции.

Словарь (3.6) является недостижимым, поскольку при нулевых значениях базовых переменных  $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0$  значения базовых переменных  $x_5, \dots, x_{10}$  являются отрицательными, тогда как по умолчанию в задаче, решаемой симплекс-методом, все переменные должны иметь значения, большие либо равные 0. Таким образом, задача в приведенной постановке требует выполнение предварительной фазы инициализации. Вводим дополнительную неотрицательную переменную  $x_0$ . Таким образом, обеспечивается возможность достижимости словаря. В качестве целевой функции на этапе инициализации используем минимизацию значения  $x_0$ , или в постановке задачи линейного программирования – максимизацию значения  $-x_0$ :  $-x_0 \rightarrow \max$ . Получаем следующий словарь:

$$\begin{cases} x_5 = 1 + x_0 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4, \\ x_6 = -1 + x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4, \\ x_7 = -0,1 + x_0 + x_1, \\ x_8 = -0,1 + x_0 + x_2, \\ x_9 = -0,1 + x_0 - x_3, \\ x_{10} = -0,1 + x_0 - x_4, \end{cases} \quad (3.7)$$

$$z = 0 - x_0.$$

В словаре (3.7) переменная  $x_0$  вводится в базис, при этом переменная  $x_6$  покидает базис. Получаем следующий словарь:

$$\begin{cases} x_0 = 1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 + x_6, \\ x_5 = 2 - 2 \cdot x_1 - 2 \cdot x_2 - 2 \cdot x_3 - 2 \cdot x_4 + x_6, \\ x_7 = 0,9 - x_2 - x_3 - x_4 + x_6, \\ x_8 = 0,9 - x_1 - x_3 - x_4 + x_6, \\ x_9 = 0,9 - x_1 - x_2 - x_4 + x_6, \\ x_{10} = 0,9 - x_1 - x_2 - x_3 + x_6, \\ z = -1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 - x_6. \end{cases} \quad (3.8)$$

В словаре (3.8) целевая функция может быть увеличена за счет введения переменной  $x_1$  в базис, при этом переменная  $x_{10}$  покидает базис. Получаем следующий словарь:

$$\begin{cases} x_0 = 0,1 - x_4 + x_6 + x_{10}, \\ x_1 = 0,9 - x_2 - x_3 + x_6 - x_{10}, \\ x_5 = 0,2 - 2 \cdot x_4 - x_6 + 2 \cdot x_{10}, \\ x_7 = 0,9 - x_2 - x_3 - x_4 + x_6, \\ x_8 = 0 + x_2 - x_4 + x_6 + x_{10}, \\ x_9 = 0 + x_3 - x_4 + x_6 + x_{10}, \\ z = -0,1 + x_4 - x_{10}. \end{cases} \quad (3.9)$$

Увеличение целевой функции в словаре (3.9) возможно за счет введения переменной  $x_4$  в базис, при этом переменная  $x_9$  покидает базис. Получаем следующий словарь:

$$\begin{cases} x_0 = 0,1 - x_3 + x_9, \\ x_1 = 0,9 - x_2 - x_3 + x_6 - x_{10}, \\ x_4 = 0 + x_3 - x_9 + x_{10}, \\ x_5 = 0,2 - 2 \cdot x_3 - x_6 + 2 \cdot x_9, \\ x_7 = 0,9 - 2 \cdot x_3 + x_6 + x_9 - x_{10}, \\ x_8 = 0 + x_2 - x_3 + x_9, \\ z = -0,1 + x_3 - x_9. \end{cases} \quad (3.10)$$

В словаре (3.10) целевая функция может быть увеличена за счет введения переменной  $x_3$  в базис, при этом переменная  $x_9$  покидает базис. Получаем следующий словарь:

$$\begin{cases} x_0 = 0,1 - x_2 + x_8, \\ x_1 = 0,9 - 2 \cdot x_2 + x_6 + x_8 - x_9 - x_{10}, \\ x_3 = 0 + x_2 - x_8 + x_9, \\ x_4 = 0 + x_2 - x_8 + x_{10}, \\ x_5 = 0,2 - 2 \cdot x_2 - x_6 + 2 \cdot x_8, \\ x_7 = 0,9 - 3 \cdot x_2 + x_6 + 2 \cdot x_8 - x_9 - x_{10}, \\ z = -0,1 + x_2 - x_8. \end{cases} \quad (3.11)$$

Возможное увеличение целевой функции в словаре (3.11) достигается за счет введения в базис переменной  $x_2$ , при этом переменная  $x_0$  покидает базис. Получаем следующий словарь:

$$\begin{cases} x_1 = 0,7 + 2 \cdot x_0 + x_6 - x_8 - x_9 - x_{10}, \\ x_2 = 0,1 - x_0 + x_8, \\ x_3 = 0,1 - x_0 + x_9, \\ x_4 = 0,1 - x_0 + x_{10}, \\ x_5 = 0 + 2 \cdot x_0 - x_6, \\ x_7 = 0,6 + 3 \cdot x_0 + x_6 - x_8 - x_9 - x_{10}, \\ z = 0 - x_0. \end{cases} \quad (3.12)$$

Словарь (3.12) является оптимальным вариантом на этапе инициализации, поскольку целевая функция не может быть увеличена. Все дополнительные переменные в данном словаре положительны ( $x_5 = 0$ ,  $x_2 = 0,1$ ,  $x_7 = 0,6$ ,  $x_3 = 0,1$ ,  $x_4 = 0,1$ ,  $x_1 = 0,7$ ), поэтому задача может решаться далее. Поскольку базисная переменная  $x_0 = 0$ , то она может быть исключена из словаря для дальнейшего решения задачи симплекс-методом. Целевая функция  $z$  при этом определяется в соответствии с (2.29).

Таким образом, словарь для решения задачи определения оптимального соотношения затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития симплекс-методом имеет следующий вид:

$$\begin{cases} x_1 = 0,7 + x_6 - x_8 - x_9 - x_{10}, \\ x_2 = 0,1 + x_8, \\ x_3 = 0,1 + x_9, \\ x_4 = 0,1 + x_{10}, \\ x_5 = 0 - x_6, \\ x_7 = 0,6 + x_6 - x_8 - x_9 - x_{10}, \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} z &= \varepsilon_{\text{тех}} \cdot x_1 + \varepsilon_{\text{эк}} \cdot x_2 + x_3 + \varepsilon_{\text{к}} \cdot x_4 = \\ &= \varepsilon_{\text{тех}} \cdot (0,7 + x_6 - x_{10} - x_8 - x_9) + \\ &+ \varepsilon_{\text{эк}} \cdot (0,1 + x_8) + 0,1 + x_9 + \varepsilon_{\text{к}} \cdot (0,1 + x_{10}) = \\ &= (0,7 \cdot \varepsilon_{\text{тех}} + 0,1 \cdot \varepsilon_{\text{эк}} + 0,1 + 0,1 \cdot \varepsilon_{\text{к}}) + \\ &+ \varepsilon_{\text{тех}} \cdot x_6 + (\varepsilon_{\text{эк}} - \varepsilon_{\text{тех}}) \cdot x_8 + (1 - \varepsilon_{\text{тех}}) \cdot x_9 + (\varepsilon_{\text{к}} - \varepsilon_{\text{тех}}) \cdot x_{10}. \end{aligned}$$

В разработанной программной реализации модели функционирования железнодорожных станций решение задачи (3.13) осуществляется в процедуре SimulateTM (приложение А) с использованием базовых классов библиотеки Simplex.dll, разработанной на кафедре транспортных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета [130]. Целевая функция при этом задается как экземпляр класса ObjectiveFunction, ограничения – как экземпляры класса Constraint, а сама задача линейного программирования в общем виде – как объект типа LPP из библиотеки Simplex.dll. Непосредственно поиск решения осуществляется функцией Solve класса LPP, при этом алгоритм функции проводит проверку достижимости начального словаря, и в случае, если словарь недостижимый, реализуется описанная процедура инициализации. Результатом работы процедуры SimulateTM является массив, содержащий значения вектора  $\mathbf{x} = |\delta_{\text{тех}} \quad \delta_{\text{эк}} \quad \delta_{\text{соц}} \quad \delta_{\text{к}}|$ .

### 3.2 Разработка плана эксперимента

В рамках диссертационной работы экспериментальные исследования в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог за счет обеспечения их устойчивого развития проводятся на базе Приднепровской железной дороги в составе трех дирекций – Днепропетровской, Запорожской и Криворожской дирекций железнодорожных перевозок.

Модель Приднепровской железной дороги реализована как экземпляр класса TModel на базе графа-модели, содержащей вершины, соответствующие станциям в составе железной дороги, соединенные звеньями, соответствующими участкам транспортной сети. В общем виде программная модель Приднепровской железной дороги представлена на рис. 3.1.

Имплементация графа-модели Приднепровской железной дороги для проведения экспериментальных исследований осуществлена как совокупность граф-моделей соответствующих дирекций, входящих в ее состав (рис. 3.3–3.5).

Граф-модель Днепропетровской дирекции железнодорожных перевозок (рис. 3.3) включает 48 вершин и 110 звеньев. Из станций, входящих в состав Днепропетровской дирекции железнодорожных перевозок, одна станция является узловой сортировочной (Нижнеднепровск-Узел), 7 станций – участковые (Верховцево, Новомосковск-Днепровский, Павлоград-1, Сухачевка, Синельниково-1, Синельниково-2 и Чаплино), 24 станции – грузовые (Ароматная, Баглей, Баловка, Богуславский, Брагиновка, Верхнеднепровск, Вольногорск, Встречный, Горяиново, Губиниха, Диевка, Днепропетровск-Грузовой, Днепродзержинск, Игрень, Кайдакская, Нижнеднепровск, Нижнеднепровск-Пристань, Николаевка-Донецкая, Обводная, Павлоград-2, Правда, Самаровка и Тритузная).





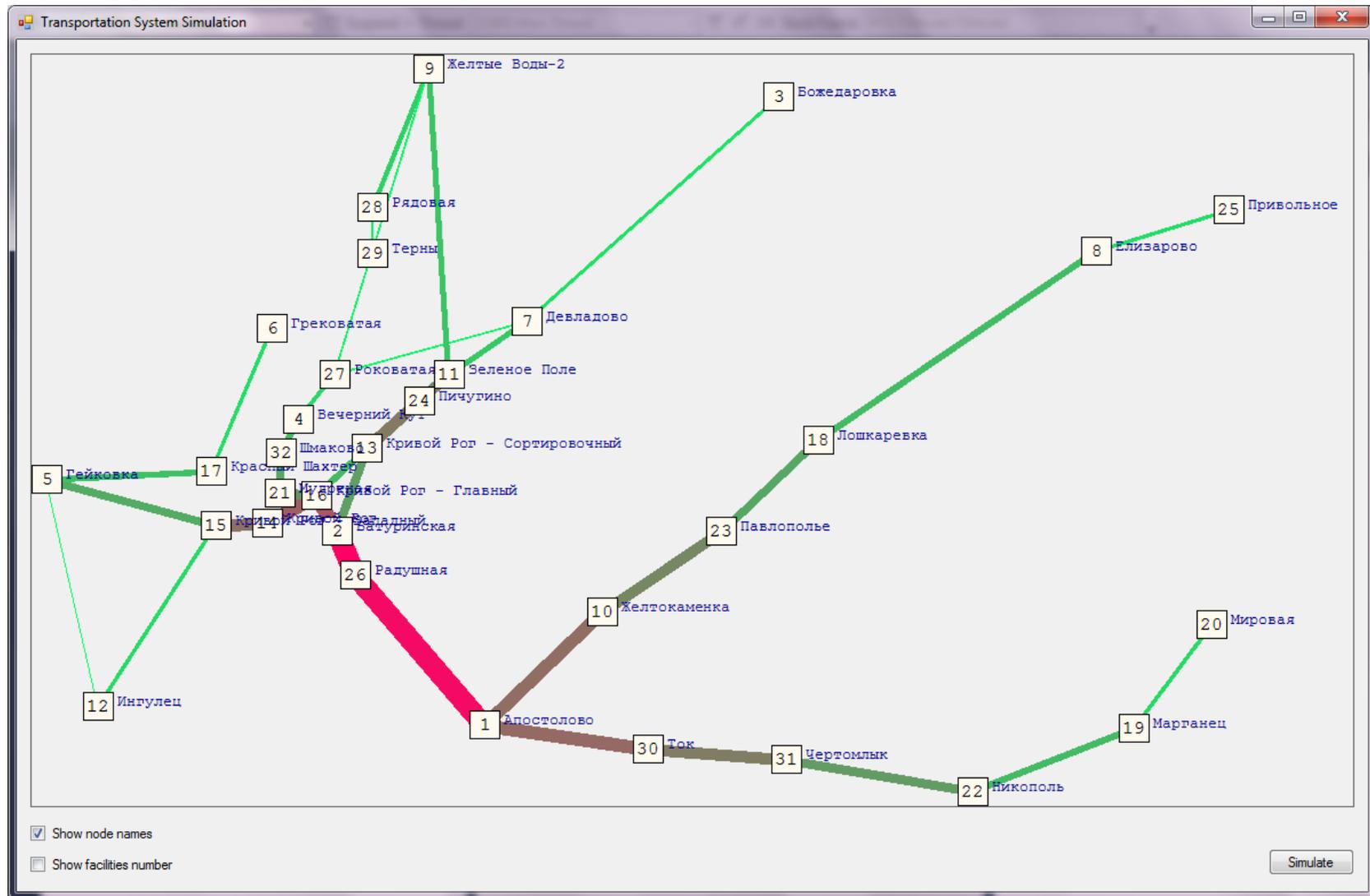


Рисунок 3.5 – Программная модель Криворожской дирекции железнодорожных перевозок

Граф-модель Запорожской дирекции железнодорожных перевозок включает 52 вершины, связанные 114 звеньями. Запорожская дирекция включает одну сортировочную станцию (Запорожье-Левое), 7 участковых станций (Запорожье-1, Запорожье-2, Камыш-Заря, Мелитополь, Нововеселая, Пологи и Федоровка), а также 12 грузовых станций (Берда, Бердянск, Вольнянск, Днепрорудная, Днепрострой-2, Запорожье-Грузовое, Кушугум, Передаточное, Порт Великое Запорожье, Растущая, Тавричеськ и Челюскин).

Граф-модель Криворожской дирекции железнодорожных перевозок состоит из 32 вершин и 70 звеньев. Из станций, входящих в состав Криворожской дирекции, одна станция является сортировочной (Кривой Рог-Сортировочный), одна станция – участковая (Апостолово) и 15 станций являются грузовыми (Батуриная, Вечерний Кут, Грековатая, Желтые Воды-2, Ингулец, Кривой Рог, Кривой Рог-Западный, Кривой Рог-Главный, Марганец, Мудреная, Никополь, Роковатая, Терны, Чертомлык и Шмаково).

Граф-модель Приднепровской железной дороги является совокупностью граф-моделей соответствующих дирекций, дополненной 6 звеньями, которые связывают транспортные сети в одну. Транспортные сети Днепропетровской и Криворожской дирекций железнодорожных перевозок связывают 3 перегона: Верховцево – Божедаровка, Пятихатки – Желтые Воды-2, Сурское – Привольное. Транспортные сети Днепропетровской и Запорожской дирекций железнодорожных перевозок связывают 2 звена – перегоны Синельниково-1 – Славгород-Южный и Чаплино – Мечетная. Транспортные сети Запорожской и Криворожской дирекций соединены перегонем Миртовая – Канцеровка.

Необходимость проведения имитационного эксперимента обусловлена стохастичностью спроса на транспортные услуги, а также вероятностной природой технологического процесса обслуживания вагонопотока. Численные значения долей ресурсов, выделяемых на обеспечения соответствующих направлений устойчивого развития Приднепровской железной дороги, определяются на основании численных значений параметров спроса. Таким обра-

зом, возникает необходимость в определении функциональных зависимостей значений  $\delta_{\text{тех}}$ ,  $\delta_{\text{эк}}$  и  $\delta_{\text{к}}$  от характеристик стохастического спроса на транспортные средства, поскольку значения долей ресурсов на обеспечение устойчивого развития, в конкретной ситуации на рынке корректно могут быть оценены только на основании таких зависимостей.

В качестве основных численных параметров, позволяющих описать вероятностный спрос на транспортные средства железной дороги, в разработанной программной модели выделены реализации случайных величин интенсивности поездопотоков на транспортной сети, а также числа вагонов в составе поездов. При проведении экспериментальных исследований с целью определения функциональной зависимости показателей эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития, от характеристик спроса на транспортные средства в диссертационной работе рассматривается математическое ожидание интенсивности поездопотока  $\mu_{\zeta}$  и математическое ожидание числа вагонов  $\mu_{\psi}$  в составе одного грузового поезда. Таким образом, целью проведения имитационного эксперимента является определение следующих функциональных зависимостей:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{тех}} = f(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}), \\ \varepsilon_{\text{эк}} = f(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}), \\ \varepsilon_{\text{к}} = f(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}). \end{cases} \quad (3.14)$$

Поскольку функциональные зависимости (3.14) могут иметь нелинейный характер, в имитационном эксперименте принято решение рассматривать более двух уровней варьирования входящих факторов: 4 уровня варьирования для фактора  $\mu_{\zeta}$  и 3 уровня варьирования для фактора  $\mu_{\psi}$ . Диапазон варьирования входящих факторов и численные значения уровней варьирования, использованные при проведении имитационного эксперимента [131, 132], представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Уровни варьирования факторов в эксперименте

Уровень варьирования фактора	Математическое ожидание интенсивности поездопотока, ч <sup>-1</sup> (код)	Математическое ожидание количества вагонов в составе поезда, ваг. (код)
1	0,2 (-1)	20 (-1)
2	0,5 (-1/3)	35 (0)
3	0,8 (1/3)	50 (+1)
4	1,1 (+1)	-

Количество серий опытов  $N_s$  в полном факторном плане эксперимента определяется как количество всех возможных комбинаций уровней варьирования входящих факторов [114]:

$$N_s = \prod_{i=1}^{N_f} l_i, \quad (3.15)$$

где  $N_f$  – количество входящих факторов;

$l_i$  – количество уровней варьирования  $i$ -го фактора.

В соответствии с формулой (3.15), количество серий опытов в эксперименте по определению совокупности функциональных зависимостей (3.14) составляет 12. Комбинации уровней варьирования входящих факторов в сериях опытов представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – План полного факторного эксперимента

Серия опытов	Математическое ожидание интенсивности поездопотока	Математическое ожидание количества вагонов в составе поезда
1	2	3
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	+1
4	-1/3	-1
5	-1/3	0

Продолжение табл. 3.2

1	2	3
6	-1/3	+1
7	1/3	-1
8	1/3	0
9	1/3	+1
10	+1	-1
11	+1	0
12	+1	+1

Для определения достаточного количества опытов в сериях с использованием разработанной программной модели Приднепровской железной дороги проведен пилотный эксперимент в 100 опытов в каждой серии. В качестве функции отклика в пилотном эксперименте использовано значение критерия эффективности (2.12). По результатам пилотного эксперимента установлено, что случайная величина функции отклика имеет нормальное распределение для каждой серии полного факторного эксперимента. Гистограмма распределения случайной величины функции отклика для 1 серии пилотного эксперимента представлена на рис. 3.6.

Поскольку функция отклика в пилотном эксперименте имеет нормальное распределение, то достаточное количество опытов  $n_d$  в серии можно оценить по следующей формуле [134]:

$$n_d = \frac{t_\beta^2 \cdot \sigma^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.16)$$

где  $t_\beta$  – стандартизированное значение среднеквадратического отклонения для нормального закону распределения;

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение функции отклика;

$\varepsilon$  – абсолютная ошибка для функции отклика:

$$\varepsilon = (1 - \beta) \cdot \bar{y}, \quad (3.17)$$

$\beta$  – уровень доверительной вероятности;

$\bar{y}$  – среднее арифметическое значение функции отклика.

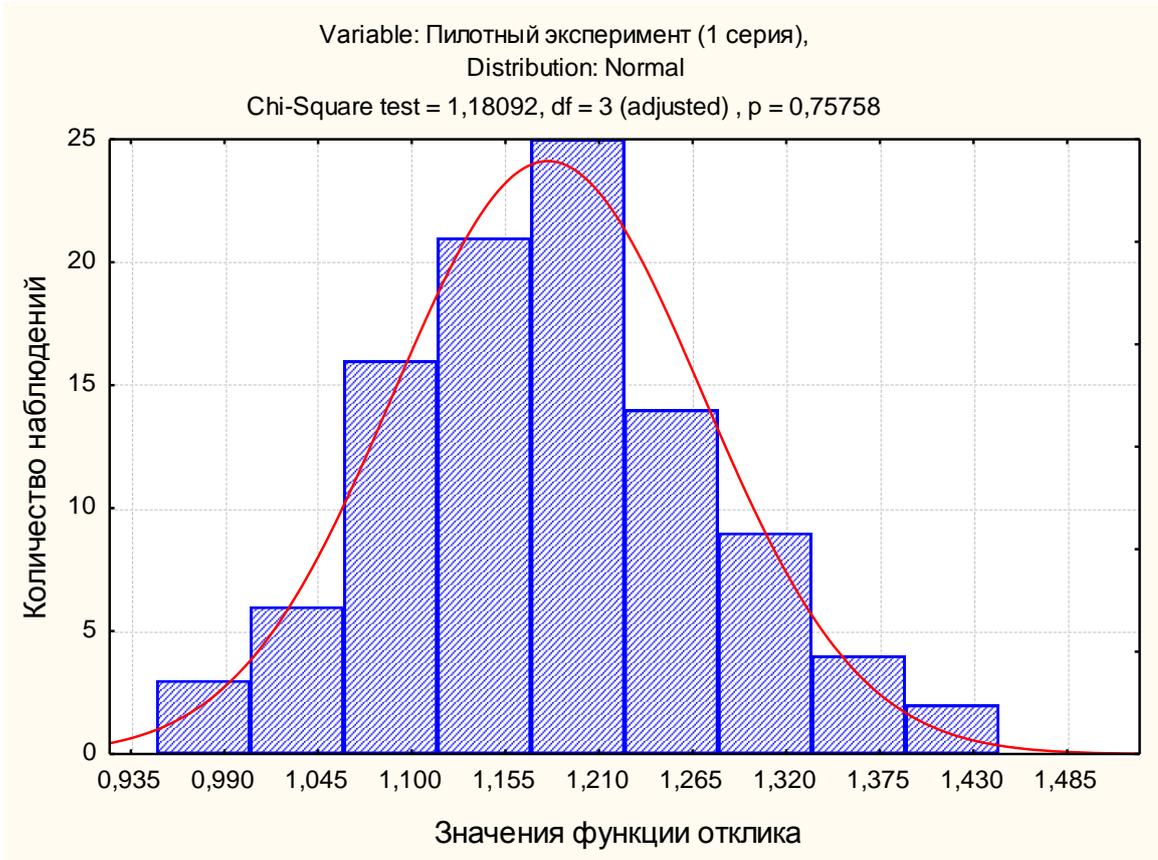


Рисунок 3.6 – Гистограмма распределения функции отклика в 1 серии пилотного эксперимента

Для оценки достаточного количества опытов в сериях принят уровень доверительной вероятности в 0,95, при этом соответствующее значение  $t_\beta$  составляет 1,96 [135]. Результаты оценки достаточного количества опытов в сериях полного факторного эксперимента, полученные по результатам пилотного эксперимента, представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты оценки достаточного количества опытов в сериях эксперимента

Серия опытов	Среднее значение функции отклика	Среднеквадратическое отклонение функции отклика	Абсолютная ошибка для функции отклика	Достаточное количество опытов
1	1,1860	0,1661	0,0593	30
2	0,8748	0,1340	0,0437	36
3	0,8189	0,0961	0,0409	21
4	1,0603	0,1397	0,0530	27
5	0,8789	0,1481	0,0439	44
6	0,9039	0,1667	0,0452	52
7	0,8971	0,1552	0,0449	46
8	1,0842	0,1763	0,0542	41
9	1,0887	0,1789	0,0544	41
10	1,0345	0,1834	0,0517	48
11	0,8953	0,1274	0,0448	31
12	1,2293	0,1734	0,0615	31

Поскольку достаточное количество опытов для каждой из серий не превышает проведенного количества опытов, то результаты пилотного эксперимента можно считать достоверными. На основании результатов, представленных в табл. 3.3, можно сделать вывод, что в основном эксперименте 100 опытов в каждой из серий является достаточным для обеспечения точности результатов, характеризующейся уровнем доверительной вероятности в 0,95.

