

На правах рукописи



ИВАНОВ Игорь Алексеевич

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ АВТОБУСНЫХ
МАРШРУТОВ В ЦИФРОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ
ЭКОСИСТЕМАХ**

Специальность 05.22.10 –
«Эксплуатация автомобильного транспорта»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Терентьев Алексей Вячеславович

Официальные оппоненты: **Ризаева Юлия Николаевна**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет», кафедра управления
автотранспортом, заведующий;

Селиверстов Ярослав Александрович
кандидат технических наук,
ФГБУН Институт проблем транспорта
им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
(ИПТ РАН), г. Санкт-Петербург, лаборатория
интеллектуальных транспортных систем,
старший научный сотрудник;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова».

Защита диссертации состоится «11» ноября 2021 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220).

Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте: <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/ivanov-igor-alekseevich>

Автореферат разослан «05» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.223.02

канд. техн. наук, доцент



Олещенко Елена Михайловна

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Основной негативной тенденцией, характеризующей общее состояние автобусных пассажирских перевозок в РФ, как неэффективное является постоянное снижение количества перевозимых пассажиров и выполненных пассажира-километров. Поэтому проблема качественного и своевременного удовлетворения спроса на автобусные перевозки преобразуется из локальной транспортной в общую социальную проблему, определяющую отношение основной массы населения в РФ не только к качеству оказываемых транспортных услуг, но и в целом к ситуации, складывающейся в обществе. Необходимость коренного изменения и мероприятий по преодолению негативных тенденций в сфере обеспечения населения РФ и удовлетворения спроса на автобусные перевозки отражены в ряде принятых Правительством РФ и региональными Правительствами нормативных документов. Основной из них – «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», в котором отражены системные проблемы работы наземного городского пассажирского транспорта (НГПТ), одной из которых является не соответствие качественных и количественных показателей услуг, предоставляемых НГПТ, актуальным требованиям обеспечения транспортной подвижности населения (ТПН). Анализ традиционных и перспективных методов управления ТПН показывает, что развитие технологий управления пассажирским транспортом движется в сторону широкого использования современных инфокоммуникационных телематических технологий. Наметилась явная тенденция ко все большему увеличению оцениваемых в процессе мониторинга параметров состояния объектов пассажирской транспортной системы и увеличению объемов перерабатываемой информации. Между тем, существующая система получения исходных данных для формирования маршрутной сети НГПТ опирается на фактическое отсутствие достоверных данных о ТПН, а методология определения среднего расстояния транспортной корреспонденции базируется на приближенных методах расчёта, что в совокупности свидетельствует о невозможности получения достоверных данных, позволяющих установить стохастических законы распределения мощности пассажиропотоков. Тогда методы формирования маршрутной сети НГПТ должны основываться на моделях принятия решения в информационных ситуациях, характеризующихся как ситуации с неопределенным состоянием среды исследования, а для выявления объективных данных о мощности пассажиропотоков необходимо использовать современные цифровые ресурсы, позволяющие производить «он-лайн» мониторинг ТПН.

Единственным возможным путем эффективного развития НГПТ в РФ является формирование новой отрасли – интеллектуальные системы

управления НГПТ, интегрированные в цифровые транспортные экосистемы (ЦТЭС). Поэтому разработка инструментов решения задач управления в ЦТЭС: новых методов, математических моделей, алгоритмов и практических методик на их основе, является важной народнохозяйственной задачей, а её решение невозможно без проведения специальных научных исследований.

Степень разработанности темы исследования. Решению задач, совершенствования организации и управления автобусными перевозками были посвящены труды ведущих отечественными учеными: Л.Л. Афанасьева, Н.Б. Островского, Б.Л. Геронимуса, В.А. Гудкова, Л.Б. Миротина, В.А. Корчагина, И.В. Спирина, А.И. Солодкого и др. Исследованию различных аспектов повышения качества обслуживания пассажиров автобусами были посвящены работы многих ученых и специалистов: С.П. Артемьева, М.Д. Блатнова, Е.А. Барковой, Е.П. Володина, В.М. Васильева, Г.А. Варелопуло, М.С. Турпищевой, Е.Р. Нургалиева и мн. др. Во многом, благодаря исследованиям перечисленных авторов в 70-90 годах прошлого века была сформирована эффективная на текущем этапе развития НГПТ структура показателей и основы построения систем пассажирских автобусных перевозок.

Действующая в настоящее время система управления автобусными перевозками и построения расписаний движения основаны на реляционном принципе реализующим предметно-ориентированный подход (ПОП), когда средствами взаимодействия являются таблицы или хранимые процедуры. На данном принципе базируются модели формирования маршрутной сети движения автобусов, когда управление осуществляется через определение свойств системы по накопленным статистическим данным, носящим стохастический характер. Основными недостатками ПОП модели являются:

- система, как совокупность таблиц очень редко является сложной для анализа и понимания процессов;
- рост сложности системы, приводит к невозможности полноценно или достоверно отслеживать все необходимые места и процедуры для реализации изменений, а сам процесс развития системы преобразуется в плохо управляемый или неуправляемый.

Цель исследования – разработка методики формирования автобусных маршрутов, позволяющий создавать в автоматическом режиме расписание движения автобусов и основанной на цифровых моделях и технологиях, применимых в сложных пассажирских транспортных экосистемах.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ соответствия состояния системы построения автобусных маршрутов социотехническим условиям их эксплуатации.
2. Разработать концептуальную архитектуру системы контроля и управления движения автобусов в ЦТЭС.

3. Разработать аналитические модели формирования автобусных маршрутов, позволяющих учитывать неограниченное количество критериев эффективности и качества транспортных услуг.

4. Определить необходимый набор цифровых сервисов (ЦС), обеспечивающих универсальный комплексный мониторинг основных параметров технологических параметров ЦТЭС и информационно-платежных систем (ИПС).

5. Разработать алгоритмы автоматизированного построения расписания автобусов, позволяющие синхронизировать мультимодальные поездки пассажиров в сложных пассажирских системах.

6. Разработать структуру сервисно-ориентированной организации пассажирской транспортной системы с элементами цифровых сервисов.

7. Выполнить апробацию и экономическое обоснование методики формирования автобусных маршрутов в комплексе с ИПС основанной цифровых сервисах.

Объект исследования – система формальных моделей, отражающая комплекс цифровой трансформации технологических и управленческих процессов перевозки пассажиров.

Предмет исследования – методы построения оптимальных траекторий и маршрутов движения автобусов в пассажирских цифровых транспортных экосистемах.

Рабочая гипотеза. Альтернативой существующему подходу к построению расписаний движения автобусов является объектно-ориентированный подход (ООП). При ООП программа должна представлять собой не только описание свойств системы в виде критериев и целеполагания, но и методов взаимодействия в виде операций по оптимизации маршрутной сети НГПТ. При этом инструменты оптимизации должны позволять строить производные структуры расписания движения автобусов на основе базовых, тем самым создавая новую модель с необходимыми свойствами, обеспечивая возможность постоянного анализа и внесения актуальных изменений. В качестве аналитических моделей ООП, позволяющих обоснованно формировать ЦТЭС, необходимо применять модели динамических систем и методы многокритериальной оптимизации. Применение методов динамического программирования как метода оптимизации управлений в ЦТЭС позволяет реализовать одновременный учёт значений значительного количества показателей в решаемой задаче в зависимости от условий состояния среды ЦТЭС.

Методологическая основа исследования. Для решения задач исследования применяются методы системного анализа, регрессионного и корреляционного анализа, теория моделирования сложных систем, теория вероятностей и исследования операций, методы динамического и линейного программирования.

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

– П1. Место и роль автомобильного транспорта в транспортной системе страны, взаимодействие с природой, обществом, прогнозы и пути развития автотранспортного комплекса страны.

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

– П15. Развитие новых информационных технологий при перевозках.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих результатов:

1. Определены методы формирования маршрутной сети, основанные на моделях принятия решения в информационных ситуациях, характеризующихся как ситуации с неопределенным состоянием среды исследования и обоснована необходимость использования современных цифровых ресурсов для их реализации.

2. Разработаны инструменты управления и оптимизации в ЦТЭС НГПТ с учётом потенциальных возможностей цифровых технологий на основе методов динамического программирования и теории принятия в условиях многокритериальности информационной среды.

3. Разработана аналитическая модель построения автобусных маршрутов в сложной транспортной экосистеме, являющаяся основным элементом в концепции развития ЦТЭС на основе объектно-ориентированного подхода.

4. Разработана комплексная методика формирования маршрутов в ЦТЭС, позволяющая создавать расписание движения автобусов с использованием новых цифровых технологий приема и обработки входящей информации (данные пассажиропотока и т.д.) в систему планирования движения автобусов.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработана новая аналитическая модель, позволяющая выработать оптимальные параметры перемещения исследуемых объектов в ЦТЭС при ограничениях, определяемых динамическими изменениями социотехнической среды эксплуатации автобусов.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в следующем:

1) установлен необходимый набор ЦС обеспечивающих управление и универсальный комплексный мониторинг основных параметров ЦТЭС и отдельных технологических модулей: информационно-платежные функции, планирование маршрутов и расписаний, диспетчерское управление

движением, формирование и синхронизацию мультимодальных поездок, которые осуществляются по принципу МaaS-технологий, анализ объемов транспортной работы АТП и другие необходимые функции;

2) разработаны алгоритмы формирования маршрутов с параметрами оптимизации: интервал движения автобусов, количество автобусов на маршруте, выработка автобусов на маршруте;

3) разработано подробное описание применения разработанной методики с полным перечнем измерителей, необходимых для планирования, учёта и анализа работы транспортных средств (ТС) и персонала (водителей);

4) разработано специализированное ПО, принципиальной новизной которого является получение оптимальных решений, учитывающих неограниченное количество актуальных критериев при формировании расписания движения автобусов.

Практические результаты исследования могут быть использованы и используются в настоящее время при разработке региональных и муниципальных систем обеспечения транспортной мобильности населения в РФ и других стран.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концептуальная архитектура системы контроля и управления движения автобусов в ЦТЭС.

2. Инструменты управления и оптимизации в ЦТЭС НГПТ с учётом потенциальных возможностей цифровых технологий на основе методов динамического программирования теории принятия в условиях многокритериальности информационной среды.

3. Алгоритмы формирования маршрутов с параметрами оптимизации: интервал движения автобусов, количество автобусов на маршруте, выработка автобусов на маршруте.

4. Описание разработанной методики с полным перечнем измерителей, необходимых для планирования, учёта и анализа работы транспортных средств (ТС) и персонала (водителей).

5. Результаты экономического обоснования методики формирования автобусных маршрутов в комплексе с ИПС основанной цифровых сервисах.

Личный вклад автора. Все основные идеи и разработки исследования, сформировавшие основу научно-методического подхода данного исследования, принадлежат автору или выпалены непосредственно с его участием.

Степень достоверности полученных результатов исследования подтверждается:

1) использованием методов системного анализа, теории моделирования, теорий вероятностей и теории принятия решений, методов динамического программирования и векторной оптимизации;

2) отсутствием противоречий с ранее проводимыми исследованиями другими учеными по тематике организации и управления автобусных перевозок и принятию решений в сложных организационно-технических системах;

3) публикациями в рецензируемых изданиях ВАК РФ и в изданиях входящих в международные базы цитирования Scopus и WoS.