### 3.3 Результаты моделирования процесса организации работы железнодорожных станций на Приднепровской железной дороге

В разработанной программной модели процедура проведения полного факторного эксперимента реализована в функции CalcExpert (приложение А). Основными переменными, используемыми в процедуре, являются параметры

плана эксперимента – интервалы варьирования входящих параметров, шаг варьирования и количество опытов в сериях. Основные расчеты осуществляются в циклах (два внешних цикла определяют текущие значения входящих факторов в серии, а внутренний обеспечивает выполнение заданного количества опытов), при этом тело внутреннего цикла содержит процедуры инициализации случайных величин  $sI$  и  $sQ$ , а также расчет значений функций эластичности и общего критерия эффективности. Результаты моделирования сохраняются в текстовый файл `res.txt`.

Таким образом, численными результатами имитационного эксперимента является массив значений четырех переменных – функций эластичности затрат ресурсов  $\varepsilon_{\text{тех}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ЭК}}$ ,  $\varepsilon_{\text{К}}$  и функции отклика  $F_{\text{ц}}$ , сформированных в 12 групп, соответствующих сериям опытов, по 100 значений в каждой группе.

Анализ полученных выборок показал, что функция отклика  $F_{\text{ц}}$ , определяемая в процедуре `SimulateTM` как значение целевой функции задачи линейного программирования, имеет нормальное распределение во всех сериях опытов. Также во всех сериях нормально распределены случайные величины функций эластичности затрат ресурсов по направлениям снижения вредного воздействия на окружающую среду и повышения качества обслуживания клиентуры. При этом функция эластичности затрат ресурсов на развитие совершенствующих технологий имеет гамма-распределение во всех сериях опытов. Гистограммы распределения случайных величин функций эластичности  $\varepsilon_{\text{тех}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ЭК}}$  и  $\varepsilon_{\text{К}}$  в первой серии опытов представлены на рис. 3.7–3.9.

Значение функции отклика  $F_{\text{ц}}$  определяется на основании функций эластичности в соответствии с зависимостью (2.12), при этом значения долей ресурсов по направлениям устойчивого развития, оцениваемые по результатам решения задачи линейного программирования симплекс-методом, выступают в качестве нормирующих значений. Таким образом, результат сложения двух нормально распределенных величин  $\varepsilon_{\text{ЭК}}$  и  $\varepsilon_{\text{К}}$  и гамма-распределенной величины  $\varepsilon_{\text{тех}}$  определяет нормальность функции отклика.

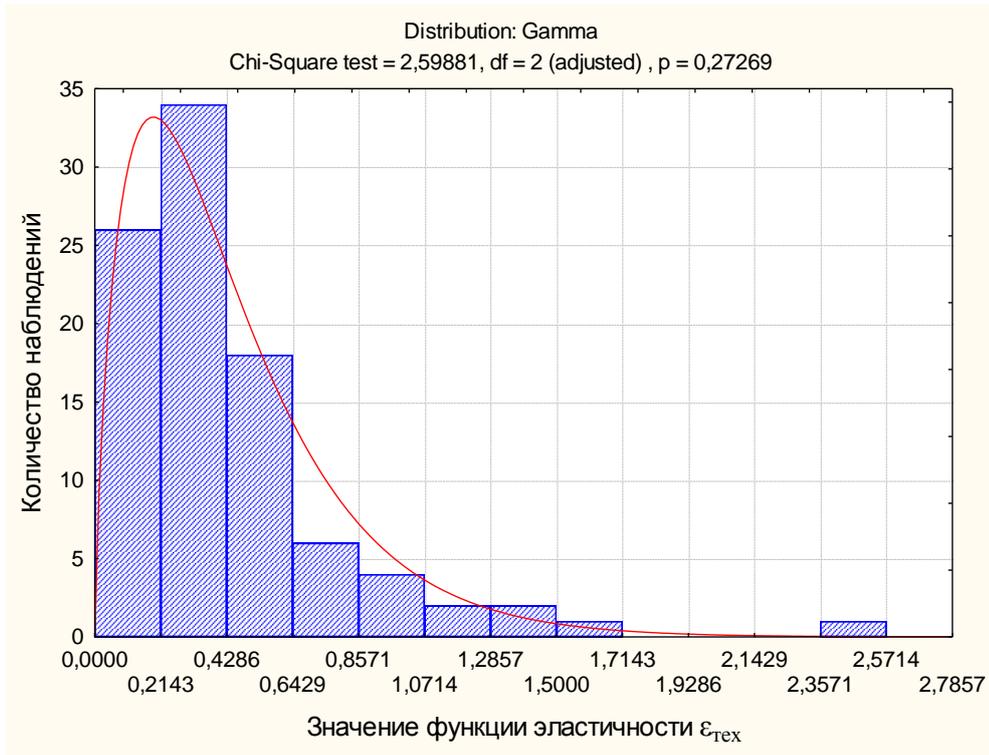


Рисунок 3.7 – Гистограмма распределения показателя эластичности затрат ресурсов на развитие совершенствующих технологий

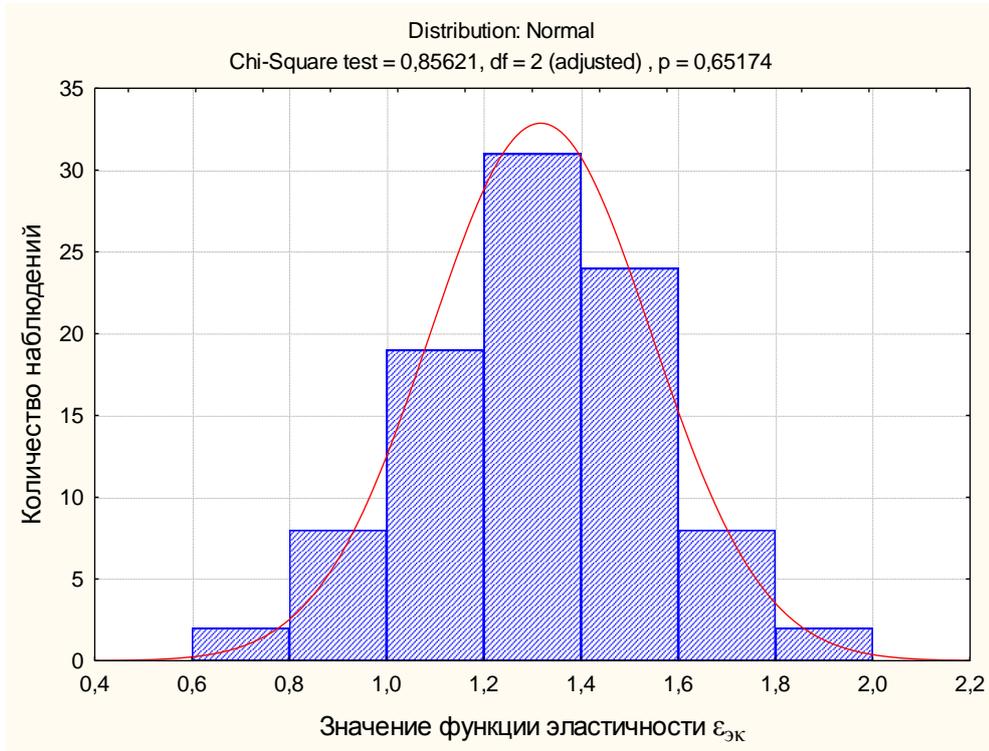


Рисунок 3.8 – Гистограмма распределения показателя эластичности затрат ресурсов, направленных на снижение вредного воздействия на окружающую среду

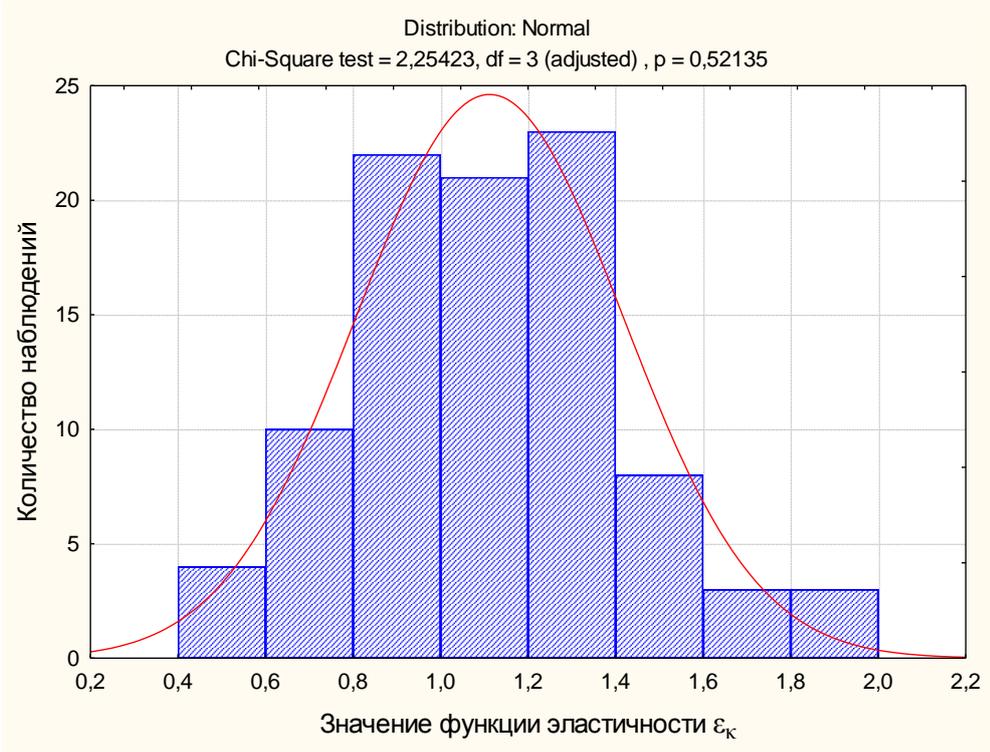


Рисунок 3.9 – Гистограмма распределения показателя эластичности затрат ресурсов в направление повышения качества обслуживания

В табл. 3.4 приведены результаты расчета математического ожидания и среднеквадратического отклонения функций эластичности затрат ресурсов, полученные при обработке результатов моделирования.

Численные результаты имитационного эксперимента, представленные в табл. 3.4, являются основой для определения функциональных зависимостей (3.14) показателей эластичности затрат ресурсов от параметров спроса на транспортное обслуживание.

Таблица 3.4 – Характеристика случайных величин функций эластичности по результатам эксперимента

Серия ОПЫТОВ	Математическое ожидание			Среднеквадратическое отклонение		
	$\epsilon_{\text{тех}}$	$\epsilon_{\text{ЭК}}$	$\epsilon_{\text{К}}$	$\epsilon_{\text{тех}}$	$\epsilon_{\text{ЭК}}$	$\epsilon_{\text{К}}$
1	0,4238	1,3307	1,1211	0,0384	0,2306	0,2616
2	0,3157	0,5382	0,8937	0,0269	0,1488	0,1448
3	0,2870	0,3863	0,5160	0,0181	0,1640	0,0441
4	0,4498	1,2143	0,6531	0,0732	0,5584	0,1818
5	0,4611	0,6573	0,6704	0,0845	0,2260	0,0801
6	0,5318	0,8001	0,7072	0,1549	0,3250	0,1712
7	0,4846	0,7732	0,7135	0,0414	0,2781	0,0786
8	0,6259	1,2067	0,7689	0,1728	0,7119	0,1467
9	0,7686	0,7316	1,1981	0,4060	0,3673	0,4642
10	0,6025	1,1289	0,8402	0,0906	0,6020	0,1947
11	0,6221	0,6893	0,6420	0,1307	0,2287	0,1745
12	1,3267	1,2866	0,7198	0,4334	0,4966	0,2445

### 3.4 Оценка воспроизводимости эксперимента

Поведенный эксперимент по определению функциональных зависимостей показателей эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития железных дорог от численных характеристик спроса на транспортные услуги должен быть воспроизводимым, чтобы полученные при анализе результатов зависимости можно было считать корректными [135]. Корректность результатов эксперимента при этом обуславливается тем, что полученные данные являются значимыми, и будут повторены в ходе проведения эксперимента с такими же исходными данными.

Согласно [135] для экспериментов из  $N_s$  серий, каждая из которых содержит  $N_e$  дублирующих опытов, что дает в результате  $N_s \cdot N_e$  значений функции отклика  $y_{uvw}$ , воспроизводимость может быть проверена с помощью критерия Кохрена. Критерий Кохрена ( $G$ -критерий) позволяет подтвердить или опровергнуть гипотезу об однородности ряда дисперсий и определяется как отношение максимальной дисперсии в сериях к сумме дисперсий функции отклика в сериях эксперимента:

$$G = \frac{\max(s_{uv/w}^2)}{\sum_{v=1}^{N_s} s_{uv/w}^2}, \quad (3.18)$$

где  $s_{uv/w}^2$  – дисперсия, характеризующая рассеяние значений функции отклика в серии опытов.

Значение дисперсии в серии опытов определяется по зависимости:

$$s_{uv/w}^2 = \frac{1}{N_e - 1} \cdot \sum_{w=1}^{N_e} (\bar{y}_{uv/w} - y_{uvw})^2, \quad (3.19)$$

где  $\bar{y}_{uv/w}$  – среднее арифметическое значение функции отклика в  $u$ -ой серии опытов:

$$\bar{y}_{uv/w} = \frac{1}{N_e} \cdot \sum_{w=1}^{N_e} y_{uvw} \cdot \quad (3.20)$$

Гипотеза об однородности ряда дисперсий в сериях эксперимента подтверждается, если расчетное значение критерия  $G$  меньше соответствующего табличного значения  $G_{\text{табл}}$ :

$$G < G_{\text{табл}} \cdot \quad (3.21)$$

Результаты оценки значений дисперсии функции отклика в сериях имитационного эксперимента представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Дисперсия функции отклика в сериях эксперимента

Серия опытов	Среднее значение функции отклика	Дисперсия функции отклика
1	1,1860	0,0276
2	0,8748	0,0180
3	0,8189	0,0092
4	1,0603	0,0195
5	0,8789	0,0219
6	0,9039	0,0278
7	0,8971	0,0241
8	1,0842	0,0311
9	1,0887	0,0320
10	1,0345	0,0336
11	0,8953	0,0162
12	1,2293	0,0301
Сумма		0,2911

Таким образом, по данным табл. 3.5 расчетное значение критерия Кохрена для проведенного эксперимента составляет  $G = 0,1155$ .

Табличное значение критерия Кохрена определяется для заданного уровня риска  $\alpha$  и двух степеней свободы  $f_1 = N_e - 1$  и  $f_2 = N_s - 1$ . В соответ-

ствии с [135], для уровня риска  $\alpha = 0,05$  при  $f_2 = 11$  табличные значения  $G$ -критерия составляют 0,1820 для  $f_1 = 36$  и 0,1446 для  $f_1 = 144$ . Линейно интерполируя значения критерия, получаем для  $f_1 = 99$  следующее табличное значение:

$$G_{\text{табл}}(f_1 = 99) = 0,1446 + (99 - 36) \cdot \frac{0,1820 - 0,1446}{144 - 36} = 0,1664.$$

Поскольку неравенство (3.21) выполняется ( $0,1155 < 0,1664$ ), то гипотеза об однородности ряда дисперсий функции отклика не отклоняется. Таким образом, проведенный эксперимент является воспроизводимым.

#### Выводы по третьему разделу

1. Разработанная имитационная модель функционирования железнодорожных станций и ее программная реализация, содержащая функции оптимизации распределения грузовой работы по станциям, расчета оптимального количества обслуживающих механизмов, а также оптимального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития, позволяет учесть недетерминированность параметров спроса на транспортные услуги. Программная реализация имитационной модели для Приднепровской железной дороги (в составе Днепропетровской, Запорожской и Криворожской дирекций железнодорожных перевозок) является базой для проведения экспериментальных исследований в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог за счет обеспечения их устойчивого развития.

2. Разработанный план экспериментальных исследований на базе разработанной имитационной модели позволяет оценить возможный нелинейный характер зависимостей показателей эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития от параметров случайных величин спро-

са на транспортное обслуживание. Результаты пилотного эксперимента позволяют утверждать, что для обеспечения корректности результатов моделирования в сериях эксперимента достаточным является проведение не менее 52 опытов.

3. Анализ результатов проведенного эксперимента показал, что значения функции эластичности затрат ресурсов на развитие совершенствующих технологий имеет гамма-распределение, а распределение случайных величин эластичности затрат ресурсов по направлениям повышения экологической безопасности и качества обслуживания во всех сериях опытов. При этом случайная величина интегральной функции отклика имеет нормальное распределение. Численные результаты эксперимента являются основой для определения функциональных зависимостей показателей эластичности затрат ресурсов от параметров спроса на транспортное обслуживание.

4. Результаты оценки воспроизводимости экспериментальных исследований по определению функциональной зависимости показателей эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития от параметров спроса на услуги позволяют утверждать, что проведенный эксперимент является воспроизводимым, то есть при его повторном проведении будут получены аналогичные результаты.

## РАЗДЕЛ 4

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

#### 4.1 Регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований

Для обработки результатов экспериментальных исследований использована методология регрессионного анализа [124, 135] полученных в результате эксперимента выборок.

Определение функциональных зависимостей показателей эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития от численных характеристик спроса на транспортные услуги проведено в следующей последовательности:

- формирование альтернативных гипотез о виде регрессионных моделей;
- определение коэффициентов регрессионных моделей для выдвинутых альтернативных гипотез;
- оценка адекватности полученных регрессионных моделей и выбор моделей наиболее адекватных.

К множеству альтернативных гипотез о виде функциональных зависимостей  $\varepsilon_i = f(\mu_\zeta, \mu_\psi)$  отнесены:

- 7) гипотеза о линейной зависимости с ненулевым свободным членом:

$$H_1 : \varepsilon_i = a_0 + a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi, \quad (4.1)$$

где  $\varepsilon_i$  – функция эластичности затрат ресурсов по  $i$ -му направлению устойчивого развития;

$a_0, a_\zeta, a_\psi$  – коэффициенты регрессионной модели;

2) гипотеза о линейной зависимости без свободного члена:

$$H_2 : \varepsilon_i = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi ; \quad (4.2)$$

3) гипотеза о степенной зависимости со свободным членом, отличным от 1:

$$H_3 : \varepsilon_i = a_0 \cdot \mu_\zeta^{a_\zeta} \cdot \mu_\psi^{a_\psi} ; \quad (4.3)$$

4) гипотеза о степенной зависимости со свободным членом, равным 1:

$$H_4 : \varepsilon_i = \mu_\zeta^{a_\zeta} \cdot \mu_\psi^{a_\psi} ; \quad (4.4)$$

5) гипотеза о взвешенной сумме логарифмов независимых факторов:

$$H_5 : \varepsilon_i = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi ; \quad (4.5)$$

б) гипотеза о взвешенной сумме логарифма математического ожидания интенсивности поездопотока и математического ожидания количества вагонов в составе одного поезда:

$$H_6 : \varepsilon_i = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi ; \quad (4.6)$$

7) гипотеза о взвешенной сумме математического ожидания интенсивности поездопотока и логарифма математического ожидания количества вагонов в составе одного поезда:

$$H_7 : \varepsilon_i = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi . \quad (4.7)$$

В качестве основного инструмента для определения коэффициентов регрессионных моделей при обработке результатов экспериментальных исследований использованы функции пакета анализа Microsoft Excel (Data Analysis – Regression). Функции пакета анализа для построения регрессионных моделей предоставляют возможность получить следующие результаты [136]:

- значения коэффициентов функции регрессии;
- значение коэффициента детерминации и связанные с ним величины;
- результирующие показатели дисперсионного анализа и критериальная статистика для проверки значимости модели регрессии;
- по каждому коэффициенту регрессии – среднеквадратическое отклонение и другие статистические характеристики, позволяющие проверить значимость коэффициента;
- значение функции регрессии и остатки – разница между исходными значениями переменной и расчетными значениями функции регрессии.

Поскольку функции пакета анализа Microsoft Excel позволяют получить значения коэффициентов регрессии только для линейной модели типа (4.1) или (4.2), то при определении коэффициентов для гипотез (4.3) – (4.7) необходимы предварительные преобразования функции регрессии с целью приведения ее к линейному виду.

Модели (4.5) – (4.7) приводятся к линейному виду путем введения дополнительных переменных  $\mu'_\zeta$  и  $\mu'_\psi$ , значения которых принимаются равными натуральным логарифмам соответствующих математических ожиданий случайных величин интенсивности поездопотока и количества вагонов:

$$\mu'_\zeta = \ln \mu_\zeta, \mu'_\psi = \ln \mu_\psi. \quad (4.8)$$

После введения этих переменных уравнения (4.5) – (4.7) принимают следующий линейный вид:

$$H_5 : \varepsilon_i = a_\zeta \cdot \mu'_\zeta + a_\psi \cdot \mu'_\psi; \quad (4.9)$$

$$H_6 : \varepsilon_i = a_\zeta \cdot \mu'_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi; \quad (4.10)$$

$$H_7 : \varepsilon_i = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu'_\psi. \quad (4.11)$$

Гипотезы (4.3) и (4.4) приводятся к линейному виду за счет логарифмирования правой и левой частей уравнений с дальнейшими преобразованиями и введением соответствующих переменных.