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

– Региональная информатика (РИ-2016). Юбилейная XV Санкт-Петербургская Международная конференция «Региональная информатика (РИ-2016)». Санкт-Петербург, 26-28 октября 2016 г.: Секция 10, Вычислительная техника. Информационные системы и технологии. С.Л. Горелик, И.А. Иванов, В.В. Лещинский, А.А. Малахов. Доклад: «Третье поколение территориальных пассажирских транспортных систем»;

– 14 февраля 2018 г. WECON. Инновационные платежные решения для транспорта 2018. Москва. Конгресс-центр Технополис, Доклад: «Интеллектуальные транспортные системы поколения 3.0 для общественного транспорта»;

– 18 апреля 2018 г. Петербургский цифровой форум 2018. Санкт-Петербург. Доклад: «Универсальная система оплаты услуг пассажирского транспорта общего пользования на территории Российской Федерации»;

– 16 мая 2018 г. Конференция «Электротранс». Москва. Сокольники. Доклад: «Перспективы и практические шаги для внедрения технологии МaaS на территории Российской Федерации»;

– 7 июня 2018 г. Форум «Цифровая индустрия промышленной России» (ЦИПР), Иннополис, Татарстан. Доклад: «Цифровая трансформация общественного транспорта в России»;

– организация и безопасность движения дорожного движения в крупных городах: XIV Международная научно-практическая конференция, 2020 г. СПбГАСУ.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования:

- использованы при выполнении НИР на тему: Концепция реализации универсальной системы оплаты проезда на территориальном пассажирском транспорте Российской Федерации. Договор № 72-2016-ПРООН от 12 декабря 2016 года между Министерством транспорта Российской Федерации и автономной некоммерческой организацией «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации»;

- подтверждены актами о внедрении организациями: Аналитический Центр при правительстве РФ, г. Москва; ГУП «Пассажиравтотранс», г. Санкт-Петербург; ООО «Хит Кард», ООО «Городская Мобильность», ООО «Дата Пакс».

Публикации и патенты. Основные положения и результаты исследования опубликованы в 5-и печатных работах и электронных изданиях, в том числе в 2-х научных статьях в журналах, рецензируемых ВАК РФ, 1-й статье в издании, входящим в международные базы цитирования (Scopus и Web of Sciens), получен 1 патент, имеющий государственной регистрацию РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация содержит: введение, 4-е главы, заключение, список литературы из 109 наименований и приложений с материалами, отражающими уровень практического использования результатов исследования. Работа изложена на 163 страницах основного текста.

Во введении раскрывается тема исследования, обосновывается её выбор, актуальность и необходимость разработки методики формирования автобусных маршрутов в цифровых транспортных экосистемах. Формируется цель и задачи исследования, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ состояния пассажирских автобусных перевозок в РФ и выявлены перспективы развития цифровых транспортных экосистем. Определено, что на эффективность эксплуатации автобусов влияет большое количество факторов различных по «природе» и динамически изменяющихся во времени, поэтому методы формирования маршрутной сети должны основываться на моделях принятия решения в информационных ситуациях, характеризующихся как ситуации с неопределенным состоянием среды исследования.

Во второй главе разработана концепция методики формирования автобусных маршрутов в цифровых транспортных экосистемах. Разработана аналитическая модель построения автобусных маршрутов в сложной транспортной экосистеме на основе объектно-ориентированного подхода и на многокритериальном аналоге принципа динамического программирования.

В третьей главе разработана методика формирования маршрутов в цифровой транспортной экосистеме, позволяющая создавать расписание движения автобусов с использованием новых цифровых технологий приема и обработки входящей информации (данные пассажиропотока и т.д.) в систему планирования движения автобусов. Разработанная методика позволяет полностью автоматизировать процесс формирования расписания для любых видов маршрутов (регулярных и нерегулярных) как одному, так по неограниченному количеству актуальных критериев.

В четвёртой главе Обоснована необходимость применения цифровых технологий в управлении сложными социально-экономическими системами и доказано. Доказано, что ЦС в настоящее время является самостоятельным

инновационным продуктом, способствующем повышению эффективности существующих бизнес-процессов и являющимся самостоятельной бизнес-услугой, реализуемой с использованием ИКТ. Определена структура сервисно-ориентированной организация пассажирской транспортной системы с элементами цифровых сервисов. Дано экономическое обоснование методики формирования автобусных маршрутов, основанной цифровых сервисах в виде комплексной финансовой модели внедрения разработок исследования.

В заключении изложены основные итоги и результаты выполненного исследования.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Концептуальная архитектура системы контроля и управления движения автобусов в ЦТЭС

Повышение эффективности регионального и муниципального пассажирского транспорта, комфорта и безопасности перевозок может быть достигнуто за счет использования принципов цифровой трансформации технологических и управленческих процессов. Из типового набора цифровых сервисов и аппаратно-программных модулей, формируется цифровая платформа, к которой подключаются региональные системы обеспечения мобильности населения, мобильные и внешние сервисы. Так формируется экосистема, в центре которой пассажиры, вокруг которых объединяются различные сервисы, обеспечивающие базовые целевые функции (комфорт, безопасность и эффективность).

Идеология ЦТЭС основана на представлении моделируемой системы, как набора цифровых сервисов (ЦС), которые объединяются в различных комбинациях для обеспечения целевых функций. Методология проектирования основана на циклической модели с открытой архитектурой, предусматривающей поэтапную разработку и внедрение ЦС в определенном порядке от функций обеспечения пассажира (G2C, B2C) до функций обеспечения перевозчиков и государственных структур, участвующих в регулировании процесса перевозок (G2B). Технологическая архитектура цифровой платформы (рисунок 1). В структуре основных сервисов (рисунок 2) выделяются общие сервисы, составляющие ядро платформы.