Модель (4.3) после логарифмирования и преобразований принимает вид

$$H_3 : \ln \varepsilon_i = \ln a_0 + a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi. \quad (4.12)$$

Введем обозначения  $\varepsilon'_i = \ln \varepsilon_i$  и  $a'_0 = \ln a_0$ . В результате зависимость (4.3) принимает линейный вид:

$$H_3 : \varepsilon'_i = a'_0 + a_\zeta \cdot \mu'_\zeta + a_\psi \cdot \mu'_\psi. \quad (4.13)$$

Необходимо учитывать, что при определении коэффициента  $a_0$  в модели (4.3) на основании результатов использования функции пакета анализа Microsoft Excel необходимым является обратное преобразование:

$$a_0 = \exp a'_0. \quad (4.14)$$

Гипотеза (4.4) после соответствующих преобразований имеет следующий линейный вид:

$$H_4 : \varepsilon'_i = a_\zeta \cdot \mu'_\zeta + a_\psi \cdot \mu'_\psi. \quad (4.15)$$

При использовании функций регрессионного анализа для гипотез (4.1) – (4.2) в качестве входящего диапазона задаются значения параметров спроса на транспортные средства в соответствии с разработанным планом эксперимента, а в качестве исходящего диапазона – соответствующие значения функций отклика (функций эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития), полученные в ходе эксперимента. Для гипотез (4.3) – (4.7) в диапазонах входящих и исходящих данных указываются переменные, использованные при приведении уравнений регрессии к линейному виду.

Выбор гипотезы, наиболее адекватно описывающей результаты экспериментальных исследований, по каждой из функций эластичности осуществляется на основании наибольшего значения коэффициента детерминации.

В соответствии с принятой методикой обработки данных эксперимента имитационного моделирования, результаты, полученные при моделировании процесса функционирования станций Приднепровской железной дороги, проанализированы с использованием функций Microsoft Excel [136]. Проверка гипотез о виде функциональной зависимости показателей эластичности затрат ресурсов от численных характеристик спроса проведена по всем выделенным направлениям устойчивого развития железных дорог (кроме социальной составляющей).

В табл. 4.1–4.3 представлены результаты регрессионного анализа, проведенного для определения зависимостей от параметров спроса соответствующих функций эластичности на основании ряда выдвинутых альтернативных гипотез. Результаты использования функций Microsoft Excel для определения коэффициентов уравнений регрессии и оценки адекватности моделей приведены в приложении Б.

Таблица 4.1 – Результаты проверки гипотез о виде регрессионной модели для функции эластичности затрат ресурсов, направленных на развитие технологий совершенствующих процессы функционирования станций

Гипотеза о виде уравнения регрессии	Значения коэффициентов уравнения регрессии			Значения коэффициента детерминации
	$a_0$	$a_\zeta$	$a_\psi$	
$H_1 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_0 + a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$	-0,054*	0,501	0,008*	0,649
$H_2 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$	0	0,480	0,007	0,866
$H_3 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_0 \cdot \mu_\zeta^{a_\zeta} \cdot \mu_\psi^{a_\psi}$	0,279*	0,460	0,256*	0,708
$H_4 : \varepsilon_{\text{тех}} = \mu_\zeta^{a_\zeta} \cdot \mu_\psi^{a_\psi}$	1	0,477	0,043	0,887
$H_5 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$	0	0,262	0,207	0,858
$H_6 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$	0	0,207*	0,018	0,881
$H_7 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$	0	0,467	0,073	0,856

Таблица 4.2 – Результаты проверки гипотез о виде регрессионной модели для функции эластичности затрат ресурсов, направленных на снижение вредного воздействия на окружающую среду

Гипотеза о виде уравнения регрессии	Значения коэффициентов уравнения регрессии			Значения коэффициента детерминации
	$a_0$	$a_\zeta$	$a_\psi$	
$H_1 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_0 + a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$	1,077	0,259*	-0,010*	0,269
$H_2 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$	0	0,686	0,009*	0,821
$H_3 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_0 \cdot \mu_\zeta^{a_\zeta} \cdot \mu_\psi^{a_\psi}$	4,636*	0,226*	-0,455*	0,378
$H_4 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = \mu_\zeta^{a_\zeta} \cdot \mu_\psi^{a_\psi}$	1	0,205*	-0,023*	0,333
$H_5 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$	0	0,110	0,267	0,862
$H_6 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$	0	0,022	0,021	0,720
$H_7 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$	0	0,370	0,206	0,877

Таблица 4.3 – Результаты проверки гипотез о виде регрессионной модели для функции эластичности затрат ресурсов, направленных на повышение качества транспортного обслуживания

Гипотеза о виде уравнения регрессии	Значения коэффициентов уравнения регрессии			Значения коэффициента детерминации
	$a_0$	$a_\zeta$	$a_\psi$	
$H_1 : \varepsilon_{\text{К}} = a_0 + a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$	0,865	-0,034*	-0,002*	0,014
$H_2 : \varepsilon_{\text{К}} = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$	0	0,310*	0,014	0,855
$H_3 : \varepsilon_{\text{К}} = a_0 \cdot \mu_\zeta^{a_\zeta} \cdot \mu_\psi^{a_\psi}$	1,072*	-0,013*	-0,098*	0,028
$H_4 : \varepsilon_{\text{К}} = \mu_\zeta^{a_\zeta} \cdot \mu_\psi^{a_\psi}$	1	-0,014*	-0,079	0,589
$H_5 : \varepsilon_{\text{К}} = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$	0	0,039	0,216	0,848
$H_6 : \varepsilon_{\text{К}} = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$	0	0,127	0,018	0,839
$H_7 : \varepsilon_{\text{К}} = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$	0	0,054	0,268	0,928

В табл. 4.1–4.3 знаком (\*) помечены коэффициенты регрессионных моделей, незначимые для уровня доверительной вероятности в 0,95.

Среди проверенных гипотез для функции эластичности затрат ресурсов, направленных на развитие технологий совершенствующих процессы функционирования станций железных дорог, наименьшим отклонением дисперсии экспериментальных значений от дисперсии значений, полученных по модели, характеризуется гипотеза о степенной зависимости (4.4). При этом для функций эластичности затрат ресурсов по направлениям снижения вредного воздействия на окружающую среду и повышения качества транспортного обслуживания наиболее адекватными являются гипотезы о приведенной сумме типа (4.7).

Таким образом, функции эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития железных дорог в зависимости от параметров спроса на транспортные средства определяются как следующая совокупность:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{тех}} = \mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043}, \\ \varepsilon_{\text{эк}} = 0,370 \cdot \mu_{\zeta} + 0,206 \cdot \ln \mu_{\psi}, \\ \varepsilon_{\text{соц}} = 1, \\ \varepsilon_{\text{к}} = 0,054 \cdot \mu_{\zeta} + 0,268 \cdot \ln \mu_{\psi}. \end{cases} \quad (4.16)$$

Полученные зависимости являются основой для решения задачи оптимизации распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития железных дорог. Использование моделей (4.16) для определения коэффициентов целевой функции (2.12) и последующего решения задачи линейного программирования (3.13) позволяет учесть параметры стохастического спроса на транспортные средства железных дорог при формировании стратегии их устойчивого развития.

#### 4.2 Проверка адекватности и информационной способности регрессионных моделей

Для подтверждения целесообразности практического использования при управлении железными дорогами полученных регрессионных моделей зависимости функций эластичности затрат ресурсов по направлениям устой-

чивого развития от характеристик спроса на транспортные средства необходимо проверить гипотезы об информационной способности и адекватности данных моделей. Проверка информационной способности и адекватности уравнений регрессии проводится на основании критерия Фишера [135].

Для проверки информационной способности моделей формулируется нуль-гипотеза о равенстве общего рассеяния значений функции отклика по всему эксперименту и дисперсии неадекватности:

$$H_0 : \sigma_{\text{общ}}^2 \{y\} = \sigma_{\text{на}}^2, \quad (4.17)$$

где  $\sigma_{\text{общ}}^2 \{y\}$  – общее рассеяние значений функции отклика  $y_{uvw}$  по отношению к общему среднему значению по всему эксперименту;

$\sigma_{\text{на}}^2$  – дисперсия, характеризующая неадекватность модели по отношению к экспериментальным данным.

Общее рассеяние результатов измерений определяется по формуле

$$\sigma_{\text{общ}}^2 \{y\} = \frac{1}{n \cdot m} \cdot \sum_{v=1}^n \sum_{w=1}^m (y_{uvw} - \bar{\bar{y}})^2, \quad (4.18)$$

где  $n$  – количество серий опытов в эксперименте;

$m$  – количество опытов в серии;

$\bar{\bar{y}}$  – общее среднее значение функции отклика по всему эксперименту:

$$\bar{\bar{y}} = \frac{1}{n \cdot m} \cdot \sum_{v=1}^n \sum_{w=1}^m y_{uvw}. \quad (4.19)$$

Значение дисперсии, характеризующее неадекватность модели данным, полученным в результате эксперимента, рассчитывается для числа степеней свободы, равного  $(n - \lambda)$ :

$$\sigma_{\text{на}}^2 = \frac{1}{n - \lambda} \cdot \sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (4.20)$$

где  $\lambda$  – количество значимых коэффициентов регрессионной модели;

$\bar{y}_u$  – среднее экспериментальное значение выхода в  $u$ -ой серии опытов;

$\hat{y}_u$  – значение функции отклика, полученное на основании модели.

Истинность гипотезы (4.17) проверяется по критерию Фишера  $F_{\text{инф}}$ :

$$F_{\text{инф}} = \frac{\sigma_{\text{на}}^2}{\sigma_{\text{общ}}^2 \{y\}}. \quad (4.21)$$

Гипотеза отклоняется, если расчетное значение  $F_{\text{инф}}$  больше соответствующего табличного значения  $F_{\text{табл}}$ :

$$F_{\text{инф}} > F_{\text{табл}}. \quad (4.22)$$

Результаты проверки гипотезы об информационной способности полученных регрессионных моделей представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Проверка гипотезы об информационной способности регрессионных моделей

Регрессионная модель	Общее рассеяние значений функции отклика в эксперименте	Дисперсия неадекватности	Расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{инф}}$
$\varepsilon_{\text{тех}} = \mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043}$	0,206	0,745	3,62
$\varepsilon_{\text{эк}} = 0,370 \cdot \mu_{\zeta} + 0,206 \cdot \ln \mu_{\psi}$	0,145	1,029	7,10
$\varepsilon_{\text{к}} = 0,054 \cdot \mu_{\zeta} + 0,268 \cdot \ln \mu_{\psi}$	0,104	0,398	3,83

Табличное значение критерия Фишера для оценки информационной способности разработанных моделей определяем на основании значений для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и степеней свободы  $f_1$  и  $f_2$ , характеризующих соответствующие дисперсии в формуле расчетного значения критерия Фишера. При этом количество степеней свободы  $f_1$  всегда характеризует дисперсию, значение которой находится в числителе расчетной формулы критерия, а  $f_2$  – соответственно, дисперсию, значение которой находится в знаменателе расчетной формулы.

Дисперсия неадекватности определяется на основании суммы квадратов отклонений средних экспериментальных выходов от значений, определяемых на основании модели, и характеризуется количеством степеней свобо-

ды  $f_1 = n - \lambda = 10$ . Общая дисперсия эксперимента определяется на основании суммы квадратов отклонений экспериментальных значений во всех сериях эксперимента от среднеарифметического всех значений функции отклика в эксперименте. Количество степеней свободы для общей дисперсии эксперимента равно суммарному количеству опытов:  $f_2 = n \cdot m = 1200$ .

Таблица значений критерия Фишера [135] содержит значения для количества степеней свободы  $f_2 = 1, f_2 = 2, \dots, f_2 = 100, f_2 = 200, f_2 = \infty$ . При расчете табличного значения критерия принят диапазон значений для  $f_2 = \infty$ . Среди соответствующих значений для количества степеней свободы  $f_1$  принимается значение критерия  $F(f_1 = 10) = 1,83$ .

В соответствии с проведенными расчетами критерия для разработанных регрессионных моделей  $F_{\text{инф}}$  принимает значения, превышающие соответствующее табличное значение  $F_{\text{табл}}$ . Таким образом, неравенство (4.22) выполняется для всех зависимостей функций эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития железных дорог. Это говорит о том, что полученные регрессионные модели описывают результаты эксперимента лучше, чем простейшая модель  $\hat{Y} = \bar{y}$ , для которой при любом наборе значений входящих параметров выход не изменяется и равен среднему  $\bar{y}$ , то есть полученные модели имеют информационную ценность.

Для проверки адекватности регрессионных моделей формулируется нуль-гипотеза о равенстве дисперсии неадекватности  $\sigma_{\text{на}}^2$  и дисперсии эксперимента  $\sigma_{\text{эксп}}^2$ :

$$H_0 : \sigma_{\text{на}}^2 = \sigma_{\text{эксп}}^2 . \quad (4.23)$$

Дисперсия эксперимента рассчитывается как соотношение суммы квадратов отклонений, которые связаны с повторениями опытов и измерений, к числу степеней свободы данной суммы:

$$\sigma_{\text{эксп}}^2 = \frac{1}{m \cdot n - n} \cdot \sum_{v=1}^n \sum_{w=1}^m (y_{vww} - \bar{y}_{vw})^2 , \quad (4.24)$$

где  $\bar{y}_{uv}$  – среднее арифметическое значение функции отклика в серии эксперимента.

Истинность гипотезы (4.23) проверяется по значению критерия Фишера  $F_a$ , которое определяется по формуле

$$F_a = \frac{\sigma_{\text{на}}^2}{\sigma_{\text{эксп}}^2}. \quad (4.25)$$

Гипотеза является истинной, если выполняется следующее неравенство:

$$F_a < F_{\text{табл}}. \quad (4.26)$$

Результаты расчетов критерия Фишера при проверке адекватности полученных регрессионных моделей представлены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 – Проверка гипотезы об адекватности регрессионных моделей

Регрессионная модель	Дисперсия эксперимента	Дисперсия неадекватности	Расчетное значение критерия Фишера $F_a$
$\varepsilon_{\text{тех}} = \mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043}$	1,489	0,206	0,14
$\varepsilon_{\text{эк}} = 0,370 \cdot \mu_{\zeta} + 0,206 \cdot \ln \mu_{\psi}$	8,916	0,145	0,02
$\varepsilon_{\text{к}} = 0,054 \cdot \mu_{\zeta} + 0,268 \cdot \ln \mu_{\psi}$	0,085	0,104	1,23

При определении табличного значения критерия принят диапазон значений для  $f_2 = \infty$ . Среди соответствующих значений для количества степеней свободы  $f_1$  известным является значение критерия  $F(f_1 = 10) = 2,54$ .

В соответствии с проведенными расчетами значения  $F_a$  для разработанных регрессионных моделей составляет от 0,20 до 0,51, что меньше соответствующего табличного значения, то есть неравенство (4.26) выполняется для всех полученных регрессионных моделей, это говорит об истинности гипотезы (4.23). Таким образом, можно утверждать, что зависимости функций эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития от параметров спроса на транспортные средства адекватно описывают экспери-

ментальные результаты, то есть полученные на основании моделей результаты будут по точности не хуже экспериментальных.

4.3 Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и обеспечению процесса их устойчивого развития

Устойчивое развитие железных дорог обеспечивается за счет реализации мероприятий организационного и инвестиционного характера по основным направлениям. При этом доли ресурсов в общем объеме по каждому из направлений устойчивого развития предлагается определять в результате решения оптимизационной задачи (3.13), исходными данными для которой являются значения функций эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития, характерных для железной дороги. Для определения наиболее эффективного варианта устойчивого развития железных дорог значения функций эластичности затрат ресурсов целесообразно оценивать для оптимальных вариантов эксплуатации ее транспортных средств относительно технологии продвижения материало потока на транспортной сети и его переработки на станциях. В данной диссертационной работе с этой целью предложены инструменты для решения задач распределения местной грузовой работы по транспортной сети и определения оптимального количества средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ для переработки вагонного потока на грузовых станциях. Результаты регрессионного анализа, проведенного на основании данных проведенного эксперимента, показали, что существует функциональная зависимость значений параметров эластичности затрат ресурсов  $\varepsilon_{\text{тех}}$ ,  $\varepsilon_{\text{эк}}$  и  $\varepsilon_{\text{к}}$  от параметров спроса  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  на транспортные средства железных дорог для продвижения материало потока.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют сформулировать в общем виде методику повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и обеспе-

чения их устойчивого развития как совокупность следующих последовательно выполняемых мероприятий:

1. Сбор статистических данных относительно параметров спроса на транспортные средства: оценка статистических характеристик случайных величин интенсивности вагонопотока, интервалов движения и количества вагонов в составе грузовых поездов.

2. Определение численных параметров, характеризующих технологический процесс обслуживания материалопотока на сети и станциях железной дороги: оценка статистических характеристик случайных величин продолжительности обслуживаемых операций, скорости движения, а также основных стоимостных характеристик системы обслуживания по железной дороге в целом.

3. Первичное моделирование процесса функционирования железнодорожных станций: оптимальное распределение местной грузовой работы для базового варианта транспортной сети, расчет перерабатывающей способности грузовых станций с учетом имеющихся средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ.

4. Определение мероприятий по совершенствованию обслуживаемой системы железных дорог по направлениям устойчивого развития на основании результатов первичного моделирования (с учетом наиболее загруженных участков транспортной сети, суммарного времени обслуживания на грузовых станциях железных дорог и т.п.).

5. Повторное моделирование процесса функционирования железнодорожных станций для варианта, учитывающего мероприятия по совершенствованию системы обслуживания материалопотока.

6. Расчет численных значений функций эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития железных дорог на основании результатов первичного и повторного моделирования.

7. Определение оптимального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития железных дорог путем решения задачи максимизации предложенного критерия эффективности.

Практическое использование предложенной методики повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и обеспечения их устойчивого развития предполагает проведение имитационного моделирования процесса функционирования железнодорожных станций, а соответственно – использование специализированного программного обеспечения. В таком случае полученные результаты будут наиболее полно характеризовать функционирование железной дороги, а значит – позволят определить наиболее эффективный вариант обеспечения ее устойчивого развития. Однако на практике сбор информации обо всех параметрах функционирования в полном объеме может быть невозможен, как по организационным причинам (отсутствие централизованной системы регистрации и хранения данных), так и вследствие продолжительного характера самого процесса сбора данных (в течение периода сбора данных информация устаревает, т.к. успевают измениться внешние факторы или внутренние характеристики системы). Поэтому для определения численных значений функций эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития целесообразно использовать полученные в результате регрессионного анализа зависимости (4.16). В этом случае достаточной информацией для принятия решений относительно выбора наиболее перспективных направлений затрат ресурсов являются статистические характеристики спроса на транспортные средства – математические ожидания значений интенсивности поездопотока  $\mu_{\zeta}$  и количества вагонов в составе грузового поезда  $\mu_{\psi}$  (среднеарифметических значений данных показателей по железной дороге).

Следует отметить, что использование зависимостей (4.16) для определения численных значений функций эластичности является корректным для интервалов значений параметров спроса  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$ , принятых в проведенном имитационном эксперименте (поскольку регрессионные модели были полу-

чены на основании значений из этих интервалов), что подтверждается воспроизводимостью проведенного эксперимента. Однако регрессионные модели (4.16) также могут быть аппроксимированы для значений параметров спроса вне интервалов значений данных показателей, использованных в эксперименте. В таком случае полученные результаты необходимо интерпретировать с учетом того, что адекватность и информационная способность регрессионных моделей не гарантируется на уровне доверительной вероятности в 0,95, принятого в данной диссертационной работе.

Для определения численных значений долей ресурсов по направлениям устойчивого развития в предложенной методике предполагается решение симплекс-методом задачи (3.13), однако на практике оптимальное распределение ресурсов можно определить по простейшим аналитическим зависимостям при условии, если известно приоритетное направление затрат ресурсов и нижняя граница доли ресурсов фиксирована по каждому из направлений.

Функция эластичности затрат ресурсов  $\varepsilon_{\text{тех}}$  нелинейно зависит от параметров спроса  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$ ; при этом функция  $\varepsilon_{\text{тех}}$  для значений параметров спроса, рассматриваемых в данной работе, принимает значения в интервале от 0,528 до 1,238 (рис. 4.1). Функции эластичности  $\varepsilon_{\text{ЭК}}$  и  $\varepsilon_{\text{К}}$  линейно зависят от математического ожидания интенсивности поездопотока  $\mu_{\zeta}$  и логарифмически – от математического ожидания количества вагонов в составе грузового поезда  $\mu_{\psi}$ . При этом для проанализированных интервалов параметров спроса значения функции  $\varepsilon_{\text{ЭК}}$  изменяются в интервале от 0,691 до 1,213, а значения функции  $\varepsilon_{\text{К}}$  – в интервале от 0,814 до 1,108 (рис. 4.2, 4.3).