Функциональная структура системы ЦТЭС, содержит две базовых подсистемы, связанные внешними интерфейсами и образующие единую систему (рисунок 3):

- «автоматизированная система централизованного управления» – ЦУ РПТ (по схеме G2B или B2B), в которую входят подсистемы комплексного мониторинга и управления пассажирскими перевозками;
- «информационно-платежная система» – ИПС (по схеме B2C), которая обеспечивает информационное обслуживание всех участников и платёжно-расчётные функции.



Рисунок 1 – Технологическая архитектура цифровой платформы ЦТЭС

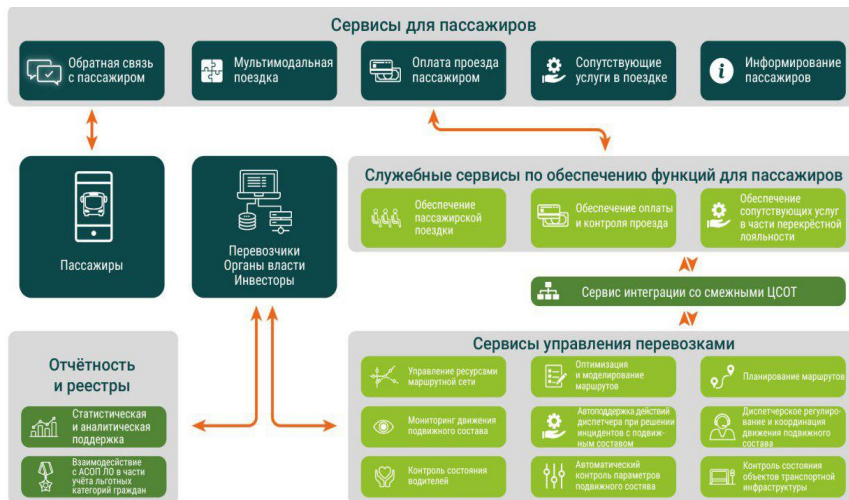


Рисунок 2 – Базовые сервисы для участников процесса перевозки

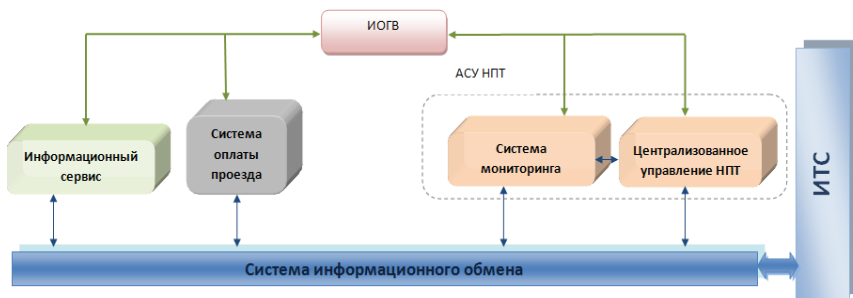


Рисунок 3 – Функциональная структура ЦТЭС

Функциональный набор ЦС обеспечивают ЦУ и комплексный мониторинг основных параметров системы и отдельных модулей, информационно-платежные функции, а также аналитику для подготовки проектов управляющих решений, в т.ч. выявление рисков выхода из равновесного состояния и потери устойчивости, планирование маршрутов и расписаний, диспетчерское управление движением, формирование и синхронизацию мультимодальных поездов, анализ объемов транспортной работы перевозчиков и др. ЦС рассчитаны на создание систем, каждая из которых реализуется на базе нескольких сервисов:

- автоматизированного управления транспортной системой с использованием принципов MaaS;
- оплаты проезда с учетом многозональных и мультимодальных перевозок;
- индивидуального планирования поездки для пассажира;
- организацию «гибких маршрутов» с использованием различных видов транспорта для перевозчиков и многие др.

Специфика ЦТЭС определяется многомерностью и разнородностью структуры, возможным многообразием природы элементов и связей в системе, разной чувствительностью к воздействиям и асимметричностью потенциальных возможностей осуществления функциональных и дисфункциональных изменений. При этом, каждый из элементов системы может быть также представлен в виде подсистемы, свойства которой являются частью свойств системы, причем допускается факторизация (деление на относительно независимые подсистемы).

2. Инструменты управления и оптимизации в ЦТЭС НГПТ с учётом потенциальных возможностей цифровых технологий

Модель управления в ЦТЭС реализована с использованием теории расписаний, основанной на методах динамического программирования. В границах

ЦТЭС определяются возможности перемещения объектов (пассажиров) в заданных дискретно-событийных ситуациях в виде оптимального маршрута автобуса. Задача оптимизации в управляемой системе ЦТЭС с дискретными состояниями в однокритериальной постановке формализуется следующим образом:

$$\Omega = \{D; x_0; F; V(x), f(x, v), s(x, v)\}, \quad (1)$$

где D — множество возможных состояний ЦТЭС; F — множество состояний объектов в ЦТЭС, $x_0 \in D, x_0 \notin F, F \subset D$; $V(x)$ — множество управлений направлениями перемещения объектов в ЦТЭС; $(x \in D | F)$; $f(x, v)$ — функция переходов движения автобусов в ЦТЭС для из информационного состояния x ; v ; — показатели движения автобусов преобразуются в $f(x, v)$, $(x \in D | F), v \in V(x), f(x, v) \in D$; $s(x, v)$ — оптимизируемая функция, с неотрицательными значениями.

Тогда оптимальной траектории движения автобусов (T) в ЦТЭС (Ω) соответствует конечная последовательность $T = \{x^0, x^1, x^2, \dots, x^n\}$ при выполнении условия

$$x^t = f(x^{t-1}, v^t), \text{ где } v^t \in V(x^{t-1}), t = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где x_0 — начало движения автобуса; x^n — конечное положение движения автобуса в траектории; $(x^1, x^2, \dots, x^{n-1})$ — промежуточные положение движения автобуса в траектории.

Формирование оптимальной траектории движения автобусов в ЦТЭС:

$$S(x) = \min_{v \in V(x)} \{s(x, v) + S(f(x, v))\}, \quad (x \in D | F). \quad (3)$$

Тогда каждому дискретному положению автобуса в ЦТЭС соответствует множество результативных показателей движения автобусов, определяющих единый цикл транспортного процесса. При этом управление в ЦТЭС реализуется пошагово для отдельного автобуса. Моделирование конечного графа перемещения (оптимальных траекторий) для отдельных автобуса или маршрута выполняется по условию

$$\begin{cases} S(x) = \min_{v \in V(x)} \{D_{i(v)} + S(f(D_{i(v)}))\}, (x \in D | F) \\ D_{i(v)} = \sum_{j=1}^n b_{i,j} c_j \rightarrow \max \\ \sum_{j=1}^n c_j = 1 \end{cases}, \quad (4)$$

где D_i — эффективность перемещения автобуса количественных оценках; b_{ij} — эффективность частных решений; c_j — значение весовых коэффициентов, определяющих приоритет важности возможных решений.

3. Алгоритмы формирования маршрутов с параметрами оптимизации: интервал движения автобусов, количество автобусов на маршруте, выработка автобусов на маршруте

Решение поставленной задачи требует структуризации задачи в виде определения параметров оптимизации, оптимизируемых параметров и критериев оптимизации (таблица 1).

Таблица 1 – Определение параметров оптимизации, оптимизируемых параметров и критериев оптимизации

Дискретные состояния	Критерии оптимизации					Эффективность*	
	Надёжность			Производительность	Удельные затраты	ЛЭ	ОЭ
	И	A_m	Q_{max}				
1	$c_{11} \cdot x_{11}$	$c_{12} \cdot x_{12}$	$c_{12} \cdot x_{12}$	$c_{13} \cdot x_{13}$	$c_{14} \cdot x_{14}$	d_1	D_s
2	$c_{21} \cdot x_{21}$	$c_{22} \cdot x_{22}$	$c_{22} \cdot x_{22}$	$c_{23} \cdot x_{23}$	$c_{24} \cdot x_{24}$	d_2	
...		
n	$c_{81} \cdot x_{81}$	$c_{82} \cdot x_{22}$	$c_{82} \cdot x_{22}$	$c_{83} \cdot x_{83}$	$c_{84} \cdot x_{84}$	d_8	
N	$c_{i1} \cdot x_{21}$	$c_{i2} \cdot x_{22}$	$c_{i2} \cdot x_{22}$	$c_{i3} \cdot x_{i3}$	$c_{i4} \cdot x_{i4}$	d_n	

* оптимизируемый параметр

Оптимизируемыми параметрами являются:

1) локальная эффективность (ЛЭ) системы в количественных оценках для отдельных дискретных состояний (минимум времени ожидания пассажиром автобуса, минимум времени движения автобуса между ТПУ и т.д.);

2) общая эффективность (ОЭ) подсистемы «расписание движения автобусов» на всем интервале рассматриваемых дискретных состояний (макс. объем перевозок и пассажиропоток и на отдельных маршрутах и т.д.).

Критериями оптимизации являются:

1. Надёжность ЦТЭС, определяемая показателями регулярности движения автобусов по расписанию и устойчивостью системы в части обработки больших объемов данных.

2. Производительность системы реорганизации и планирования перевозок на АТП с применение разработанной методики формирования автобусных маршрутов.

3. Удельные затраты на эксплуатацию автобусов.

Оптимизируемыми параметрами являются: интервал движения автобусов (I), количество автобусов на маршруте (A_m), пассажиропоток (Q_{\max}).

Решение задачи сводится к нахождению c_{il} определяющее максимальную эффективность d_n и D_s с применением модели (4). Принципиальная схема и алгоритм поиска решений эффективных решений в подсистеме «расписание» приведена на рисунке 4 и в таблице 2. В ЦТЭС алгоритм обработки данных, собираемых системой мониторинга из разных источников (бортовых датчиков, подсистемы оплаты проезда и др.) преобразует с помощью аналитической подсистемы данные в проекты управляющих решений. Система мониторинга, в совокупности с аналитической системой, обеспечивает регулирование системы с помощью обратных связей и различных исполнительных элементов и является важнейшей частью ЦТЭС. Разработанные алгоритмы замыкаются в контуре обратных связей, обеспечивающим устойчивость системы при выходе из состояния равновесия, которое происходит под влиянием внешних и внутренних факторов.

Таблица 2 – Принципиальная схема поиска решений эвристических решений в подсистеме «расписание»

Условные обозначения		решение — это результат сравнения, текущего состояния параметров рейса с параметрами определяемыми исходными данными в каждом отдельном алгоритме (интервал, количество автобусов, пассажиропоток)			
		(α: β: γ: δ) цифровые индексы рейса – текущее состояние параметров рейса (время начала движения: место начала движения: время окончания движения: место окончания движения)			
Номер маршрута	Выпуск	Время		Количество автобусов	Время в парке
		1	2		
1	КП1	КП2	КП1	КП2	КП1
2	КП1	КП2	КП1	КП2	КП1
3	КП1	КП2	КП1	КП2	КП1
4	КП1	КП2	КП1	КП2	КП1
5-1	КП1	КП2	КП1	КП2	КП1
6	КП1	КП2	КП1	КП2	КП1