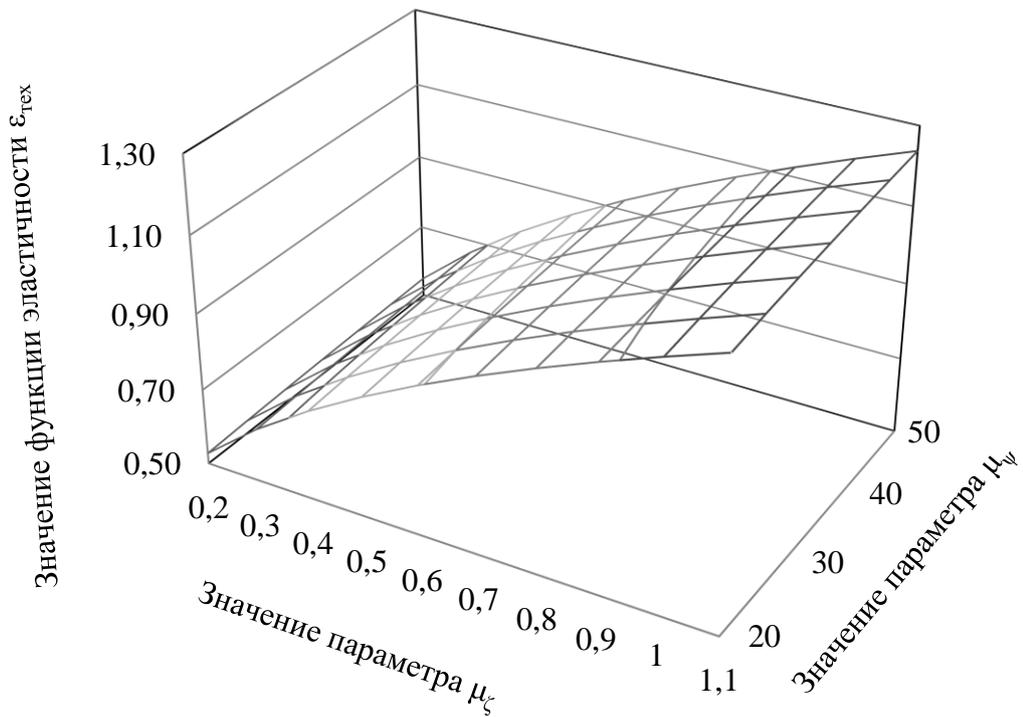


Рисунок 4.1 – Зависимость функции эластичности затрат ресурсов  $\epsilon_{\text{тех}}$  от параметров спроса на транспортные средства

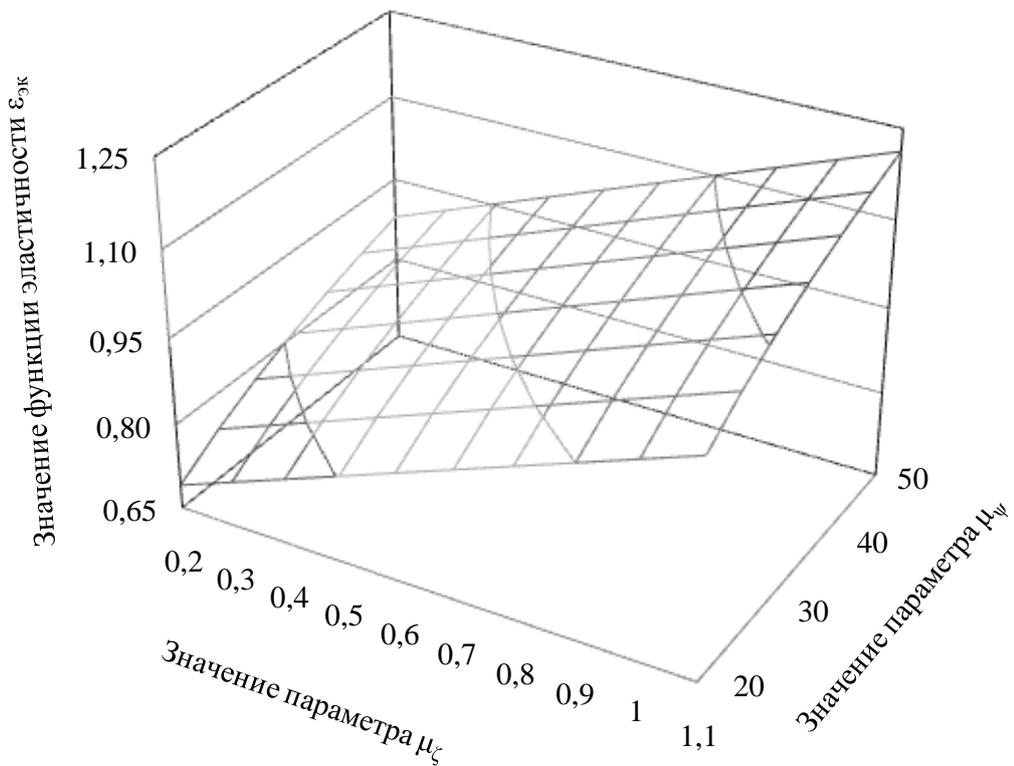


Рисунок 4.2 – Зависимость функции эластичности затрат ресурсов  $\epsilon_{\text{эк}}$  от параметров спроса на транспортные средства

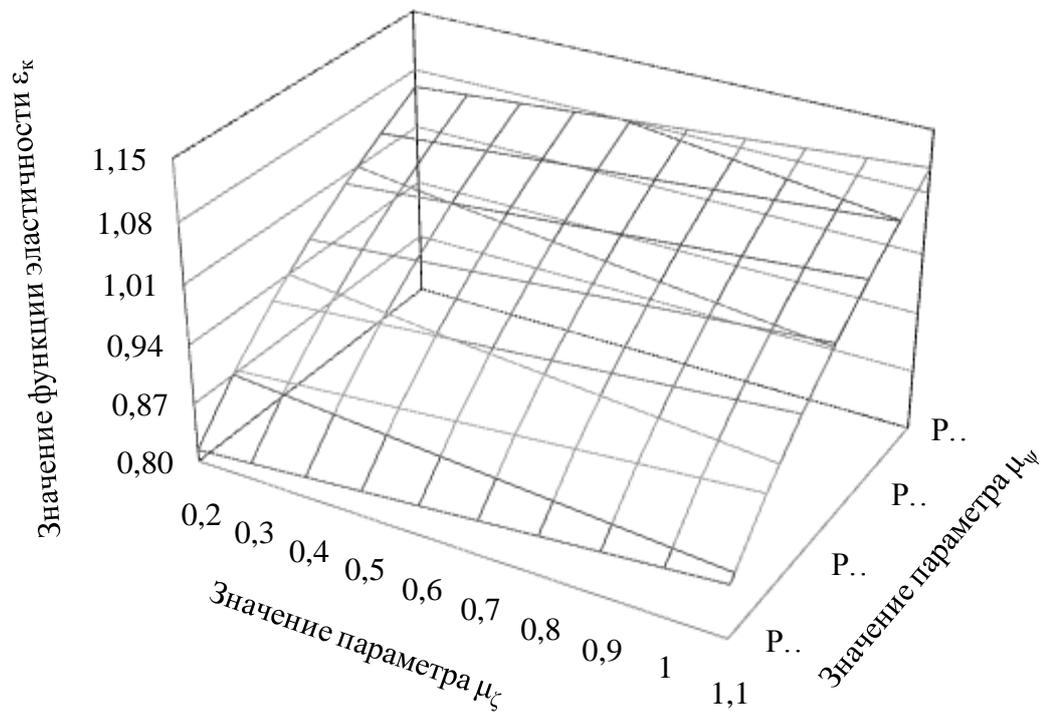


Рисунок 4.3 – Зависимость функции эластичности затрат ресурсов  $\epsilon_k$  от параметров спроса на транспортные средства

Решение задачи (3.13) для различных сочетаний граничных и медианных значений параметров спроса из исследованного интервала (табл. 4.6) позволяет сделать вывод, что результатом решения является такое сочетание управляющих переменных, для которого одно из значений является максимально возможным, а остальные находятся на минимальном уровне.

Таблица 4.6 – Решение задачи оптимального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития железных дорог для минимально допустимых значений  $\delta_{\text{тех}}^{\min} = \delta_{\text{эк}}^{\min} = \delta_{\text{соц}}^{\min} = \delta_k^{\min} = 0,1$

Параметр спроса		Значение функции эластичности затрат ресурсов				Оптимальное распределение ресурсов			
$\mu_\zeta$	$\mu_\psi$	$\epsilon_{\text{тех}}$	$\epsilon_{\text{эк}}$	$\epsilon_{\text{соц}}$	$\epsilon_k$	$\delta_{\text{тех}}$	$\delta_{\text{эк}}$	$\delta_{\text{соц}}$	$\delta_k$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,2	20	0,53	0,69	1,00	0,81	0,1	0,1	0,7	0,1
0,2	35	0,54	0,81	1,00	0,96	0,1	0,1	0,7	0,1
0,2	50	0,55	0,88	1,00	1,06	0,1	0,1	0,1	0,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,6	20	0,89	0,84	1,00	0,84	0,1	0,1	0,7	0,1
0,6	35	0,91	0,95	1,00	0,99	0,1	0,1	0,7	0,1
0,6	50	0,93	1,03	1,00	1,08	0,1	0,1	0,1	0,7
1	20	1,14	0,99	1,00	0,86	0,7	0,1	0,1	0,1
1	35	1,17	1,10	1,00	1,01	0,7	0,1	0,1	0,1
1	50	1,18	1,19	1,00	1,10	0,1	0,7	0,1	0,1

Результатом решения задачи оптимального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития является одна из вершин симплекса, ограничивающего пространство допустимых решений с учетом принятой системы ограничений. Значения вектора  $|\delta_{\text{тех}} \quad \delta_{\text{эк}} \quad \delta_{\text{соц}} \quad \delta_{\text{к}}|$ , являющиеся решением оптимизационной задачи (3.13), представляют собой соответствующие вершины симплекса, в которых целевая функция (2.12) принимает максимально возможное значение.

Используя данные табл. 4.6, нетрудно убедиться, что наибольшее значение доли ресурсов соответствует тому направлению, для которого значение функции эластичности затрат ресурсов, оцененное на основании соответствующих параметров спроса на транспортные средства, является максимальным по отношению к значениям функции эластичности для других направлений устойчивого развития. Таким образом, можно утверждать, что наиболее приоритетное направление устойчивого развития  $i_{pr}$  определяется как аргумент от максимального значения функции эластичности:

$$i_{pr} = \arg \left[ \max_{i=\{T, \text{Э}, C, K\}} \varepsilon_i(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) \right], \quad (4.27)$$

где  $i = \{T, \text{Э}, C, K\}$  – совокупность направлений устойчивого развития: T – развитие совершенствующих технологий, Э – снижение вредного воздействия на окружающую среду, C – развитие социальной составляющей функционирования системы, K – повышение качества обслуживания.

Соответственно, если известны значения нижней границы для доли ресурсов по направлениям устойчивого развития, то доля ресурсов  $\delta_{pr}$  по наиболее приоритетному направлению составляет:

$$\delta_{pr} = 1 - \sum_{i \neq i_{pr}} \delta_i^{\min}. \quad (4.28)$$

Если нижняя граница для всех направлений устойчивого развития фиксирована на одинаковом уровне  $\delta_{\min}$  по каждому из направлений, при этом выполняется условие  $\delta_{\min} \leq 0,25$ , то расчетная формула (4.28) принимает следующий вид:

$$\delta_{pr} = 1 - 3 \cdot \delta_{\min}. \quad (4.29)$$

В оптимальном решении для всех остальных направлений, кроме наиболее приоритетного, т.е. для  $i \neq i_{pr}$ , доля ресурсов равна минимально допустимому значению:  $\delta_i = \delta_i^{\min}$ .

Значения функций эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития железных дорог находятся в пересекающихся интервалах, имеющих относительно широкую общую область значений (в пределах этой области также находится постоянное значение  $\varepsilon_{\text{соц}} = 1$ ). Поэтому очевидным является гипотеза о том, что существует вариабельность для совокупности возможных вариантов наиболее приоритетных направлений устойчивого развития железных дорог (характеризующихся наибольшими значениями доли ресурсов в оптимальном решении), которая определяется значениями параметров спроса.

На рис. 4.4 представлены зависимости значений функций эластичности  $\varepsilon_i$  от математического ожидания интенсивности вагонопотока при фиксированном значении параметра  $\mu_{\psi} = 40$  вагонов. В рассматриваемом диапазоне для значений параметра  $\mu_{\zeta} \leq 0,21$  максимальное значение имеет функция  $\varepsilon_{\text{соц}}$ , в диапазоне  $0,21 < \mu_{\zeta} \leq 0,72$  наибольшим значением характеризуется функция

$\varepsilon_k$ , в диапазоне  $0,72 < \mu_\zeta \leq 0,81$  – функция  $\varepsilon_{ЭК}$ , и функция  $\varepsilon_{ТЕХ}$  имеет максимальное значение при  $\mu_\zeta > 0,81$ .

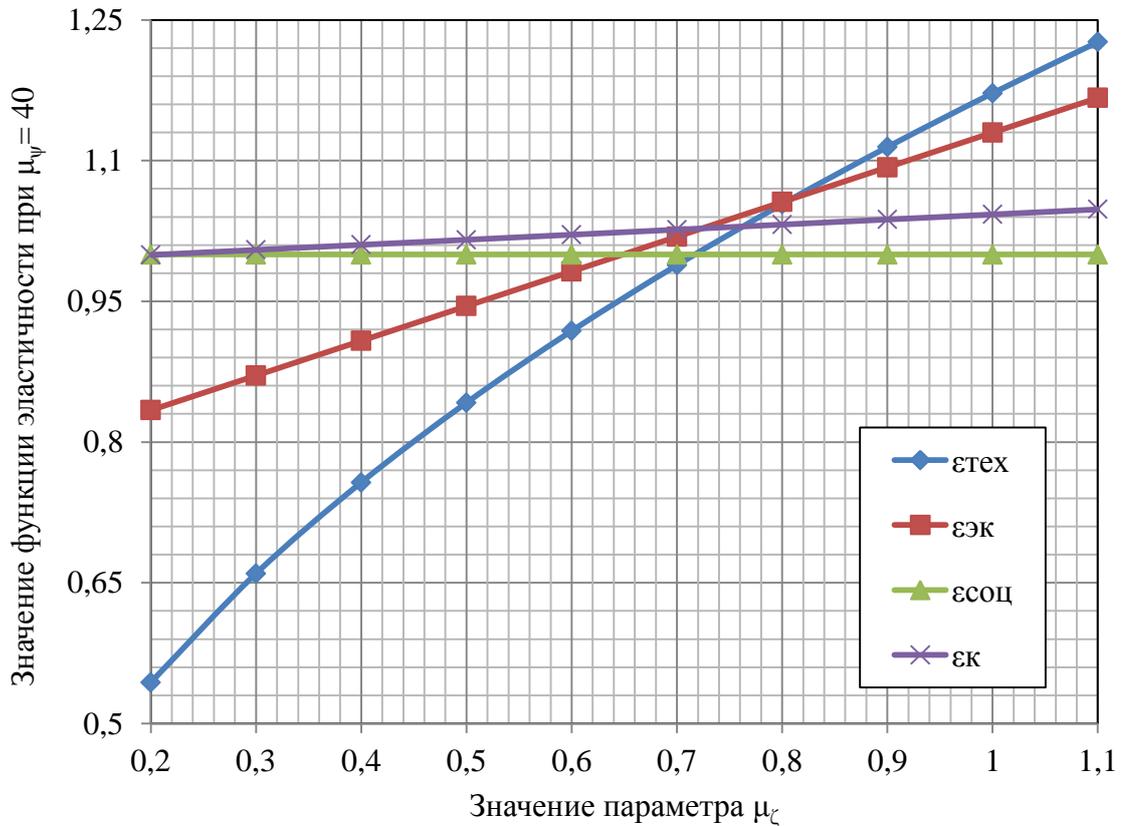


Рисунок 4.4 – Зависимости функций эластичности затрат ресурсов от параметра  $\mu_\zeta$  при  $\mu_\psi = 40$

Для зависимостей функций эластичности  $\varepsilon_i$  от параметра  $\mu_\psi$  при фиксированном  $\mu_\zeta = 0,75$  (рис. 4.5) выделяются следующие диапазоны значений  $\mu_\psi$ , в которых значения одной из функций эластичности максимальны: для значений параметра  $\mu_\psi \leq 24,32$  максимальное значение имеет функция  $\varepsilon_{СОЦ}$ , в диапазоне  $24,32 < \mu_\psi \leq 36,29$  наибольшим значением характеризуется функция  $\varepsilon_{ТЕХ}$ , в диапазоне  $36,29 < \mu_\psi \leq 45,72$  – функция  $\varepsilon_{ЭК}$ , а функция  $\varepsilon_K$  имеет максимальное значение при  $\mu_\psi > 45,72$ .

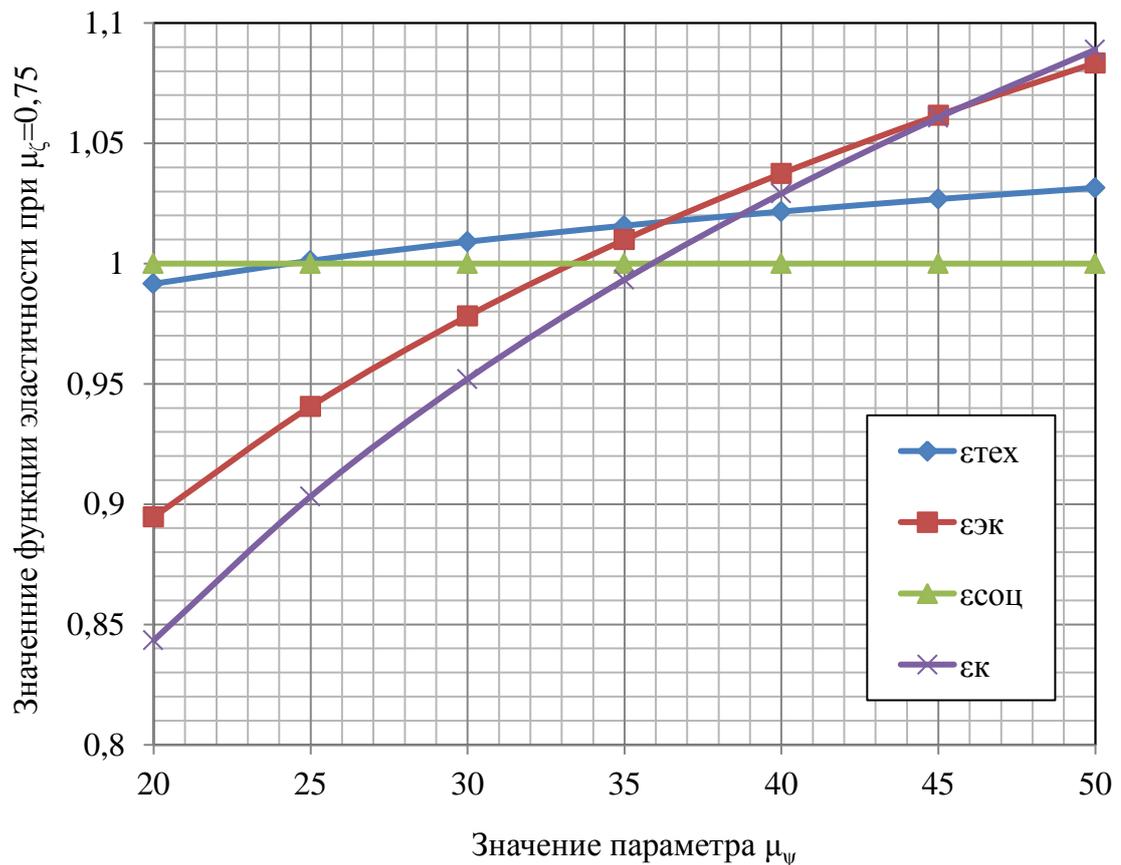


Рисунок 4.5 – Зависимости функций эластичности затрат ресурсов от параметра  $\mu_\psi$  при  $\mu_\zeta = 0,75$

Приведенные на рис. 4.4 и 4.5 примеры свидетельствуют о том, что для определения наиболее приоритетных направлений устойчивого развития достаточно установить, какая из функций эластичности имеет максимальное значение для известных  $\mu_\zeta$  и  $\mu_\psi$ . Для этого достаточно определить границы диапазонов  $\mu_\zeta$  и  $\mu_\psi$ , в которых соответствующие функции эластичности характеризуются наибольшими значениями.

Границы диапазонов значений параметров  $\mu_\zeta$  и  $\mu_\psi$  для пары функций эластичности  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_j$  определяются как корни относительно соответствующих параметров следующего уравнения:

$$\epsilon_i(\mu_\zeta, \mu_\psi) = \epsilon_j(\mu_\zeta, \mu_\psi). \quad (4.30)$$

Для четырех направлений устойчивого развития железных дорог можно выделить 6 пар функций  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_j$ :

$$\left[ \begin{array}{l} \varepsilon_{\text{тех}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{соц}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}), \\ \varepsilon_{\text{эк}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{соц}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}), \\ \varepsilon_{\text{к}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{соц}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}), \\ \varepsilon_{\text{эк}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{к}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}), \\ \varepsilon_{\text{тех}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{эк}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}), \\ \varepsilon_{\text{тех}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{к}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}). \end{array} \right. \quad (4.31)$$

Уравнение  $\varepsilon_{\text{тех}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{соц}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi})$  имеет следующий вид:

$$\mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043} = 1. \quad (4.32)$$

Данное уравнение имеет аналитическое решение относительно параметров  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$ :

$$\left[ \begin{array}{l} \mu_{\zeta}^{\text{TC}} = \frac{1}{\mu_{\psi}^{0,090}}, \\ \mu_{\psi}^{\text{TC}} = \frac{1}{\mu_{\zeta}^{11,093}}, \end{array} \right. \quad (4.33)$$

где  $\mu_{\zeta}^{\text{TC}}$ ,  $\mu_{\psi}^{\text{TC}}$  – границы диапазонов значений параметров  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  соответственно для пары функций эластичности  $\varepsilon_{\text{тех}}$  и  $\varepsilon_{\text{соц}}$ .

Уравнение  $\varepsilon_{\text{эк}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{соц}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi})$  принимает вид

$$0,370 \cdot \mu_{\zeta} + 0,206 \cdot \ln \mu_{\psi} = 1. \quad (4.34)$$

Относительно параметров  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  корни уравнения (4.34) определяются следующим образом:

$$\left[ \begin{array}{l} \mu_{\zeta}^{\text{ЭC}} = 2,703 - 0,557 \cdot \ln \mu_{\psi}, \\ \mu_{\psi}^{\text{ЭC}} = \exp(4,854 - 1,796 \cdot \mu_{\zeta}), \end{array} \right. \quad (4.35)$$

где  $\mu_{\zeta}^{\text{ЭС}}$ ,  $\mu_{\psi}^{\text{ЭС}}$  – границы диапазонов значений параметров  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  соответственно для пары функций эластичности  $\varepsilon_{\text{ЭК}}$  и  $\varepsilon_{\text{СОЦ}}$ .

Уравнение  $\varepsilon_{\text{К}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{СОЦ}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi})$  имеет вид

$$0,054 \cdot \mu_{\zeta} + 0,268 \cdot \ln \mu_{\psi} = 1. \quad (4.36)$$

Для параметров спроса  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  корни уравнения  $\varepsilon_{\text{К}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{СОЦ}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi})$  определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{cases} \mu_{\zeta}^{\text{КС}} = 18,52 - 4,96 \cdot \ln \mu_{\psi}, \\ \mu_{\psi}^{\text{КС}} = \exp(3,731 - 0,201 \cdot \mu_{\zeta}), \end{cases} \quad (4.37)$$

где  $\mu_{\zeta}^{\text{КС}}$ ,  $\mu_{\psi}^{\text{КС}}$  – границы диапазонов значений параметров  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  соответственно для пары функций эластичности  $\varepsilon_{\text{К}}$  и  $\varepsilon_{\text{СОЦ}}$ .

Уравнение  $\varepsilon_{\text{К}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{ЭК}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi})$  принимает вид

$$0,054 \cdot \mu_{\zeta} + 0,268 \cdot \ln \mu_{\psi} = 0,370 \cdot \mu_{\zeta} + 0,206 \cdot \ln \mu_{\psi}. \quad (4.38)$$

Корни уравнения (4.38) для параметров спроса  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  определяются по зависимостям:

$$\begin{cases} \mu_{\zeta}^{\text{КЭ}} = 0,196 \cdot \ln \mu_{\psi}, \\ \mu_{\psi}^{\text{КЭ}} = \exp(5,097 \cdot \mu_{\zeta}), \end{cases} \quad (4.39)$$

где  $\mu_{\zeta}^{\text{КЭ}}$ ,  $\mu_{\psi}^{\text{КЭ}}$  – границы диапазонов значений параметров  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  соответственно для пары функций эластичности  $\varepsilon_{\text{К}}$  и  $\varepsilon_{\text{ЭК}}$ .