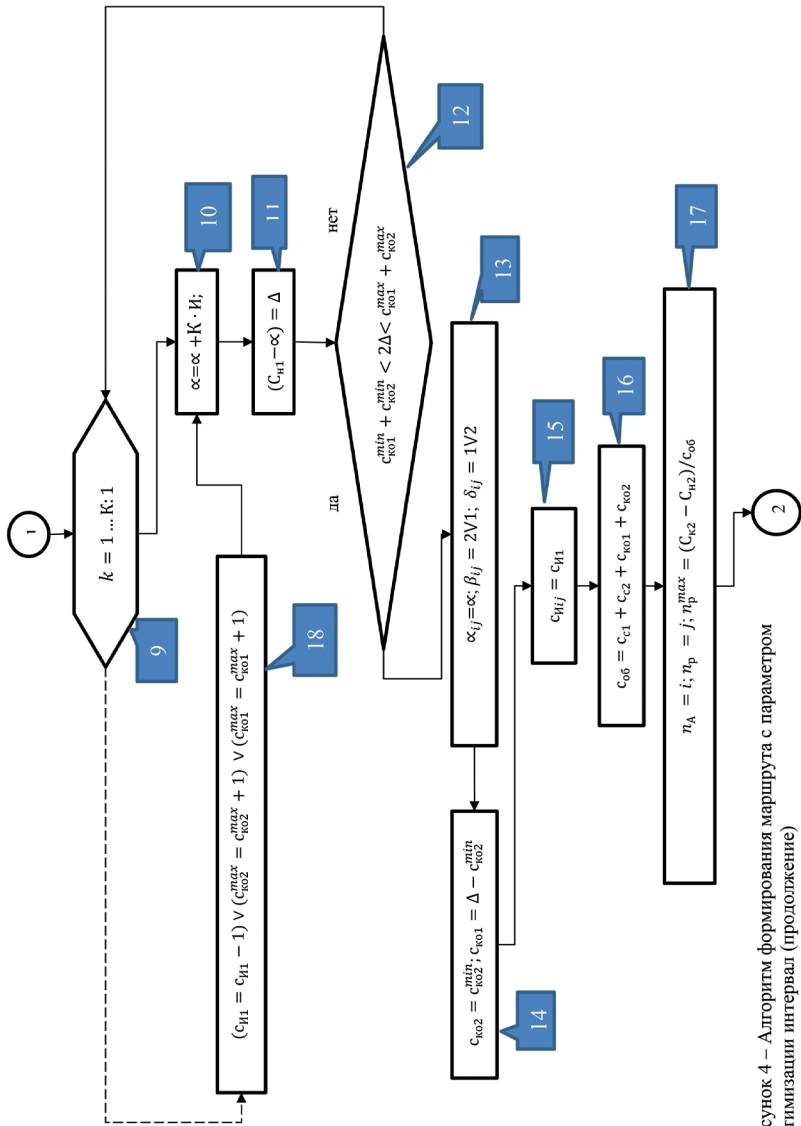


Рисунок 4 – Алгоритм формирования маршрута с параметром оптимизации интервал (продолжение)

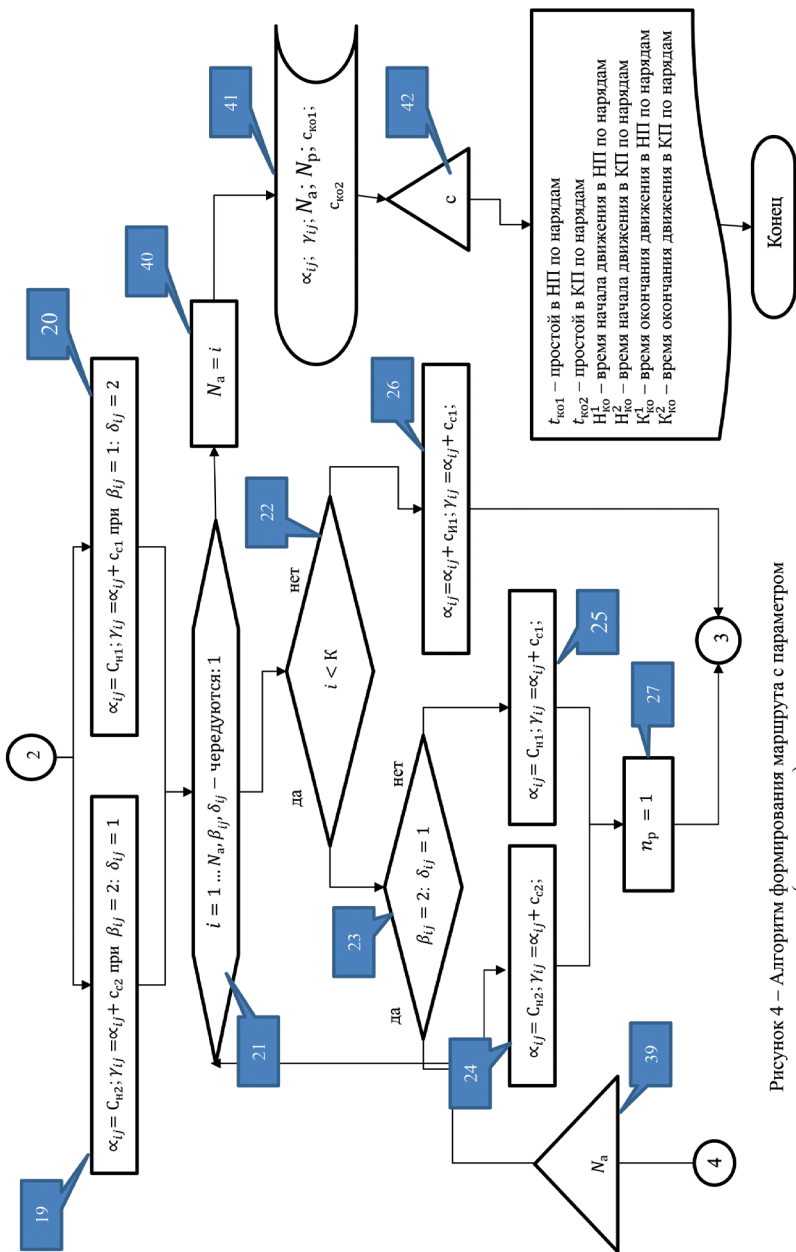


Рисунок 4 – Алгоритм формирования маршрута с параметром оптимизации интервал (продолжение)

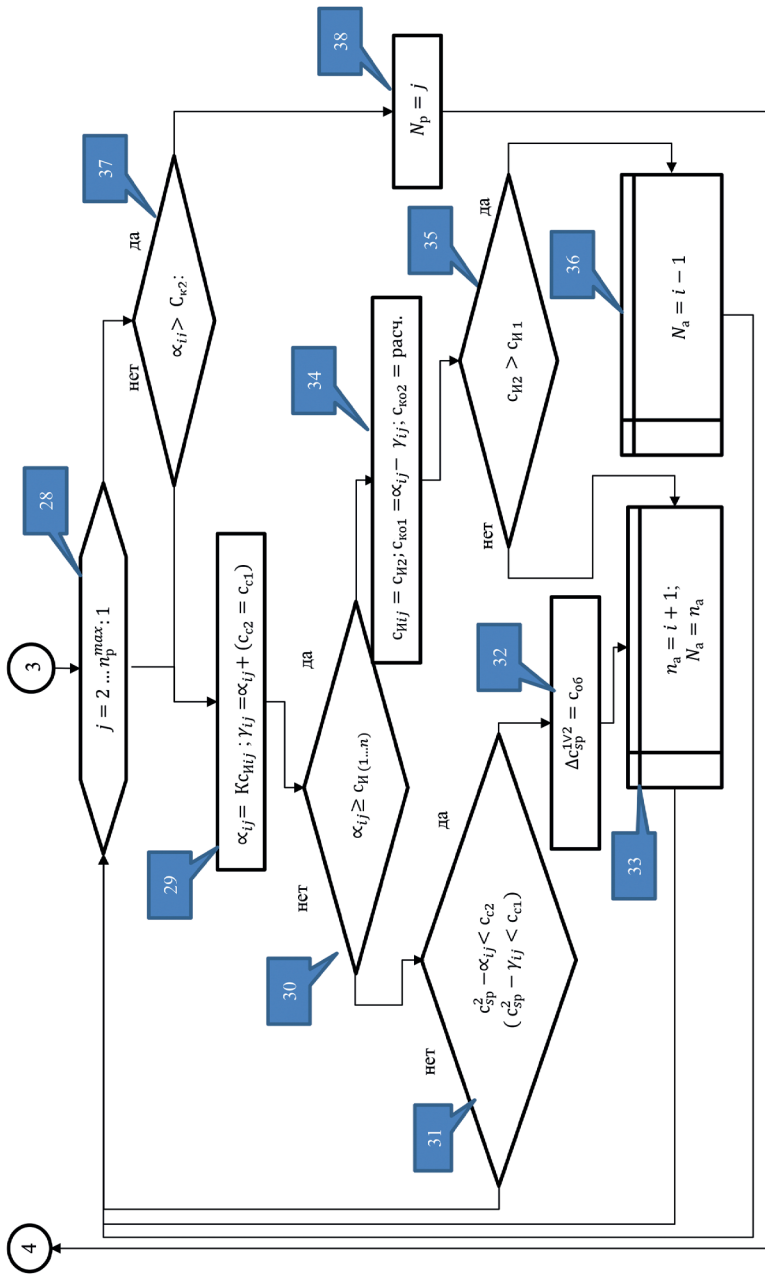


Рисунок 4 (окончание) – Алгоритм формирования маршрута с параметром оптимизации интервал (окончание)

4. Описание методики с полным перечнем измерителей, необходимых для планирования, учёта и анализа работы транспортных средств и водителей

В структуру методики для расчёта показателей эксплуатации автобусов и формирования расписания движения в ЦТЭС входят следующие обязательные элементы:

1. Цели и задачи, определяющие качество разрабатываемой методики
2. Критериальный аппарат, позволяющий реализовать требуемое качество (критерии эффективности) методики.
3. Состав исходных данных, необходимых и достаточный для реализации установленного качества методики.
4. Форма представления исходных данных.
5. Перечень измерителей, необходимых для планирования, учёта и анализа работы транспортных средств (ТС) и персонала (водителей) в рамках разрабатываемой методики.
 - 5.1. Система показателей, позволяющая оценивать степень использования ТС (показатели использования)
 - 5.2. Система показателей, позволяющая оценивать результаты работы ТС (результативные показатели).
 - 5.3. Система показателей организации работы водителей
 - 5.4. Форма представления измерителей.
6. Аналитические связи в методике:
 - 6.1. Система аналитических связей между исходными данными и показателями использования ТС
 - 6.2. Система аналитических связей между показателями использования и результативными показателями ТС.
 - 6.3. Расчёт элементов системы организации работы водителей.
 - 6.4. Форма представления результатов расчёта.
7. Последовательность реализации методики на АТП по разработанным алгоритмам приведена в таблице 3.

Разработанная методика формирования маршрутов в цифровой транспортной экосистеме позволяет создавать расписание движения автобусов с использованием новых цифровых технологий приема обработки входящей информации (данные пассажиропотока и т.д.) и полностью автоматизировать процесс формирования расписания для любых видов маршрутов (регулярных и нерегулярных) как одному, так по неограниченному количеству актуальных критериев.