Уравнение  $\varepsilon_{\text{ТЕХ}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{ЭК}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi})$  является нелинейным относительно параметров спроса и имеет вид:

$$\mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043} = 0,370 \cdot \mu_{\zeta} + 0,206 \cdot \ln \mu_{\psi}. \quad (4.40)$$

Уравнение  $\varepsilon_{\text{тех}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{к}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi})$  также нелинейно относительно параметров спроса и принимает вид:

$$\mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043} = 0,054 \cdot \mu_{\zeta} + 0,268 \cdot \ln \mu_{\psi}. \quad (4.40)$$

Уравнения (4.40) и (4.41) не имеют аналитического решения.

Относительно параметра спроса  $\mu_{\zeta}$  уравнения  $\varepsilon_{\text{тех}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{эк}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi})$  и  $\varepsilon_{\text{тех}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi}) = \varepsilon_{\text{к}}(\mu_{\zeta}, \mu_{\psi})$  можно представить в общем виде следующим образом:

$$a_{\zeta} \cdot \mu_{\zeta}^{0,730} + b_{\zeta} \cdot \mu_{\zeta} + c_{\zeta} = 0, \quad (4.42)$$

где  $a_{\zeta} = \mu_{\psi}^{0,043}$ ,  $b_{\zeta}$ ,  $c_{\zeta}$  – численные коэффициенты уравнений: для (4.40)  $b_{\zeta} = -0,37$ ,  $c_{\zeta} = -0,206 \cdot \ln \mu_{\psi}$ , а для (4.41)  $b_{\zeta} = -0,054$ ,  $c_{\zeta} = -0,268 \cdot \ln \mu_{\psi}$ .

Аналогично, относительно параметра  $\mu_{\psi}$  уравнения (4.40) и (4.41) имеют следующий общий вид:

$$a_{\psi} \cdot \mu_{\psi}^{0,079} + b_{\psi} \cdot \ln \mu_{\psi} + c_{\psi} = 0, \quad (4.43)$$

где  $a_{\psi} = \mu_{\zeta}^{0,477}$ ,  $b_{\psi}$ ,  $c_{\psi}$  – численные коэффициенты уравнений: для (4.40)  $b_{\psi} = -0,206$ ,  $c_{\psi} = -0,370 \cdot \mu_{\zeta}$ , а для (4.41)  $b_{\psi} = -0,268$ ,  $c_{\psi} = -0,054 \cdot \mu_{\zeta}$ .

Численное решение уравнений (4.42) и (4.43) возможно путем использования метода секущей. В рамках диссертационной работы метод секущей при определении границ диапазонов параметров реализован  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  реализован на базе класса Solver библиотеки EquationSolve, разработанной на кафедре транспортных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета [129]. В табл. 4.7 и 4.8 представлены численные результаты определения граничных значений параметров спроса  $\mu_{\zeta}$  и  $\mu_{\psi}$  соответственно.

Таблица 4.7 – Результаты численного решения уравнений (4.42) и (4.43) относительно параметра спроса  $\mu_\zeta$

Значение параметра спроса $\mu_\psi$	Пара функций эластичности	
	$\varepsilon_{\text{тех}}(\mu_\zeta, \mu_\psi) = \varepsilon_{\text{эк}}(\mu_\zeta, \mu_\psi)$	$\varepsilon_{\text{тех}}(\mu_\zeta, \mu_\psi) = \varepsilon_{\text{к}}(\mu_\zeta, \mu_\psi)$
20	0,46	0,52
25	0,56	0,59
30	0,65	0,66
35	0,73	0,71
40	0,81	0,76
45	0,89	0,81
50	0,96	0,85

Таблица 4.8 – Результаты численного решения уравнений (4.42) и (4.43) относительно параметра спроса  $\mu_\psi$

Значение параметра спроса $\mu_\zeta$	Пара функций эластичности	
	$\varepsilon_{\text{тех}}(\mu_\zeta, \mu_\psi) = \varepsilon_{\text{эк}}(\mu_\zeta, \mu_\psi)$	$\varepsilon_{\text{тех}}(\mu_\zeta, \mu_\psi) = \varepsilon_{\text{к}}(\mu_\zeta, \mu_\psi)$
0,5	21,85	-
0,6	27,35	25,56
0,7	33,23	33,82
0,8	39,42	44,11
0,9	45,85	-

На рис. 4.6 и 4.7 представлены графические зависимости граничных значений параметров спроса  $\mu_\zeta(\mu_\psi)$  и  $\mu_\psi(\mu_\zeta)$  соответственно, построенные на основании полученных расчетных формул (4.33), (4.35), (4.37) и (4.39), а также численных результатов решения уравнений, представленных в табл. 4.7 и 4.8. Зависимости  $\mu_\zeta(\mu_\psi)$  и  $\mu_\psi(\mu_\zeta)$  оценены для всех пар функций эластичности (4.31) в рамках интервалов значений параметров спроса, принятых в эксперименте.

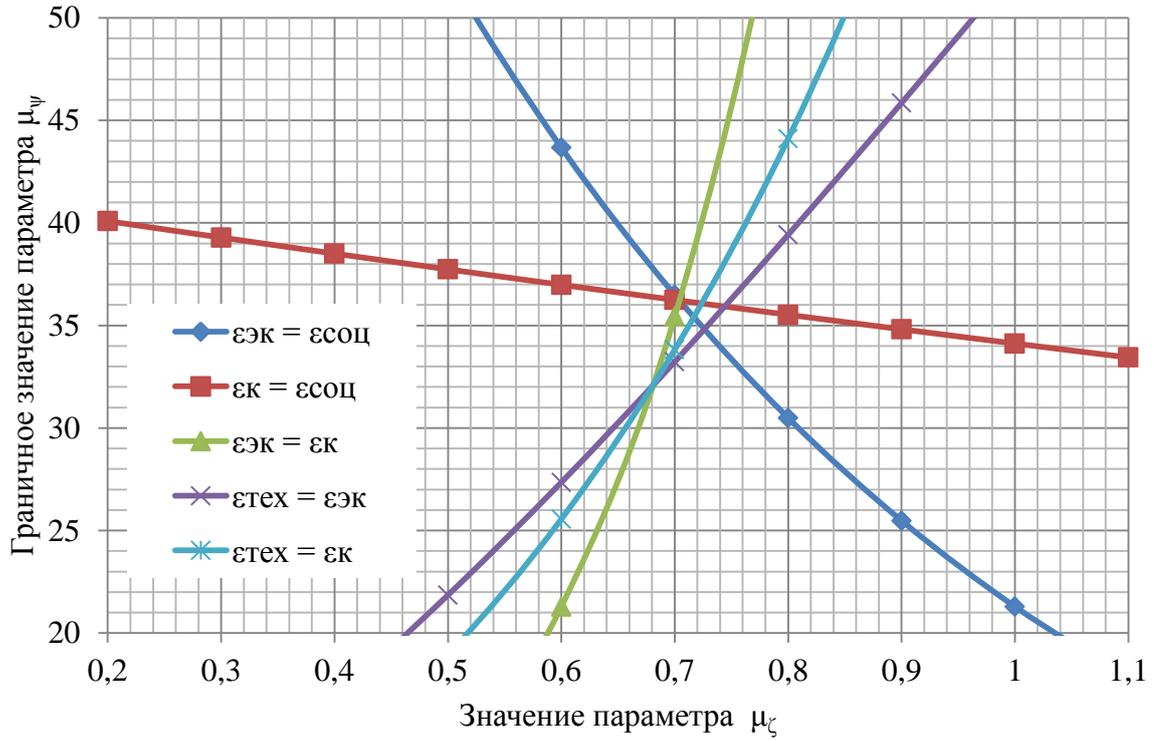


Рисунок 4.6 – Граничные значения параметра спроса  $\mu_\psi$

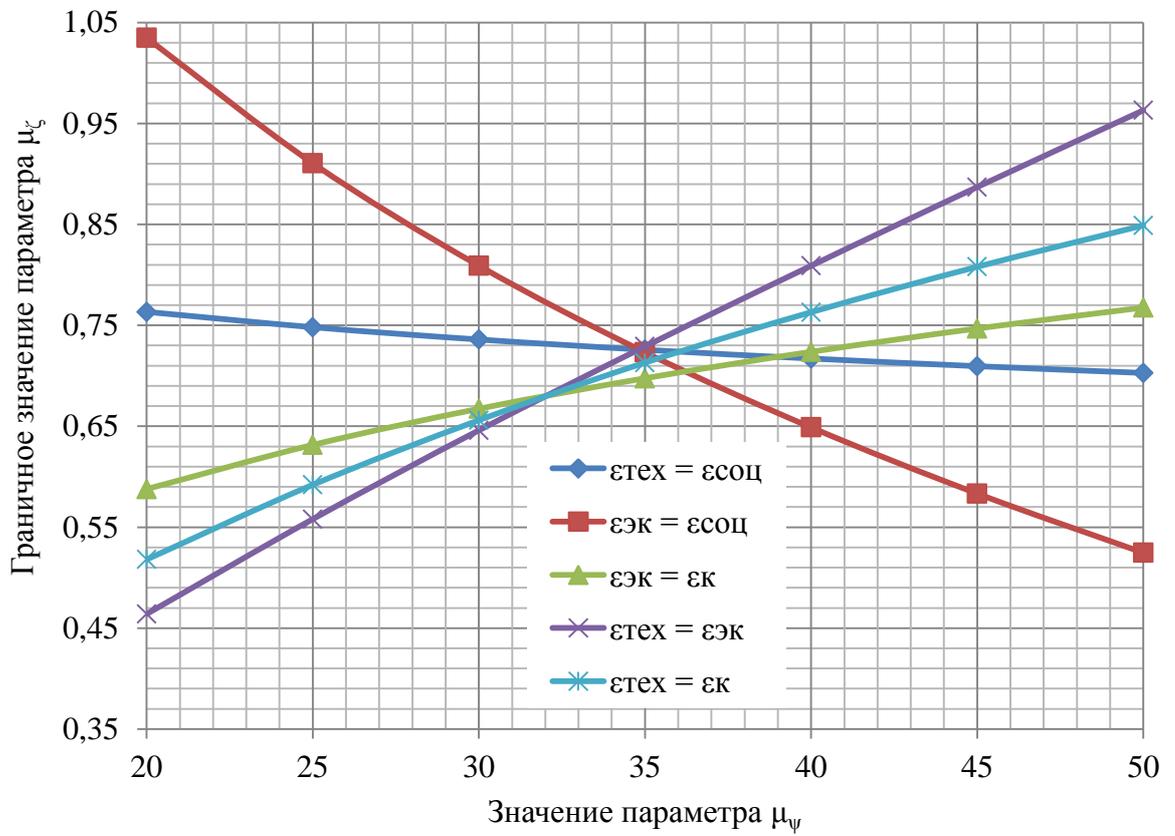


Рисунок 4.7 – Граничные значения параметра спроса  $\mu_\zeta$

Полученные зависимости позволяют определить наиболее перспективные направления затрат ресурсов в обеспечение устойчивого развития железных дорог. В табл. 4.9 приведены наиболее приоритетные направления устойчивого развития Приднепровской железной дороги для интервалов значений параметров спроса, рассматриваемых в рамках данной диссертационной работы (для обозначений направлений устойчивого развития в таблице приняты использованные выше маркеры: Т – развитие технологий совершенствующих процесс функционирования железных дорог, Э – снижение вредного воздействия на окружающую среду, С – развитие социальной составляющей, К – повышение качества обслуживания).

Таблица 4.9 – Наиболее приоритетные направления затрат ресурсов на обеспечение устойчивого развития Приднепровской железной дороги

Значение параметра $\mu_\zeta$	Значение параметра $\mu_\psi$						
	20	25	30	35	40	45	50
0,2	С	С	С	С	С	К	К
0,3	С	С	С	С	К	К	К
0,4	С	С	С	С	К	К	К
0,5	С	С	С	С	К	К	К
0,6	С	С	С	С	К	К	К
0,7	С	С	С	С	К	К	К
0,8	Т	Т	Т	Т	Э	Э	Э
0,9	Т	Т	Т	Т	Т	Т	Э
1	Т	Т	Т	Т	Т	Т	Т
1,1	Т	Т	Т	Т	Т	Т	Т

Полученные в табл. 4.9 результаты можно использовать на практике для определения наиболее приоритетного направления затрат ресурсов на основании известных численных параметров спроса. Для выбранного направления с использованием формулы (4.28) определяется численное значение доли ресурсов, значения долей ресурсов по остальным направлениям устойчивого развития железных дорог принимаются на минимально допустимом уровне.

#### 4.4 Оценка синергетического эффекта от внедрения мероприятий по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и организации процесса их устойчивого развития

Предлагаемая в рамках данной диссертационной работы методика повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог и обеспечения их устойчивого развития включает оптимизационные мероприятия по организации работы железной дороги: оптимальное распределение местной грузовой работы по транспортной сети с учетом наличия транзитных грузопотоков, а также определение оптимального количества средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ грузовых станций. Эффективность этих оптимизационных мероприятий оценивается по направлениям разработки совершенствующих технологий, снижения вредного воздействия на окружающую среду и повышения качества обслуживания клиентуры.

Численная оценка эффективности по указанным направлениям в абсолютных значениях осуществляется на основании предложенных формул (2.2), (2.3) и (2.7) при расчете показателей  $E_{\text{тех}}$ ,  $E_{\text{ЭК}}$  и  $E_{\text{К}}$ , характеризующих устойчивое развитие. Однако реализация мероприятий по каждому из выделенных направлений требует затрат ресурсов, за счет реализации которых может быть получен эффект. Если аппроксимировать зависимость эффективности затрат ресурсов от величины выделенных ресурсов линейно, то для численной оценки эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог в относительных единицах целесообразно использовать соответствующие функции эластичности затрат ресурсов  $\varepsilon_{\text{тех}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ЭК}}$ , и  $\varepsilon_{\text{К}}$ . Относительные показатели функционирования являются более информативными для оценки эффективности, поскольку характеризуют внутренние свойства без привязки к внешнему фактору величины затрат ресурсов.

Эмерджентность железной дороги обеспечивается за счет оптимального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития, за счет

чего гарантируется наиболее эффективный вариант функционирования. Критерий эффективности (2.12), используемый при решении задачи оптимального распределения ресурсов, оценивается на основании значений функций эластичности, поэтому может рассматриваться как интегральный показатель для оценки эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог.

Численно эффект  $E_c$  от внедрения мероприятий по обеспечению устойчивого развития железной дороги определяется как разница оптимального значения критерия эффективности (2.12) и его значения для равномерного распределения ресурсов по выделенным направлениям устойчивого развития:

$$E_c = F_{\text{ц}}^{\text{opt}} - F'_{\text{ц}}, \quad (4.44)$$

где  $F_{\text{ц}}^{\text{opt}}$  – значение критерия эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог для оптимального варианта распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития;

$F'_{\text{ц}}$  – значение критерия эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог при равномерном распределении ресурсов по направлениям устойчивого развития.

Эффект, оцениваемый на основании зависимости (4.44), является синергетическим, поскольку позволяет численно оценить свойства железной дороги – способность развиваться по соответствующим направлениям за счет модернизации производственной базы с учетом наличия социальной составляющей функционирования [137]. Оцениваемые свойства являются эмерджентными, поскольку не характерны для отдельных элементов (грузовых станций, железнодорожных перегонов) и могут проявляться только при рассмотрении объекта на уровне системы.

Критерий эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог для оптимального варианта распределения ресурсов определяется

на основании значений функций эластичности и оптимальных значений долей ресурсов по направлениям устойчивого развития:

$$F_{ц}^{opt} = \hat{\delta}_{тех} \cdot \varepsilon_{тех} + \hat{\delta}_{эк} \cdot \varepsilon_{эк} + \hat{\delta}_{соц} \cdot \varepsilon_{соц} + \hat{\delta}_{к} \cdot \varepsilon_{к}, \quad (4.45)$$

где  $\hat{\delta}_{тех}$ ,  $\hat{\delta}_{эк}$ ,  $\hat{\delta}_{соц}$ ,  $\hat{\delta}_{к}$  – оптимальные значения долей ресурсов по направлениям внедрения совершенствующих технологий, снижения вредного воздействия на окружающую среду, обеспечения социальной составляющей функционирования и повышения качества обслуживания клиентуры соответственно.

При равномерном распределении ресурсов значения  $\delta_i$  равны по 0,25. Критерий эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог в этом случае определяется следующим образом:

$$F'_{ц} = 0,25 \cdot (\varepsilon_{тех} + \varepsilon_{эк} + \varepsilon_{соц} + \varepsilon_{к}). \quad (4.46)$$

С учетом того, что  $\varepsilon_{соц} = 1$  по определению, формула для расчета синергетического эффекта может быть представлена в виде:

$$E_c = (\hat{\delta}_{тех} - 0,25) \cdot \varepsilon_{тех} + (\hat{\delta}_{эк} - 0,25) \cdot \varepsilon_{эк} + \hat{\delta}_{соц} + (\hat{\delta}_{к} - 0,25) \cdot \varepsilon_{к} - 0,25. \quad (4.47)$$

Численное значение величины синергетического эффекта определяется не только внутренними свойствами железной дороги, но и внешними параметрами – параметрами спроса на транспортные средства. Поскольку значения функций эластичности затрат ресурсов зависят от параметров спроса, то синергетический эффект функционирования железной дороги также зависит от значений этих параметров. С учетом функциональных зависимостей (4.16), полученных на основании результатов моделирования Приднепровской железной дороги, зависимость синергетического эффекта от параметров спроса может быть представлена следующим образом:

$$E_c = (\hat{\delta}_{\text{тех}} - 0,25) \cdot \mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043} + (0,37 \cdot \hat{\delta}_{\text{эк}} + 0,054 \cdot \hat{\delta}_{\text{к}} - 0,099) \cdot \mu_{\zeta} + \\ + (0,206 \cdot \hat{\delta}_{\text{эк}} + 0,268 \cdot \hat{\delta}_{\text{к}} - 0,119) \cdot \ln \mu_{\psi} + (\hat{\delta}_{\text{соц}} - 0,25). \quad (4.48)$$

Для известных приоритетных направлений затрат ресурсов при минимально допустимых значениях  $\delta_{\text{тех}}^{\min} = \delta_{\text{эк}}^{\min} = \delta_{\text{соц}}^{\min} = \delta_{\text{к}}^{\min} = 0,1$  зависимости величины синергетического эффекта от параметров спроса принимают вид:

- величина синергетического эффекта  $E_c^T$  при приоритетном направлении затрат ресурсов в развитие совершенствующих технологий:

$$E_c^T = 0,45 \cdot \mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043} - 0,057 \cdot \mu_{\zeta} - 0,072 \cdot \ln \mu_{\psi} - 0,15; \quad (4.49)$$

- величина синергетического эффекта  $E_c^{\exists}$  при приоритетном направлении затрат ресурсов в снижение вредного воздействия на окружающую среду:

$$E_c^{\exists} = -0,15 \cdot \mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043} + 0,165 \cdot \mu_{\zeta} + 0,052 \cdot \ln \mu_{\psi} - 0,15; \quad (4.50)$$

- величина синергетического эффекта  $E_c^C$  при приоритетном направлении затрат ресурсов в обеспечение социальной составляющей функционирования:

$$E_c^C = -0,15 \cdot \mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043} - 0,057 \cdot \mu_{\zeta} - 0,072 \cdot \ln \mu_{\psi} + 0,45; \quad (4.51)$$

- величина синергетического эффекта  $E_c^K$  при приоритетном направлении затрат ресурсов в повышение качества обслуживания клиентуры:

$$E_c^K = -0,15 \cdot \mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043} - 0,024 \cdot \mu_{\zeta} + 0,089 \cdot \ln \mu_{\psi} - 0,15. \quad (4.52)$$

Численные результаты оценки величины синергетического эффекта в зависимости от характеристик спроса на транспортные средства, полученные

на основании моделирования Приднепровской железной дороги, представлены на рис. 4.8.

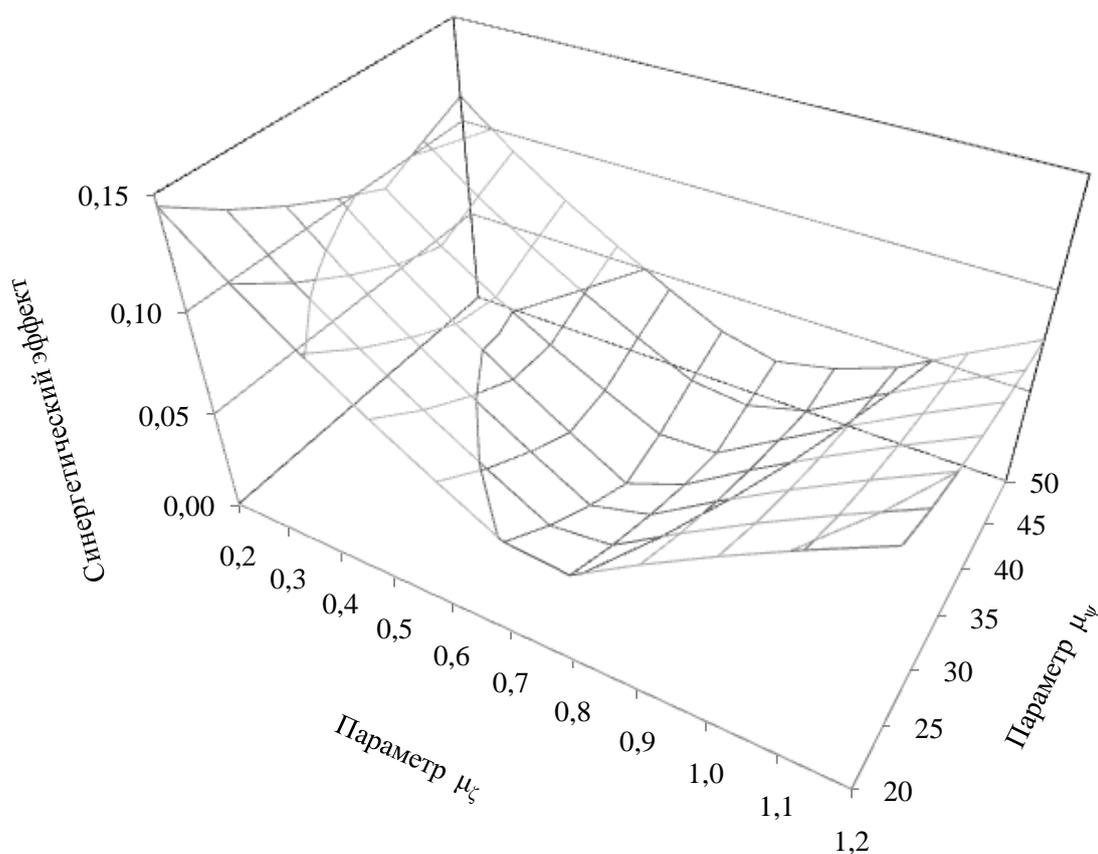


Рисунок 4.8 – Зависимость относительного показателя синергетического эффекта от параметров спроса на транспортные средства (на примере Приднепровской железной дороги)

Представленные на рис. 4.8 результаты позволяют сделать вывод, что зависимость величины синергетического эффекта от параметров спроса на транспортные средства имеет выраженный нелинейный характер, кроме того – существует экстремум, в котором величина эффекта минимальна. Наименьшее значение синергетического эффекта характерно для значений математического ожидания интенсивности движения в 0,7 ед./ч при среднем значении количества вагонов в составе грузового поезда в 35 ед. Максимальное значение синергетического эффекта от внедрения мероприятий по организации процесса устойчивого развития наблюдается для минимальных зна-

чений параметров спроса из рассмотренного в данной работе диапазона значений: при  $\mu_\zeta = 0,2$  ед./ч и  $\mu_\psi = 20$  ед.

Регрессионный анализ результатов оценки численных значений синергетического эффекта (рис. Б.22–Б.25 приложения Б) позволил получить следующую эмпирическую зависимость эффекта от параметров спроса на транспортные средства:

$$E_c = \frac{1}{\mu_\zeta^{0,351} \cdot \mu_\psi^{0,880}}. \quad (4.53)$$

Регрессионная модель (4.53) характеризуется значением коэффициента детерминации в 0,963, что свидетельствует о ее высокой точности. Данная модель может использоваться для первичной (без моделирования и расчета значений функций эластичности) оценки величины синергетического эффекта от реализации мероприятий по обеспечению устойчивого развития железных дорог.

#### Выводы по четвертому разделу

1. Полученные по результатам регрессионного анализа зависимости функций эластичности затрат ресурсов от параметров спроса являются основой для решения задачи оптимизации распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития железных дорог. Использование полученных регрессионных моделей для оценки коэффициентов при определении критерия эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог позволяет учесть параметры стохастического спроса на транспортные средства при формировании стратегии их устойчивого развития.

2. Полученные регрессионные модели зависимости функций эластичности затрат ресурсов по направлениям устойчивого развития от параметров спроса на транспортные средства описывают результаты эксперимента лучше, чем простейшая модель среднего арифметического, поэтому данные мо-

дели имеют информационную ценность. Результаты проведенного анализа также позволяют утверждать, что регрессионные модели адекватно описывают экспериментальные результаты, то есть полученные на основании моделей результаты по точности не уступают экспериментальным.

3. Численный анализ процессов функционирования железнодорожных станций показал, что для наиболее эффективного варианта эксплуатации транспортных средств железных дорог с позиций их устойчивого развития наибольшее значение доли затрат ресурсов соответствует тому направлению устойчивого развития, для которого значение функции эластичности является максимальным по отношению к значениям функции эластичности для других направлений. Полученные на примере Приднепровской железной дороги результаты можно использовать на практике для определения наиболее приоритетного направления затрат ресурсов на основании известных численных параметров спроса.

4. Эффект от внедрения мероприятий по организации процесса устойчивого развития железной дороги является синергетическим, поскольку позволяет численно оценить свойства железных дорог – способность развиваться по соответствующим направлениям за счет модернизации производственной базы с учетом наличия социальной составляющей функционирования. Результаты, полученные на основании программной модели Приднепровской железной дороги, позволяют сделать вывод, что зависимость величины синергетического эффекта от параметров спроса имеет выраженный нелинейный характер. Наименьшее значение синергетического эффекта характерно для значений математического ожидания интенсивности движения в 0,7 ед./ч при среднем значении количества вагонов в составе грузового поезда в 35 ед., а максимальное значение эффекта наблюдается для минимальных значений параметров спроса из рассмотренного диапазона (при средней интенсивности движения в 0,2 ед./ч и размере грузового состава в 20 вагонов в среднем).

## ВЫВОДЫ

В данной диссертационной работе представлены полученные автором результаты, которые позволили решить научно-техническую задачу по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог за счет рационального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития.

1. Проведенный анализ разработок в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств позволил сделать вывод, что существующие модели могут использоваться при оптимизации использования ресурсов, учете экологической составляющей технологических процессов использования средств железных дорог, однако существующие работы не содержат моделей, позволяющих предложить мероприятия, которые учитывают основные требования к устойчивому развитию в комплексе. Выполненный анализ позволил также выделить в качестве основных направлений повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог внедрение технологий, которые совершенствуют технологические процессы, комплексную оценку экологической составляющей, а также учет социальной составляющей процессов функционирования железных дорог.

2. Предложенная система показателей позволяет оценить эффективность эксплуатации транспортных средств железных дорог по основным направлениям устойчивого развития – внедрения технологий, которые совершенствуют технологические процессы, снижения влияния техногенной системы на окружающую среду, обеспечения социальной составляющей развития, а также повышения качества обслуживания клиентуры. Составляющими предложенного интегрального показателя устойчивого развития является совокупность констант, определяющих экономические параметры эксплуатации транспортных средств, и совокупность показателей, характеризую-

ющих результат совершенствования технико-технологической эксплуатации транспортных средств железных дорог.

3. Предложенная модель функционирования железнодорожной станции позволяет структурировать железнодорожную станцию как сложную систему. На базе разработанной модели функционирования железнодорожной станции на макроуровне решаются задача оптимального использования средств транспорта между станциями, а также сетевая задача повышения эффективности эксплуатации транспортных средств за счет определения оптимального варианта распределения вагонопотоков по транспортной сети. Разработанная модель функционирования грузовой технической станций позволяет решать задачу определения оптимального количества средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ станции.

4. Разработанная имитационная модель функционирования железнодорожных станций и ее программная реализация, содержащая функции оптимизации распределения транспортных средств по станциям, расчета оптимального количества средств транспортных и погрузо-разгрузочных работ станций, а также оптимального распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития, позволяет учесть недетерминированность параметров спроса на транспортные средства. Программная реализация имитационной модели для железнодорожных станций Приднепровской железной дороги использована в качестве базы для проведения экспериментальных исследований в области повышения эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог за счет обеспечения их устойчивого развития.

5. Результаты проведенного имитационного моделирования показали, что значения функции эластичности затрат ресурсов на совершенствование технологий имеет гамма-распределение, а распределение случайных величин эластичности затрат ресурсов по направлениям повышения экологической безопасности и качества обслуживания имеют нормальное распределение. Численные результаты имитационного моделирования использованы в качестве данных для определения функциональных зависимостей показателей

эластичности затрат ресурсов от параметров спроса на транспортные средства.

6. Полученные по результатам регрессионного анализа зависимости функций эластичности затрат ресурсов от параметров спроса являются основой для решения задачи оптимизации распределения ресурсов по направлениям устойчивого развития. Использование полученных регрессионных моделей для оценки коэффициентов при определении критерия эффективности эксплуатации транспортных средств позволяет учесть параметры стохастического спроса на транспортные средства при формировании стратегии устойчивого развития.

7. Решив задачу оптимального распределения ресурсов для различных сочетаний значений параметров спроса на транспортные средства ( $\mu_\zeta$  и  $\mu_\psi$ ) было установлено, что для наиболее эффективного варианта эксплуатации транспортных средств железных дорог наибольшее значение доли затрат ресурсов соответствует тому направлению устойчивого развития, для которого значение функции эластичности затрат ресурсов является максимальным по отношению к значениям функции эластичности для других направлений. Полученные результаты целесообразно использовать на практике для определения наиболее приоритетного направления затрат ресурсов на основании известных численных параметров спроса на транспортные средства.

8. Результаты оценки синергетического эффекта от внедрения мероприятий по повышению эффективности эксплуатации транспортных средств железных дорог, полученные на основании программной модели, позволяют сделать вывод, что зависимость величины синергетического эффекта от параметров спроса на транспортные средства имеет выраженный нелинейный характер. Наименьшее значение синергетического эффекта характерно для значений математического ожидания интенсивности движения в 0,7 ед./ч при среднем значении количества вагонов в составе грузового поезда в 35 ед., а максимальное значение эффекта наблюдается для минимальных значений

параметров спроса из рассмотренного диапазона (при средней интенсивности движения в 0,2 ед./ч и размере грузового состава в 20 вагонов в среднем).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Приходько В.И. Теоретические основы структурного моделирования на основе ориентированного графа локальных связей / В.И. Приходько, С.В. Мямлин, О.И. Харченко // *Залізничний транспорт України*. – 2007. – № 5. – С. 46-49.
2. Харченко О.И. Математическое моделирование работы дирекции железнодорожных перевозок / О.И. Харченко // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2007. – Вип.19. – С.138-144.
3. Босов А.А. Математичне моделювання раціонального використання ресурсів залізничної станції (Повідомлення 1) / А.А. Босов, К.У. Єлісеєнко, О.І. Харченко // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2009. – Вип.27. – С. 205-209.
4. Харченко О.И. Теоретические основы моделирования технологии доставки грузов / О.И. Харченко // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2011. – Вип.37. – С. 55-58.
5. Харченко О.И. Исследование подходов к повышению эффективности функционирования подразделений железнодорожного транспорта с позиции устойчивого развития / О.И. Харченко // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. – Д., 2014. – № 4 (52). – С. 52-59.
6. Харченко О.І. Формування системи показників сталого розвитку підрозділів залізничного транспорту / О.І. Харченко // *Залізничний транспорт України*. – 2015. – № 1. – С. 18-21.

7. Харченко О.І. Визначення оптимального розподілу капіталовкладень для забезпечення сталого розвитку залізниць / О.І. Харченко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2015. – № 2 (56). – С. 52-59.
8. А.с. Комп'ютерна програма «Імітаційна модель підрозділу залізничного транспорту»: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №60039 від 05.06.2015. / О.І. Харченко.
9. Харченко О.И. Структурное моделирование на железнодорожном транспорте / О.И. Харченко // Проблемы та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології : 4 міжнар. наук.-практич. конф. 26-27 лютого 2008 р.: тези доп. – Київ: ДЕТУТ. – 2008. – С.156-157.
10. Харченко О.І. Структурне моделювання роботи дирекції залізничних перевезень / О.І. Харченко // Проблеми математичного моделювання: між-держ. наук.-метод. конф. 15-16 травня 2008 р.: тези доп. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2008. – С. 160-161.
11. Харченко О.И. Исследование влияния работы железнодорожной станции на атмосферный воздух / О.И. Харченко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 69 міжнар. наук.-практич. конф. 21-22 травня 2009 р.: тези доп. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ. – 2009. – С.103-104.
12. Елисеенко К.В. Определение свойств объекта с помощью классов толерантности / К.В. Елисеенко, О.И. Харченко // Интеграция Украины в международную транспортную систему: II междунар. научно-практ. конф. 27 -28 мая 2010 г.: тезисы докл. – Днепропетровск: ДНУЖТ. – 2010. – С.35-36.
13. Харченко О.И. Теоретические основы моделирования технологии доставки груза / О.И. Харченко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 71 міжнар. наук.-практич. конф. 14-15 квітня 2011 р.: тези доп. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ. – 2011. – С.154-155.

14. Харченко О.І. Математичне моделювання технологічного процесу / О.І. Харченко // Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті: міжнар. наук.-практич. конф. 12-13 травня 2011 р.: тези доп. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ. – 2011. – С.27-28.
15. Харченко О.І. Дослідження підходів до управління підприємствами залізничного транспорту як складної системи / О.І. Харченко // Проблеми економіки транспорту: 7 міжнар. наук.-практич. конф. 24-25 квітня 2014 р.: тези доп. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ. – 2014. – С.151-152.
16. Харченко О.І. Формування системи показників сталого розвитку підприємств залізничного транспорту / О.І. Харченко // Проблеми економіки транспорту: 8 міжнар. наук.-практич. конф. 23-24 квітня 2015 р.: тези доп. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ. – 2015. – С.77-78.
17. Bowersox D.J. Logistical Management / D.J. Bowersox, D.J. Closs, O.K. Helferich. – New York: Macmillan Publishing Company, 1986. – 586 p.
18. Abt S. Systemy logistyczne w gospodarowaniu / S. Abt. – Poznań: Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, 1997. – 212 s.
19. Сток Дж.Р. Стратегическое управление логистикой / Дж.Р. Сток, Д.М. Ламберт. – Москва: ИНФРА-М, 2005. – 797 с.
20. Кальченко А.Г. Логістика / А.Г. Кальченко. – Київ: КНЕУ, 2004. – 284 с.
21. Задачи управления сложными системами [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://de.ifmo.ru/bk\\_netra/page.php?dir=4&tutindex=20&index=4&layer=1](http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?dir=4&tutindex=20&index=4&layer=1).
22. Снапелев Ю.М. Моделирование и управление в сложных системах / Ю.М. Снапелев, В.А. Старосельский. – М.: Советское радио, 1974. – 264 с.
23. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза / А.А. Колесников. – М., 2012. – 240 с.
24. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / А.Г. Ивахненко. – К.: Техніка, 1975. – 312 с.

25. Вошинин А.П. Оптимизация в условиях неопределённости / А.П. Вошинин, Г.Р. Сотиров. – Минск: Техника (НРБ), 1989. – 224 с.
26. Принципы управления сложными системами [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vvy.me/gosi/toau/46.html>.
27. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений / И.Г. Черноруцкий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
28. Рефлексивное управление: концепции, подходы и область применения [Электронный ресурс] / А.А. Корох. – Режим доступа: [http://nsuem.ru/science/publications/science\\_notes/issue.php?ELEMENT\\_ID=1021](http://nsuem.ru/science/publications/science_notes/issue.php?ELEMENT_ID=1021).
29. Дилтс Р. Моделирование с помощью НЛП / Р. Дилтс. – СПб.: Питер, 2001. – 288 с.
30. Леоненков А.В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
31. Аверкин А.Н. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун и др. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
32. Кофман А. Введение в теорию нечётких множеств / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
33. Зайченко Ю.П. Исследование операций: нечёткая оптимизация / Ю.П. Зайченко. – К.: Высш. шк., 1991. – 191 с.
34. Усков А.А. Принципы построения систем управления с нечеткой логикой / Усков А.А. // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2004. – Вып. 6. – С. 7–13.
35. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>
36. Гранберг А.Г. Стратегия и проблемы устойчивого развития России в XXI веке / А.Г. Гранберг, В.И. Данилов-Данильян, М.М. Циканов и др. – М.: Экономика, 2002. – 414 с.

37. Большаков Б.Е. Приложение к учебно-методическому комплексу «Теория и методология проектирования устойчивого развития социо-природных систем» / Б.Е. Большаков, С.А. Рябкова. – 2009. – 210 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.yrazvitie.ru/wp-content/uploads/2010/03/Volshakov\\_Ryabkova\\_Ponyatie-Yst\\_Razvitiie.pdf](http://www.yrazvitie.ru/wp-content/uploads/2010/03/Volshakov_Ryabkova_Ponyatie-Yst_Razvitiie.pdf).
38. Бегун Т.В. Устойчивое развитие: определение, концепция и факторы в контексте моногородов / Т.В. Бегун // Экономика, управление, финансы: материалы II междунар. науч. конф. (г. Пермь, декабрь 2012 г.). – Пермь: Меркурий, 2012. – С. 158–163.
39. Косов Ю.В. Генезис концепции устойчивого развития / Ю.В. Косов // Экология и образование. – 2002. – Вып. 1-2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.slon-party.ru/reading/polit\\_libr/bibl-kosov\\_eco.html](http://www.slon-party.ru/reading/polit_libr/bibl-kosov_eco.html).
40. Бобылев С.Н. Индикаторы устойчивого развития: региональное измерение. Пособие по региональной экологической политике / С.Н. Бобылев. – М.: Акрополь, 2007. – 60 с.
41. Островский Н.В. Критерии устойчивого развития: муниципальные аспекты / Н.В. Островский [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://n-t.ru/tp/ns/kur.htm>.
42. Тарасова Н.П. Индексы и индикаторы устойчивого развития / Н.П. Тарасова, Е.Б. Кручинина [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.mnr.gov.ru/files/part/8048](http://www.mnr.gov.ru/files/part/8048).
43. Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodology. – N.Y.: United Nations, 1996. – 428 p.
44. Кузнецов О.Л. Устойчивое развитие: научные основы проектирования в системе «природа – общество – человек» / О.Л. Кузнецов, Б.Е. Большаков. – СПб.: Гуманистика, 2002. – 616 с.
45. Бобровский В.И. Технично-економичеcкое управление железнодорожными станциями на основе эргатических моделей [Текст] / В.И. Бобровский, Д.Н. Козаченко, Р.В. Вернигнора // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. - №6. – с.17-21

46. Бобровский В.И. Эргатические модели железнодорожных станций [Текст] / В.И. Бобровский, Д.Н. Козаченко, Р.В. Вернигнора // Зб.наук. праць КУЕТТ: Серія «Транспортні системи і технології», -2004. – Вип. 5. – К.: КУ-ЕТТ, 2004. – с. 80-86.

47. Бутько Т.В. Формування логістичної технології просування вантажо-потоків за жорсткими нитками графіка руху поїздів [Текст] / Т.В. Бутько, Д.В. Ломотько, А.В. Прохорченко, К.О. Олійник // Зб. наук. праць. УкрДАЗТ, – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 111

48. Данько М.І. Використання методу експертних оцінок для визначення якості транспортного обслуговування на вантажоутворювальному полігоні [Текст] / М.І. Данько, О.В. Кизин // Удосконалення вантажної і комерційної роботи на залізницях України. Зб.наук. пр. вип.62. – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – С.75-82.

49. Данько М.І. До питань підвищення ефективності перевезення вантажів [Текст] / М.І. Данько, А.О. Поляков, О.М. Ходаківський // Зб. наук. праць. УкрДАЗТ, – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – Вип. 57 – с. 72-78

50. Жуковицький І.В. Принципи побудови системи підтримки прийняття рішень і управління вантажними перевезеннями на основі аналітичних серверів АСК ВП УЗ [Текст] / І.В. Жуковицький, В.В. Скалозуб, А.Б. Устинко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. - №17 – с. 28-34

51. Котенко А. М. Удосконалення технології та підвищення ефективності перевезення вантажів в універсальних контейнерах [Текст] / А. М. Котенко В. І. Шевченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1999. - №5. - С. 75-81.

52. Котенко А.М. Тенденції удосконалення технології та технічних засобів на перевантажувальних станціях [Текст] / Котенко А.М., В. І. Шевченко, В. І. Петров, // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2006. - №1. – С. 33-35.

53. Яновський П.О. Перспективні напрямки удосконалення технологій перевезень [Текст] / П.О. Яновський // Залізничний транспорт України №4. – 2009. – с. 35-39
54. Яновський П.О. Результати аналізу існуючого стану та пропозиції з перспективи розвитку і розміщення на мережі залізниць сортувальних станцій для забезпечення прогнозних обсягів перевезень до 2020 року [Текст] / П.О. Яновський, А.А. Акуленко // Залізничний транспорт України. – 2010. – №1. – С. 28-31.
55. Карієва Я.К. Організаційні форми взаємодії різних видів транспорту у вузлах передачі вантажів / Я.К. Карієва, Е.А. Камалова // Логістика: теорія і практика. – 2012. – Вип. 1(2). – С. 56–60.
56. Мурадьян А.О. Динамические резервы железнодорожной подсистемы взаимодействия / А.О. Мурадьян // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем. – 2012. – Вип. 19. – С. 184–199.
57. Новиков П.А. Организация эффективного взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в припортовых транспортных узлах: автореф. дисс. канд. техн. наук, 05.22.08 – управление процессами перевозок. – Екатеринбург: УрГУПС, 2008. – 25 с.
58. Маслов А.М. Техничко-технологические параметры функционирования грузовых станций железнодорожного транспорта в условиях стохастического характера вагонопотока: автореф. дисс. канд. техн. наук, 05.22.08 – управление процессами перевозок. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 23 с.
59. Кочнева Д.И. Повышение эффективности функционирования региональной контейнерной транспортно-логистической системы: автореф. дисс. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 26 с.
60. Тушин Н.А. Системная интеграция в транспортных процессах (теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации): автореф.

дисс. докт. техн. наук, 05.22.08 – управление процессами перевозок. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 43 с.

61. Алексеев И.В. Совершенствование организации взаимодействия различных видов транспорта в транспортных узлах: автореф. дисс. канд. техн. наук, 05.22.19 – эксплуатация водного транспорта, судовождение. – Владивосток: ИПК МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2008. – 19 с.

62. Кулешов А.В. Удосконалення функціонування автоматизованої системи «Месплан» з метою прогнозування обсягів перевезень / А.В. Кулешов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Вып. 4/4(46). – С. 9–12.

63. Мирошник А.С. Логистические принципы построения и функционирования терминальной системы: автореф. дисс. канд. техн. наук, 08.00.05 – экономика и управление народным хозяйством. – Ростов-на-Дону: Ростовский гос. строит. ун-т, 2010. – 22 с.

64. Александров А.Э. Расчет и оптимизация транспортных систем с использованием моделей (теоретические основы, методология): автореф. дисс. докт. техн. наук, 05.22.08 – управление процессами перевозок. – Екатеринбург: УрГУПС, 2008. – 50 с.

65. Ломотько Д.В. Формування транспортного процесу залізниць України на базі логістичних принципів: автореф. дис. докт. техн. наук. 05.22.01 – транспортні системи. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – 39 с.

66. Запара Я.В. Формалізація технології роботи залізничних вузлів в умовах зміни обсягів перевезень / Я.В. Запара // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2010. – Вип. 119. – С. 53–59.

67. Ломотько Д.В. Удосконалення розвитку елементів транспортних систем залізничних вузлів на базі єдиної системи управління парком вантажних вагонів при змішаних перевезеннях / Д.В. Ломотько, В.В. Кулешов, А.В. Кулешов // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2011. – Вип. 122. – С. 22–26.

68. Фридрихсон О.В. Формирование транспортно-логистической контейнерной системы доставки продукции металлургического предприятия: авто-

реф. дисс. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 19 с.

69. Бутько Т.В. Удосконалення сумісної роботи портів та залізничних вузлів в умовах зростання вантажопотоків / Т.В. Бутько, Т.В. Головка // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2006. – Вип. 8. – С. 5–13.

70. Окорочков А.М. Удосконалення управління транспортними вантажними комплексами в транспортних вузлах: автореф. дис. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортні системи. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. – 21 с.

71. Нагорний Є.В. Модель логістичної системи доставки вантажів між Україною та Білоруссю / Є.В. Нагорний, В.С. Наумов, А.В. Іванченко // Транспортні системи та технології перевезень. – 2012. – Вип. 4. – С. 70–74.

72. Наумов В.С. Основы повышения эффективности экспедиционного обслуживания на автомобильном транспорте: Монография / В.С. Наумов. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – 144 с.

73. Наумов В.С. Транспортно-экспедиционное обслуживание в логистических системах: Монография / В.С. Наумов. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – 220 с.

74. Панова Н.В. Повышение эффективности работы структурных подразделений железнодорожного транспорта на основе совершенствования системы экономических нормативов на предприятиях железной дороги: дисс. канд. экон. наук, 08.00.05 – экономика и управление народным хозяйством. – Новосибирск: СГУПС, 2001. – 169 с.

75. Анчугин А.А. Совершенствование системы управления экономической деятельностью железнодорожного транспорта в условиях реформы: дисс. канд. экон. наук, 08.00.05 – экономика и управление народным хозяйством. – Иркутск: ИрГУПС, 2004. – 204 с.

76. Жаркова Н.Ю. Планирование развития структурного подразделения железной дороги (дистанции): автореф. дисс. канд. экон. наук, 08.00.05 –

экономика и управление народным хозяйством. – Н. Новгород: ИУнТГУУ, 2003. – 23 с.

77. Родионов Е.Т. Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта на основе разработки новых технологий управления ресурсами предприятий: дисс. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте. – Новосибирск: СГУПС, 2005. – 132 с.

78. Рязанов А.Ю. Методическое обеспечение управления бизнес-процессами в организациях железнодорожного транспорта: дисс. канд. экон. наук, 08.00.05 – экономика и управление народным хозяйством. – Новосибирск: САФиБД, 2011. – 133 с.

79. Куделя В.І. Шляхи підвищення ефективності роботи залізничного транспорту в умовах ринкової економіки: дис. канд. экон. наук, 08.07.04 – економіка транспорту і зв'язку. – Харків: УкрДАЗТ, 2006. – 379 с.

80. Тітов М.Ф. Підвищення ефективності функціонування технічних прикордонних передавальних станцій залізниць України: автореф. дис. канд. техн. наук, 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 1999. – 22 с.

81. Полішко Т.В. Управління витратами підприємств залізничного транспорту: автореф. дис. канд. экон. наук, 08.02.03 – організація управління, планування та регулювання економікою. – Харків: ХНУ, 2004. – 24 с.

82. Сергієнко М.М. Системно-ситуаційне управління витратами локомотивного господарства залізничного транспорту: автореф. дис. канд. экон. наук, 08.07.04 – економіка транспорту і зв'язку. – Київ: КУЕТТ, 2006. – 22 с.

83. Тимоха Д.А. Державне регулювання роботі залізничного транспорту: автореф. дис. канд. экон. наук, 25.00.02 – механізми державного управління. – Харків: НАДУ, 2007 – 21 с.

84. Пасічник В.І. Економічна стратегія розвитку експлуатаційної діяльності залізничного транспорту: автореф. дис. докт. экон. наук, 08.07.04 – економіка транспорту і зв'язку. – Київ: НАУ, 2004. – 25 с.

85. Мозолеви́ч, Г.Я. Задача рационального распределения потоков поездов по железнодорожному полигону, который принадлежит нескольким собственникам. / Г. Я. Мозолеви́ч // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. Научно-технический журнал № 2 (23) – Ростов-на-Дону. – 2013. – С. 60-65.

86. Березовий М.І. Підвищення ефективності роботи залізничних станцій шляхом удосконалення спеціалізації сортувальних колій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеню канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» [Текст] / М.І. Березовий – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2010. – 24 с.

87. Козаченко Д.М. Оптимізація розподілу сортувальних колій між призначенням поїздів у вузлі [Текст] / Д.М. Козаченко, М.І. Березовий, Р.Г. Коробйова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім.академіка В.Лазаряна. – Вип. 22 – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008., с. 52-55.

88. Коробйова Р.Г. Підвищення ефективності експлуатації технічних засобів залізничних вузлів при переробці місцевих вагонопотоків: автореф. дис. на здобуття наук. ступеню канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» [Текст] / Р.Г. Коробйова – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2009. – 24 с.

89. Мацюк В.І Особливості вузлової маршрутизації [Текст] / В.І. Мацюк // Вісник ДУІКТ: Зб. наук. праць. – К., 2006. –№ 4 (том 4) . –С. 334–339.

90. Мацюк В.І. Дослідження вхідних потоків [Текст] /В.І. Мацюк // Вісник ДУІКТ: Зб. наук. праць. – К., 2007. – Т. 5. №1. – С. 90-94.

91. Мацюк В.І. Моделювання виробничих процесів на залізничному транспорті [Текст] / В.І. Мацюк // Защита информации: Сб. научн. трудов.– К., 2006. – С. 116–119.

92. Мацюк В.І. Моделювання обміну ресурсів рухомого складу [Текст] / В.І. Мацюк // Вісник ДУІКТ: Зб. наук. праць. – К., 2006. – Т. 4. №3. – С. 215-222.

93. Мацюк В.І. Удосконалення системи розвозу місцевих вагонів в залізничному вузлі: автореф. дис. на здобуття наук. ступеню канд. техн. наук: спец. 05.22.01 «Транспортні системи» [Текст] / В.І. Мацюк – Київ: ДЕТУТ, 2008. – 26 с.

94. Чеховська М.М. Організаційно-економічний механізм удосконалення природоохоронної діяльності на залізничному транспорті України: автореф. дис. канд. екон. наук, 08.08.01 – економіка природокористування і охорони навколишнього середовища. – Київ: НАН України, 2003. – 22 с.

95. Антонюк У.В. Правове забезпечення екологічної безпеки у діяльності залізничного транспорту: автореф. дис. канд. юрид. наук, 12.00.06 – земельне право; аграрне право; екологічне право; природоресурсне право. – Київ: НУ-БіПУ, 2009. – 26 с.

96. Пономарев В.Н. Методы и средства повышения безопасности и устойчивости функционирования железнодорожного транспорта в чрезвычайных ситуациях: дис. докт. техн. наук, 05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях. – Москва: МГУПС(МИИТ), 2011. – 416 с.

97. Кузина Е.Л. Управление развитием системы природопользования на железнодорожном транспорте для обеспечения эколого-экономической безопасности урбанизированных территорий: дис. докт. экон. наук, 08.00.05 – экономика и управление народным хозяйством. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2012. – 353 с.

98. Машуков А.А. Анализ воздействий предприятий железнодорожного транспорта на окружающую среду: дис. канд. техн. наук, 03.00.16 – экология. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 25 с.

99. Родкевич О.Г. Закономірності та використання факторів ефективності системи перевезення небезпечних вантажів: автореф. дис. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортні системи. – Київ: ДЕТУТ, 2013. – 25 с.

100. Каньовська Д.В. Формування автоматизованої технології управління місцевою роботою на основі використання автономних модульних поїздів:

автореф. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортні системи. – Харків: УДАЗТ, 2013 – 21 с.

101. Головка Т.В. Формування автоматизованої технології управління процесом просування вагонопотоків в напрямку поромного комплексу: автореф. дис. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортні системи. – Харків: УДАЗТ, 2013. – 21 с.

102. Рибальченко Л.І. Удосконалення технології розвезення порожнього вагонопотоку на основі використання гібридних інтелектуальних систем: автореф. дис. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортні системи. – Харків: УДАЗТ, 2013. – 21 с.

103. Нагорний Є.В. Аналіз теоретичних підходів до вдосконалення логістичного управління в транспортних вузлах / Є.В. Нагорний, В.С. Наумов, Т.О. Омельченко, Я.В. Литвинова // Восточно-Европ. журнал передових технологій. – 2013. – Вып. 4/4(64). – С. 61–64.

104. Бараш Ю.С. Роль залізничного транспорту України в забезпеченні сталого розвитку суспільства / Ю.С. Бараш, І.П. Корженевич // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2008. – Вип. 24 – С. 201–206.

105. Офіційний сайт Укрзалізниці [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.dt.ua/img/st\\_img/2009/773/09\\_vo\\_send\\_ukr.gif](http://www.dt.ua/img/st_img/2009/773/09_vo_send_ukr.gif).

106. Стасишен М. Проблеми управління інноваційним розвитком залізничного транспорту України [Електронний ресурс] / М. Стасишен, О. Ярмоліцька. – Режим доступу: <http://gisap.eu/ru/node/243>.

107. Лепьохіна І.О. Планування капітальних інвестицій на підприємствах в умовах нестабільного зовнішнього середовища / І.О. Лепьохіна // Інвестиції: практика та досвід. – 2008. – №17. – С. 6–8.

108. Інновації в Україні: пропозиції до політичних заходів. Вересень 2011. // Проект ЄС «Вдосконалення стратегій, політики та регулювання інновацій в Україні». – К.: Фенікс, 2011. – 76 с.

109. Паневчик В.В. Основы энергосбережения / В.В. Паневчик, А.Н. Ковалев, М.В. Самойлов. – Минск: БГЭУ, 2007. – 524 с.
110. Асаенок И.С. Основы экологии и экономика природопользования: Учеб. пособие к практ. занятиям для студ. экон. спец. БГУИР всех форм обуч. / И.С. Асаенок, Т.Ф. Михнюк – Минск.: БГУИР, 2004. – 60 с.
111. Методические рекомендации по учету шумового загрязнения в составе территориальных комплексных схем охраны среды городов. – Ленинград, 1989. – Режим доступа: [http://www.znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie\\_rekomendaciiMeto397.html](http://www.znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie_rekomendaciiMeto397.html).
112. Абрамов А.А. Технология и управление работой железнодорожных участков и направлений: Уч. пос. / А.А. Абрамов. – М.: РГОТУПС, 2004. – 312 с.
113. Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, узлов и станций. – М.: ВПТИТРАНССТРОЙ, 1988. – 468 с.
114. Алексеева Е.В. Построение математических моделей целочисленного линейного программирования. Примеры и задачи: Учеб. пособие / Е.В. Алексеева. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2012. – 132 с.
115. Банди Б. Основы линейного программирования: Пер. с англ. / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
116. Коротков М. Основы линейного программирования [Электронный ресурс] / М. Коротков, М. Гаврилов. – Режим доступа: <http://rain.ifmo.ru/cat/data/theory/unordered/simplex-method-2003/article.pdf>.
117. Таха Х.А. Введение в исследование операций / Х.А. Таха. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 912 с.
118. Верещагин Н.К. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Начала теории множеств / Н.К. Верещагин, А.В. Шень. – 4-е изд., доп. – М.: МЦНМО, 2012. – 112 с.

119. Мухортов В.В. Объектно-ориентированное программирование, анализ и дизайн: Методическое пособие / В.В. Мухортов, В.Ю. Рылов. – Новосибирск, 2002. – 108 с.
120. Шубко В.Г. Железнодорожные станции и узлы / Учебник для вузов / В.Г. Шубко, Н.В. Правдин, Е.В. Архангельский, В.Я. Болотный, В.А. Бураков, СП. Вакуленко, В.А. Персианов.; под. ред. В.Г. Шубко и Н.В. Правдина. – М.: УМК МПС России, 2002. – 368 с.
121. Савченко И.Е. Железнодорожные станции и узлы / Учебник для вузов / И.Е. Савченко, С.В. Земблинов, И.И. Страковский. – М.: Транспорт, 1980. – 479 с.
122. Окорочков А.М. Удосконалення управління транспортними вантажними комплексами в транспортних вузлах / Андрій Михайлович Окорочков: дис. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортні системи. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. – 225 с.
123. Домнин Л.М. Элементы теории графов / Л.М. Домнин. – Пенза: Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2007. – 144 с.
124. Волков И.К. Исследование операций / И.К. Волков, Е.А. Загоруйко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 440 с.
125. Давыдов Э.Г. Исследование операций / Э.Г. Давыдов. – М.: Высш. шк., 1990. – 383 с.
126. Troelsen A. Pro C# 2010 and the .NET 4 Platform / A. Troelsen. – NY: Springer, 2010. – 1749 p.
127. Naumov V. VB.NET for graph modeling [Электронный ресурс] / V. Naumov. – Режим доступа: [https://www.academia.edu/11334436/VB.NET\\_code\\_for\\_graph\\_modeling](https://www.academia.edu/11334436/VB.NET_code_for_graph_modeling).
128. Калиткин Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
129. Naumov V. C# code for finding the root of non-linear equation [Электронный ресурс] / V. Naumov. – Режим доступа: [https://www.academia.edu/11183111/C\\_code\\_for\\_finding\\_the\\_root\\_of\\_non-linear\\_equation](https://www.academia.edu/11183111/C_code_for_finding_the_root_of_non-linear_equation).

130. Naumov V. C# code for the simplex method [Электронный ресурс] / V. Naumov. – Режим доступа: [https://www.academia.edu/11793434/C\\_code\\_for\\_the\\_simplex\\_method](https://www.academia.edu/11793434/C_code_for_the_simplex_method).
131. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
132. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента / В.И. Асатурян. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.
133. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента / В.В. Федоров. – М.: Наука, 1971. – 312 с.
134. Башаринов А.Е. Методы статистического последовательного анализа и их приложения / А.Е. Башаринов, Б.С. Флейшман. – М.: Советское радио, 1962. – 352 с.
135. Вознесенский В.А. Принятие решений по статистическим моделям / В.А. Вознесенский, А.Ф. Ковальчук. – М.: Статистика, 1978. – 192 с.
136. Минько А.А. Принятие решений с помощью Excel / А.А. Минько. – М.: Эксмо, 2007. – 240 с.
137. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир, 1980. – 404 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программной реализации модели функционирования  
железнодорожных станций

```

using System.IO;
using System.Data.OleDb;
using Graph;
using StochasticValues;
using EquationSolve;
using Simplex;

namespace RTS
{
    /// <summary>
    /// Модель железной дороги
    /// </summary>
    class TModel : Graph.Graph
    {
        public Dictionary<Node, int> LocoNum, GearNum;
        public Dictionary<Link, double> LinksLoad;

        public Dictionary<Node, double> EQ, ET;
        public Dictionary<Node, double> TotalTW, TotalTL, TotalTG;

        public Stochastic sI;
        public Stochastic sQ;

        /// <summary>
        /// мощность локомотива, ваг.
        /// </summary>
        private int qw;
        /// <summary>
        /// матожидание продолжительности обслуживания вагона на грузовом фронте, ч
        /// </summary>
        private double mt;
        /// <summary>
        /// матожидание продолжительности обслуживания одного вагона при доставке, ч
        /// </summary>
        private double mw;
        /// <summary>
        /// удельные затраты на простой вагона в загруженном и порожнем состоянии, у.е./ч
        /// </summary>
        private double cwl, cwu;
        /// <summary>
        /// удельная стоимость работы ПРМ, у.е./ч
        /// </summary>
        double смс;
        /// <summary>
        /// средневзвешенные удельные затраты на работу локомотивов при ожидании
        /// прибытия вагонов и перемещение подач вагонов соответственно, у.е./ч
        /// </summary>
        double clc, clv;
        /// <summary>
        /// балансовая стоимость локомотивов и ПРМ, у.е.
        /// </summary>
        double BL, BG;
    }
}

```

```

/// <summary>
/// Конструктор класса ЖД
/// </summary>
/// <param name="dbFile">имя асcdb-файла с информацией о ЖД</param>
public TModel(string dbFile)
{
    LoadFromDB(dbFile);
    this.LocoNum = new Dictionary<Node, int>();
    this.GearNum = new Dictionary<Node, int>();
    this.LinksLoad = new Dictionary<Link, double>();
    loadFacilitiesNum(dbFile);
    this.EQ = new Dictionary<Node, double>();
    this.ET = new Dictionary<Node, double>();
    this.TotalTW = new Dictionary<Node, double>();
    this.TotalTL = new Dictionary<Node, double>();
    this.TotalTG = new Dictionary<Node, double>();
    DefineLinksWeight();
    this.SetFlows(this.sI);
    this.DefineLinksLoad();
}

private void loadFacilitiesNum(string dbFile)
{
    OleDbConnection connection = new
    OleDbConnection(@"Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0; Data Source=" + dbFile);
    OleDbCommand command = connection.CreateCommand();
    connection.Open();
    command.CommandText = "SELECT Code, LN, GN FROM Nodes";
    OleDbDataReader nodesReader = command.ExecuteReader();
    while (nodesReader.Read())
    {
        this.LocoNum[Nodes[Convert.ToInt32(nodesReader["Code"])-1]] =
            Convert.ToInt32(nodesReader["LN"]);
        this.GearNum[Nodes[Convert.ToInt32(nodesReader["Code"])-1]] =
            Convert.ToInt32(nodesReader["GN"]);
    }
    nodesReader.Close();
    connection.Close();
}

/// <summary>
/// Расчет оптимального количества локомотивов станции
/// </summary>
/// <param name="node">ссылка на вершину графа</param>
/// <returns>Оптимальное количество станционных локомотивов</returns>
private int defLocoNum(Node node)
{
    double eq = this.EQ[node], et = this.ET[node];

    // стартовое количество ПРМ
    int gn = 5;

    // коэффициенты уравнения для определения оптимального количества локомотивов
    double k0, k1, k2, k3, k4;
    k0 = 24 * c1c;
    k1 = 60 * (c1v - c1c) * Math.Pow(eq, 0.884) * Math.Pow(et, -0.885);
    k2 = -932 * cw1 * Math.Pow(eq, 2.527) * Math.Pow(et, -1.979);
    k3 = -9.5 * cwu * Math.Pow(eq, 0.978) * Math.Pow(et, -0.865);
    k4 = 14855 * cw1 * Math.Pow(mt, 1.129) * Math.Pow(eq, 2.982)
        * Math.Pow(et, -2.698) * Math.Pow(gn, -2.368);
}

```

```

Solver solver = new Solver();
solver.LowBound = 1;
solver.HighBound = 100;
solver.Accuracy = 0.001;
solver.FuncCoefs = new double[5] {k0, k1, k2, k3, k4 };
solver.VarPows = new double[5] {0, -0.336, -1.429, -1.054, -0.695 };

// количество локомотивов в первом приближении
int ln = (int)solver.Solve();
// уточнение оптимального количества ПРМ
gn = defGearNum(eq, et, ln);
// пересчет коэффициента уравнения
solver.FuncCoefs[4] = 14885 * cw1 * Math.Pow(mt, 1.129) *
    Матη.Πος(εq; , 2.982) * Матη.Πος(ετ, --2.698) *
    Math.Pow(gn, -2.368);
ln = (int)solver.Solve();

return (ln <= 1) ? 1 : ln;
}

/// <summary>
/// Расчет оптимального количества ПРМ
/// </summary>
/// <param name="eq">отношение количества вагонов к мощности локомотива</param>
/// <param name="et">отношение интервала к продолжительности операции </param>
/// <param name="ln">количество станционных локомотивов</param>
/// <returns>Оптимальное количество ПРМ</returns>
private int defGearNum(double eq, double et, int ln)
{
    int gn = (int)(12.36 * Math.Pow(ln, 0.091) * Math.Pow(this.mt, 0.335) *
        Math.Pow(eq, 0.885) * Math.Pow(this.cw1 / this.cmc, 0.297) /
        Math.Pow(et, 0.801));
    return (gn <= 1) ? 1 : gn;
}

/// <summary>
/// Определение суммарного времени обслуживания вагонов на станции
/// </summary>
/// <param name="node">ссылка на вершину графа</param>
/// <returns>суммарное времени обслуживания вагонов для станции node</returns>
private double defTotalTW(Node node)
{
    return 2172 * Math.Pow(EQ[node], 2.527) * Math.Pow(LocoNum[node], -0.429) *
        Math.Pow(ET[node], -1.979) + 104 * Math.Pow(EQ[node], 1.054) *
        Math.Pow(ET[node], -0.961) + 48704 * Math.Pow(LocoNum[node], 0.305) *
        Math.Pow(EQ[node], 2.982) * Math.Pow(this.mt, 1.129) *
        Math.Pow(ET[node], -2.698) *
        Math.Pow(GearNum[node], -2.368)+123*this.mt;
}

/// <summary>
/// Определение суммарного времени работы станционных локомотивов
/// </summary>
/// <param name="node">ссылка на вершину графа</param>
/// <returns>суммарное время работы локомотивов для станции node</returns>
private double defTotalTL(Node node)
{
    double t1 = 90 * Math.Pow(this.LocoNum[node], 0.664) *
        Math.Pow(this.ET[node], -0.885);
    return (t1 < 24 * this.LocoNum[node]) ? 24 * this.LocoNum[node] : t1;
}

```

```

/// <summary>
/// Определение суммарного времени работы ПРМ
/// </summary>
/// <param name="node">ссылка на вершину графа</param>
/// <returns>суммарное время работы ПРМ для станции node</returns>
private double defTotalTG(Node node)
{
    return (123 * this.mt < 24 * this.GearNum[node]) ? 24 * this.GearNum[node] :
        123 * this.mt;
}

/// <summary>
/// Имитация процесса функционирования железной дороги
/// </summary>
public void SimulateNet()
{
    this.SetFlows(this.sI);
    this.DefineLinksLoad();

    foreach (Node node in this.Nodes)
    {
        EQ[node] = this.sQ.getValue() / this.qw;
        ET[node] = 1 / node.InFlowsTotalIntensity / this.mw;
        LocoNum[node] = defLocoNum(node);
        GearNum[node] = defGearNum(EQ[node], ET[node], LocoNum[node]);
        TotalTW[node] = defTotalTW(node);
        TotalTL[node] = defTotalTL(node);
        TotalTG[node] = defTotalTG(node);
    }

    foreach (Link link in this.Links) this.LinksLoad[link] = link.Load;
}

/// <summary>
/// Определение коэффициентов целевой функции для решения задачи устойчивого
/// развития ЖД на основании симплекс-метода
/// </summary>
/// <returns>массив, содержащий коэффициенты целевой функции</returns>
private double[] simplexCoeffs()
{
    double[] sc = new double[4];

    Dictionary<Node, int> bLN = new Dictionary<Node, int>();
    Dictionary<Node, int> bGN = new Dictionary<Node, int>();
    Dictionary<Link, double> bL = new Dictionary<Link, double>();
    Dictionary<Node, double> bTW = new Dictionary<Node, double>();
    Dictionary<Node, double> bTL = new Dictionary<Node, double>();
    Dictionary<Node, double> bTG = new Dictionary<Node, double>();

    int dLN = 0, dGN = 0;
    double dL = 0;
    double dTW = 0, dTL = 0, dTG = 0;

    SimulateNet();

    foreach (Node node in this.Nodes)
    {
        bLN[node] = this.LocoNum[node];
        bGN[node] = this.GearNum[node];
        bTW[node] = this.TotalTW[node];
        bTL[node] = this.TotalTL[node];
        bTG[node] = this.TotalTG[node];
    }
}

```

```

foreach (Link link in this.Links) bL[link] = this.LinksLoad[link];

SimulateNet();

// определение прироста основных характеристик функционирования ЖД
foreach (Node node in this.Nodes)
{
    dLN += bLN[node] - this.LocoNum[node];
    dGN += bGN[node] - this.GearNum[node];
    dTW += bTW[node] - this.TotalTW[node];
    dTL += bTL[node] - this.TotalTL[node];
    dTG += bTG[node] - this.TotalTG[node];
}
foreach (Link link in this.Links)
    dL += (bL[link] - this.LinksLoad[link]) * link.Weight;

// расчет величины затрат ресурсов
double Kres = 0;
if (dLN > 0) Kres += dLN * this.BL;
if (dGN > 0) Kres += dGN * this.BG;

sc[0] = (dTL * this.clv + dTG * this.cmc) / Kres;
sc[1] = 100 * 95 * dL / Kres;
sc[2] = 1;
sc[3] = (dTW * (this.cwl + this.cwu) / 2 +
        100 * 24 * this.qw * dL / 50) / Kres;

return sc;
}

/// <summary>
/// Имитация процесса функционирования ЖД
/// </summary>
/// <returns>значение целевой функции, характеризующей развитие ЖД</returns>
public double SimulateTS()
{
    double[] sc = new double[4];
    while (sc[0] <= 0 || double.IsPositiveInfinity(sc[0])) sc = simplexCoeffs();

    ObjectiveFunction objF = new ObjectiveFunction(sc);
    Constraint c1 = new Constraint(new double[4] { 1, 1, 1, 1 }, 1);
    Constraint c2 = new Constraint(new double[4] { -1, -1, -1, -1 }, -1);
    Constraint c3 = new Constraint(new double[4] { -1, 0, 0, 0 }, -0.1);
    Constraint c4 = new Constraint(new double[4] { 0, -1, 0, 0 }, -0.1);
    Constraint c5 = new Constraint(new double[4] { 0, 0, -1, 0 }, -0.1);
    Constraint c6 = new Constraint(new double[4] { 0, 0, 0, -1 }, -0.1);
    LPP lpp = new LPP(objF, new Constraint[6] { c1, c2, c3, c4, c5, c6 });

    lpp.Solve();

    return lpp.ObjFunc.Value(lpp.Variables);
}

/// <summary>
/// Реализация эксперимента
/// </summary>
public void CalcExper()
{
    double minI = 0.2, maxI = 1.2;
    double minQ = 3, maxQ = 10;
    int step = 3, nExp = 100;

    TextWriter tw = new StreamWriter("res.txt");

```

```

for (double i = minI; i <= maxI; i += (maxI - minI) / step)
  for (double q = minQ; q <= maxQ; q += (maxQ - minQ) / step)
    for (int j = 0; j < nExp; j++)
      {
        this.sI = new Stochastic(dl: 2, scl: i);
        this.sQ = new Stochastic(dl: 1, loc: q, scl: q / 5);
        double[] sc = new double[4];
        while (sc[0] <= 0 || double.IsPositiveInfinity(sc[0]))
          sc = simplexCoeffs();
        tw.WriteLine("{0}\t{1}\t{2}\t{3}\t{4}",
                    i, q, sc[0], sc[1], sc[3]);
      }
    tw.Close();
  }
}
}
}

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Результаты регрессионного анализа

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,805624871
R-квадрат	0,649031433
Нормированный R-квадрат	0,571038418
Стандартная ошибка	0,1787953
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,532049715	0,266024857	8,321661041	0,008988909
Остаток	9	0,287709834	0,031967759		
Итого	11	0,819759549			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	-0,053819852	0,183897628	-0,292662024	0,776415607	-0,469825186	0,362185483
Переменная X 1	0,501066713	0,138494244	3,617960562	0,005589495	0,187770967	0,814362458
Переменная X 2	0,007944365	0,004214246	1,885121602	0,092050636	-0,00158892	0,017477651

Рисунок Б.1 – Проверка гипотезы  $H_1 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_0 + a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,930457064
R-квадрат	0,865750348
Нормированный R-квадрат	0,752325383
Стандартная ошибка	0,149292066
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	4,496530668	2,248265334	77,40683556	2,13558E-06
Остаток	10	0,290447907	0,029044791		
Итого	12	4,786978574			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,47969931	0,112177258	4,276261693	0,001620915	0,229752805	0,729645815
Переменная X 2	0,006955134	0,002399056	2,899112469	0,015857688	0,001609703	0,012300564

Рисунок Б.2 – Проверка гипотезы  $H_2 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,841253476
R-квадрат	<b>0,707707411</b>
Нормированный R-квадрат	0,642753502
Стандартная ошибка	0,241694662
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	1,272953581	0,63647679	10,8955323	0,003946209
Остаток	9	0,525746788	0,05841631		
Итого	11	1,798700369			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	-1,276235182	0,651494931	-1,958933402	0,081784484	-2,750019105	0,19754874
Переменная X 1	0,459768526	0,103140103	4,457708613	0,001582481	0,226449404	0,693087649
Переменная X 2	0,256351576	0,185010703	1,385604032	0,199238699	-0,16217171	0,674874863

Рисунок Б.3 – Проверка гипотезы  $H_3 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_0 \cdot \mu_{\zeta}^{a_{\zeta}} \cdot \mu_{\psi}^{a_{\psi}}$ 

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,941801264
R-квадрат	<b>0,886989622</b>
Нормированный R-квадрат	0,775688584
Стандартная ошибка	0,273845706
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	5,885889181	2,94294459	39,24372411	3,59199E-05
Остаток	10	0,749914708	0,074991471		
Итого	12	6,635803889			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,477351592	0,11641679	4,100367229	0,002143319	0,21795882	0,736744365
Переменная X 2	0,042604739	0,028926701	0,354705977	0,00529411	0,016705745	0,068503733

Рисунок Б.4 – Проверка гипотезы  $H_4 : \varepsilon_{\text{тех}} = \mu_{\zeta}^{a_{\zeta}} \cdot \mu_{\psi}^{a_{\psi}}$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,926308753
R-квадрат	<b>0,858047905</b>
Нормированный R-квадрат	0,743852696
Стандартная ошибка	0,153515081
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	4,435645036	2,217822518	63,12584125	5,05766E-06
Остаток	10	0,351333539	0,035133354		
Итого	12	4,786978574			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,262024729	0,0796837	3,288310281	0,008173329	0,084478383	0,439571076
Переменная X 2	0,206543706	0,019799434	10,43179835	1,07752E-06	0,162427817	0,250659594

Рисунок Б.5 – Проверка гипотезы  $H_5 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$ 

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,938547412
R-квадрат	<b>0,880871245</b>
Нормированный R-квадрат	0,768958369
Стандартная ошибка	0,238802596
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	4,216711776	2,108355888	36,97139472	4,56654E-05
Остаток	10	0,570266798	0,05702668		
Итого	12	4,786978574			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,206612837	0,098422584	2,099242152	0,062156365	-0,012686345	0,42591202
Переменная X 2	0,018393539	0,00231361	7,950148318	1,24371E-05	0,013238496	0,023548583

Рисунок Б.6 – Проверка гипотезы  $H_6 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,925322557
R-квадрат	<b>0,856221835</b>
Нормированный R-квадрат	0,741844018
Стандартная ошибка	0,154499334
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	4,43381815	2,216909075	62,77342888	5,17798E-06
Остаток	10	0,353160424	0,035316042		
Итого	12	4,786978574			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,466856792	0,14268682	3,271898491	0,008403276	0,148930745	0,784782838
Переменная X 2	0,073104764	0,032255773	2,266408711	0,046855628	0,001234424	0,144975104

Рисунок Б.7 – Проверка гипотезы  $H_7 : \varepsilon_{\text{тех}} = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$ 

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,51869167
R-квадрат	<b>0,269041048</b>
Нормированный R-квадрат	0,106605726
Стандартная ошибка	0,303265862
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,304659776	0,152329888	1,65629645	0,244072276
Остаток	9	0,82773165	0,091970183		
Итого	11	1,132391426			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	1,076502211	0,311920238	3,451209889	0,007260832	0,370889611	1,782114811
Переменная X 1	0,258832934	0,234908727	1,101844694	0,299121599	-0,272567524	0,790233393
Переменная X 2	-0,010354878	0,007148045	-1,448630791	0,181368471	-0,026524879	0,005815123

Рисунок Б.8 – Проверка гипотезы  $H_1 : \varepsilon_{\text{эк}} = a_0 + a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,906149139
R-квадрат	<b>0,821106262</b>
Нормированный R-квадрат	0,703216888
Стандартная ошибка	0,438540156
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	8,827199816	4,413599908	22,94955291	0,000292447
Остаток	10	1,92317468	0,192317468		
Итого	12	10,7503745			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,686222742	0,288655648	2,377305782	0,038790437	0,04305788	1,329387604
Переменная X 2	0,009431687	0,006173276	1,527825367	0,157546696	-0,004323228	0,023186603

Рисунок Б.9 – Проверка гипотезы  $H_2 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_{\zeta} \cdot \mu_{\zeta} + a_{\psi} \cdot \mu_{\psi}$ 

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,614843329
R-квадрат	<b>0,378032319</b>
Нормированный R-квадрат	0,239817278
Стандартная ошибка	0,340417795
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,63391077	0,316955385	2,735102619	0,118019884
Остаток	9	1,042958478	0,115884275		
Итого	11	1,676869248			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	1,533811859	0,917605983	1,671536463	0,128949546	-0,541957084	3,609580802
Переменная X 1	0,226281805	0,145268936	1,5576751	0,153737529	-0,102339359	0,55490297
Переменная X 2	-0,454625638	0,260580582	-1,7446643	0,115004882	-1,044099866	0,13484859

Рисунок Б.10 – Проверка гипотезы  $H_3 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_0 \cdot \mu_{\zeta}^{a_{\zeta}} \cdot \mu_{\psi}^{a_{\psi}}$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,577126648
R-квадрат	0,333075168
Нормированный R-квадрат	0,166382685
Стандартная ошибка	0,369694888
Наблюдения	12

<i>Дисперсионный анализ</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,682577956	0,341288978	2,497096768	0,137191073
Остаток	10	1,366743101	0,13667431		
Итого	12	2,049321056			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,20515003	0,157164021	1,305324395	0,221016067	-0,145033229	0,55533329
Переменная X 2	-0,023222821	0,039051383	-0,594673461	0,565273418	-0,110234725	0,063789083

Рисунок Б.11 – Проверка гипотезы  $H_4 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = \mu_{\zeta}^{a_{\zeta}} \cdot \mu_{\psi}^{a_{\psi}}$ 

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,928225525
R-квадрат	0,861602625
Нормированный R-квадрат	0,747762887
Стандартная ошибка	0,385723167
Наблюдения	12

<i>Дисперсионный анализ</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	9,262550884	4,631275442	31,1278528	9,04488E-05
Остаток	10	1,487823613	0,148782361		
Итого	12	10,7503745			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,110215208	0,163977934	0,672134385	0,516725912	0,02551504	0,194915376
Переменная X 2	0,266704626	0,040744473	6,545786701	6,5074E-05	0,175920284	0,357488968

Рисунок Б.12 – Проверка гипотезы  $H_5 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_{\zeta} \cdot \ln \mu_{\zeta} + a_{\psi} \cdot \ln \mu_{\psi}$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,848688508
R-квадрат	<b>0,720272183</b>
Нормированный R-квадрат	0,592299401
Стандартная ошибка	0,548377497
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	7,743195707	3,871597853	12,87451836	0,00229007
Остаток	10	3,00717879	0,300717879		
Итого	12	10,7503745			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,022171935	0,226014002	0,09809983	0,923791508	0,005257625	0,039086245
Переменная X 2	0,021348687	0,005312888	4,018283003	0,002445203	0,009510835	0,033186539

Рисунок Б.13 – Проверка гипотезы  $H_6 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_{\zeta} \cdot \ln \mu_{\zeta} + a_{\psi} \cdot \mu_{\psi}$ 

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,936691071
R-квадрат	<b>0,877390163</b>
Нормированный R-квадрат	0,765129179
Стандартная ошибка	0,363056699
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	9,432272828	4,716136414	35,77976212	5,20673E-05
Остаток	10	1,318101668	0,131810167		
Итого	12	10,7503745			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,36958461	0,275659078	1,340730776	0,209668258	0,024462209	0,714707011
Переменная X 2	0,206213715	0,062315472	2,82776827	0,01792036	0,037366191	0,375061239

Рисунок Б.14 – Проверка гипотезы  $H_7 : \varepsilon_{\text{ЭК}} = a_{\zeta} \cdot \mu_{\zeta} + a_{\psi} \cdot \ln \mu_{\psi}$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,119552142
R-квадрат	<b>0,014292715</b>
Нормированный R-квадрат	-0,204753349
Стандартная ошибка	0,218879698
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,006252018	0,003126009	0,065249813	0,937272444
Остаток	9	0,431174898	0,047908322		
Итого	11	0,437426917			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0,865063472	0,225125924	3,842575998	0,003950924	0,355793251	1,374333692
Переменная X 1	-0,033642393	0,169543485	-0,19842929	0,847119096	-0,417176401	0,349891614
Переменная X 2	-0,00155736	0,005159044	-0,30186991	0,769610382	-0,013227928	0,010113208

Рисунок Б.15 – Проверка гипотезы  $H_1: \varepsilon_k = a_0 + a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,924839761
R-квадрат	<b>0,855328584</b>
Нормированный R-квадрат	0,740861443
Стандартная ошибка	0,337425543
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	6,731411892	3,365705946	29,5610774	0,000110737
Остаток	10	1,138559972	0,113855997		
Итого	12	7,869971864			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,309802615	0,222100047	1,394878658	0,193259503	-0,185067126	0,804672356
Переменная X 2	0,014342872	0,004749898	3,019616939	0,012903902	0,00375944	0,024926303

Рисунок Б.16 – Проверка гипотезы  $H_2: \varepsilon_k = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,167348637
R-квадрат	<b>0,028005566</b>
Нормированный R-квадрат	-0,187993197
Стандартная ошибка	0,259439274
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,017453982	0,008726991	0,129656142	0,88000877
Остаток	9	0,60577863	0,067308737		
Итого	11	0,623232613			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0,069561884	0,699326043	0,099469889	0,922945585	-1,51242353	1,651547298
Переменная X 1	-0,013011965	0,110712389	-0,117529443	0,909021621	-0,263460789	0,237436858
Переменная X 2	-0,098398953	0,198593722	-0,495478672	0,632134673	-0,547649162	0,350851255

Рисунок Б.17 – Проверка гипотезы  $H_3 : \varepsilon_k = a_0 \cdot \mu_{\zeta}^{a_{\zeta}} \cdot \mu_{\psi}^{a_{\psi}}$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,767423967
R-квадрат	<b>0,588939545</b>
Нормированный R-квадрат	0,447833499
Стандартная ошибка	0,246260959
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,868872698	0,434436349	7,163660927	0,013762563
Остаток	10	0,606444601	0,06064446		
Итого	12	1,475317298			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	-0,01397034	0,104690013	-0,133444819	0,896488868	-0,247234224	0,219293544
Переменная X 2	-0,078833847	0,026012886	-3,030568995	0,012664831	-0,136794169	-0,020873524

Рисунок Б.18 – Проверка гипотезы  $H_4 : \varepsilon_k = \mu_{\zeta}^{a_{\zeta}} \cdot \mu_{\psi}^{a_{\psi}}$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,920733198
R-квадрат	<b>0,847749622</b>
Нормированный R-квадрат	0,732524584
Стандартная ошибка	0,465692569
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	7,309162356	3,654581178	65,16617723	4,42443E-06
Остаток	10	0,560809508	0,056080951		
Итого	12	7,869971864			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,039105929	0,100674011	0,388441159	0,705831152	0,02634216	0,051869698
Переменная X 2	0,216253097	0,025015009	8,644933889	5,93368E-06	0,160516185	0,308850831

Рисунок Б.19 – Проверка гипотезы  $H_5 : \varepsilon_k = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$ 

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,916072188
R-квадрат	<b>0,839188253</b>
Нормированный R-квадрат	0,723107079
Стандартная ошибка	0,355750463
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	6,604387944	3,302193972	26,09225606	0,000179558
Остаток	10	1,265583921	0,126558392		
Итого	12	7,869971864			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,126701309	0,146622694	0,864131643	0,40776521	0,045339703	0,208062916
Переменная X 2	0,018090119	0,003446645	5,248617541	0,000374131	0,010410517	0,308850831

Рисунок Б.20 – Проверка гипотезы  $H_6 : \varepsilon_k = a_\zeta \cdot \ln \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,963217161
R-квадрат	0,927787299
Нормированный R-квадрат	0,820566028
Стандартная ошибка	0,238392938
Наблюдения	12

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	7,301659936	3,650829968	64,23989693	4,69912E-06
Остаток	10	0,568311928	0,056831193		
Итого	12	7,869971864			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,053518346	0,181005275	0,129931828	0,899196806	0,003797865	0,103238827
Переменная X 2	0,267679758	0,04091804	5,319897002	0,000337797	0,126508684	0,308850831

Рисунок Б.21 – Проверка гипотезы  $H_7 : \varepsilon_k = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$ 

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,399932921
R-квадрат	0,159946341
Нормированный R-квадрат	0,137242188
Стандартная ошибка	0,029779455
Наблюдения	77

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,012494892	0,006247446	7,044805485	0,001582559
Остаток	74	0,065624379	0,000886816		
Итого	76	0,078119271			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0,116086682	0,014458049	8,029207881	1,14064E-11	0,087278391	0,144894974
Переменная X 1	-0,020925888	0,010731771	-1,949900825	0,054976546	-0,042309408	0,000457631
Переменная X 2	-0,001088495	0,000339368	-3,207412936	0,001979651	-0,001764701	-0,000412288

Рисунок Б.22 – Проверка гипотезы  $H_1 : E_c = a_0 + a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \ln \mu_\psi$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,826281367
R-квадрат	0,682740897
Нормированный R-квадрат	0,665177442
Стандартная ошибка	0,040463282
Наблюдения	77

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	0,264256268	0,132128134	80,699918	2,53949E-19
Остаток	75	0,122795788	0,001637277		
Итого	77	0,387052056			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	0,023845835	0,012459063	1,913934911	0,05944395	-0,00097389	0,04866556
Переменная X 2	0,001150092	0,000262908	4,374505859	3,8721E-05	0,000626352	0,001673831

Рисунок Б.23 – Проверка гипотезы  $H_2 : E_c = a_\zeta \cdot \mu_\zeta + a_\psi \cdot \mu_\psi$ 

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,439428191
R-квадрат	0,193097135
Нормированный R-квадрат	0,17128895
Стандартная ошибка	0,587071845
Наблюдения	77

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	6,103357358	3,051678679	8,854342091	0,000356769
Остаток	74	25,50434803	0,344653352		
Итого	76	31,60770539			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	-0,762152274	0,779218227	-0,978098622	0,331212382	-2,314778462	0,790473913
Переменная X 1	-0,360133121	0,122937246	-2,929406111	0,004512647	-0,605090928	-0,115175314
Переменная X 2	-0,66599944	0,220446677	-3,021136213	0,003456413	-1,105249027	-0,226749854

Рисунок Б.24 – Проверка гипотезы  $H_3 : E_c = a_0 \cdot \mu_\zeta^{a_\zeta} \cdot \mu_\psi^{a_\psi}$

## ВЫВОД ИТОГОВ

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,981121473
R-квадрат	0,962599344
Нормированный R-квадрат	0,948767336
Стандартная ошибка	0,586902263
Наблюдения	77

## Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	664,9043548	332,4521774	965,1562209	9,7466E-54
Остаток	75	25,83406993	0,344454266		
Итого	77	690,7384248			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>
Y-пересечение	0	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Переменная X 1	-0,35092145	0,122540565	-2,863716602	0,005426664	-0,59503477	-0,106808131
Переменная X 2	-0,880185822	0,025358927	-34,70911097	5,93857E-48	-0,930703395	-0,829668249

Рисунок Б.25 – Проверка гипотезы  $H_4 : E_c = \mu_{\zeta}^{a_{\zeta}} \cdot \mu_{\psi}^{a_{\psi}}$

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты внедрения результатов диссертационного исследования

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
Дніпропетровського національного  
університету залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

С. В. Мямлін

25 травня 2015 р.

АКТ

про використання результатів дисертації Харченко Олеси Іванівни  
«ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ  
ЗАСОБІВ ЗАЛІЗНИЦЬ ШЛЯХОМ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ  
РЕСУРСІВ»

м. Дніпропетровськ

«25» травня 2015 р.

Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна виконано госпдоговірну науково-дослідну роботу «Аналіз відповідності технічного оснащення залізничного транспорту ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» існуючим та перспективним обсягам роботи» (№ державної реєстрації 0111U009657), в якій використано результати дисертації Харченко О.І. «Підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів залізниць шляхом раціонального розподілу ресурсів».

Начальник НДЧ  
д.т.н., професор



Д.М. Козаченко



## АКТ

м. Дніпропетровськ

27.05.2015 р.

№ 15-328

**про впровадження результатів дисертаційної роботи асистента кафедри управління експлуатаційною роботою Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна Харченко Олесі Іванівни на тему «Підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів залізниць за рахунок раціонального розподілу ресурсів»**

Ми, що нижче підписалися, розглянули запропоновані моделі функціонування залізничних станцій, які розроблені в результаті виконання дисертаційної роботи асистента кафедри управління експлуатаційною роботою Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна Харченко О.І., встановили:

1. Використання розробленого програмного комплексу з моделювання роботи залізничних станцій дозволяє оптимізувати кількість засобів транспортних та вантажо-розвантажувальних робіт на залізничних станціях, а також виконати раціональний розподіл транспортних засобів між залізничними станціями, що призведе до підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів залізниць.

2. Розроблена методика розподілу ресурсів за напрямками сталого розвитку дозволяє визначити пріоритетний напрямок розвитку залізниць.

3. Результати дисертаційної роботи Харченко Олесі Іванівни можуть бути прийняті до впровадження в службі комерційної роботи та маркетингу та на вантажних станціях залізниці.

Головний інженер служби

/Д.П.Табаков /

Начальник виробничо-технічного відділу служби

/Д.О.Решетніков/

Старший інспектор виробничо-технічного відділу служби

/О.Л.Боган /

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Дніпропетровського  
національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна

Б. Є. Боднар

25 травня 2015 р.

## АКТ

Про використання результатів дисертації Харченко Олеси Іванівни  
«ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ  
ЗАСОБІВ ЗАЛІЗНИЦЬ ШЛЯХОМ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ  
РЕСУРСІВ»

м. Дніпропетровськ

«25» травня 2015 р.

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці спеціалістів та магістрів за спеціальністю 7(8).07010102 «Організація перевезень та управління на залізничному транспорті» використовуються наукові та практичні результати, що отримані в дисертації Харченко О.І., а саме:

1. Теоретичні результати дисертації використовуються при викладанні дисциплін на кафедрі «Управління експлуатаційною роботою».
2. Результати дисертації використовуються при виконанні дипломних проектів студентами спеціальності 7(8).07010102 «Організація перевезень та управління на залізничному транспорті».

декан факультету УПП  
к.т.н., доцент

Р. В. Вернигора

завідувач кафедри  
«Управління експлуатаційною роботою»  
к.т.н., доцент

М. І Березовий