Для реализации большого количества вычислительных процедур по сформированной методике разработано специализированное ПО. Основной идеей программы является получение оптимального решения, учитывающего неограниченное количество актуальных критериев при формировании расписания.

Таблица 3 – Последовательность реализации алгоритма «Интервал» в подсистеме «расписание»

№	Обозначения	Пояснение	№ Показателя
		«Заявка» - синхронизация параметров движения автобусов (ТС) из начального пункта (НП) и конечного пункта (КП) с обеспечением требуемого ритма движения в рамках установленного интервала	
1	ОУВ – оператор учёта времени	ОУВ переводит состояние «время» в цифровой индекс [1 сутки = 1440 мин. = 1440 индексированных единиц (ИЕ)]	
2		Извлечение (сопоставление) цифрового индекса (ЦИ) – соответствующего состоянию «время».	
3	МИД – модуль исходных данных	Модуль формируется на базе преобразованных исходных данных в ЦИ.	
4	α – текущий параметр начала движения ТС; β – текущий параметр начала движения ТС; k – параметр оптимизации;	Оператор устанавливает индекс рейса (ИР) – соответствующий времени отправления ТС из 2-го конечного пункта (КО-2)	1, 2, 14
5		Оператор определяет ЦИ начала движения ТС «минимум» рейса 1-го набора из начального пункта (НП – КО-1) в конечный пункт (КО-2). Определяется дискретная функция α от интервала движения [$\alpha = k(\text{И}, C_{\text{пл}}, C_{\text{обл}}, C_{\text{воз}})$]	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 14
6	$S_{\text{об}}$ – индекс времени оборотного рейса	Определяется время оборотного рейса в ЦИ	
7	K – количество возможных дискретных состояний параметра оптимизации	Определяется количество дискретных значений k – округляется до ближайшего целого	
8	N_d – количество нарядов	Определяется количество нарядов для обеспечения исходного ритма движения	
9	–	Формируется цикл k по функции $\alpha = k(\text{И})$ с шагом 1 ЦИ	
10	И – интервал соответствующий значению $S_{\text{ци}}$	Определяется функция перебора значений цикла	
11	Δ – величина ограничения (условия) синхронизации	Определяется значение проверяемого условия для обеспечения синхронизации	
12	–	Формируется условие проверки на допустимость изменения простота на КО для обеспечения синхронизации (определяется ближайшее значение α к значению α соответствующему планируемому времени выхода ТС из КО-1 в ИЕ)	
13	i – текущее значение номера наряда; j – текущее значение номера рейса;	Определяется ИЕ начала движения ТС из КО-1	
14	–	Корректируется значения ($S_{\text{обл}}, C_{\text{воз}}$) в соответствии с допустимым исходными диапазоном данных и их возможными отклонениями для обеспечения синхронизации движения ТС	
15	$S_{\text{ин}} j$ – индекс времени интервала движения	Присваивается текущее значения интервала движения ТС	
16	–	Определяется скорректированное время оборотного рейса	
17	$n_{\text{р}}^{\text{max}}$ – максимальное количество рейсов для одного наряда	Присваиваются переменные значения номеру наряда, номеру рейса, определяется максимально возможное количество рейсов одного наряда при заданных параметрах движения ТС	
18	–	Корректирование исходных параметров движения ТС в случае объективной невозможности синхронизации при заданных параметрах	
		Сформирован ритм движения ТС с учётом заданного И (интервала)	

Основной расчёт графика движения ТС	
19	Y_{ij} – индекс времени начала движения из конечного пункта; δ_{ij} – индекс расположения конечного пункта движения
20	Присвоение ИР начала движения ТС из КО-2
21	Присвоение ИР начала движения ТС из КО-1
22	Формирование цикла распределения нарядов движения ТС Формируется условие для определения ЦИ первого рейса для 1-го и 2-го наряда (начло движения ТС из КО-1 и КО-2)
23	Формируется условие для определения начального пункта движения ТС по 1-му и 2-му наряду
24	Индексирование 1-го рейса 1-го наряда
25	Индексирование 1-го рейса 2-го наряда
26	Индексирование 1-го рейса i -го наряда, начиная с 3-го и т.д.
27	Присвоение номера рейса
28	Формирование цикла для определения ЦИ рейсов
29	Индексирование рейсов при заданном интервале движения
30	Формирование условия изменения значения интервала движения
31	Формирование условия наличия разрыва в движении ТС
32	Присвоение ЦИ времени разрыва значения ЦИ времени оборотного рейса. Только при этом назначении сохраняется заданный ритм движения ТС в соответствии с условием $I = Const$, а параметры рейса остаются неизменными.
33	Определение дополнительного наряда и присвоение ему номера. Номер наряда сохраняется во внутренней памяти.
34	Определение ЦИ параметров рейса при изменении интервала движения.
35	Формирование условия увеличения или уменьшения времени интервала
36	Сокращение требуемого количества нарядов.
37	Формирование условия окончания расчёта ЦИ рейсов
38	Присвоение значения количества рейсов по каждому из нарядов
39	Уточнение количества нарядов по результатам расчёта
40	Присвоение значения количества нарядов
41	Сохранение полученных результатов расчётов в ЦИ
42	Преобразование ЦИ полученных результатов в формат – (час. мин)

5. Результаты экономического обоснования методики формирования автобусных маршрутов в комплексе с ИПС основанной на цифровых сервисах

На основе изложенного подхода была спроектирована стандартная экономическая модель внедрения экосистемы ЦТЭС и проведены расчеты на исходных данных конкретного региона (Ленинградская область), в котором используется разработанная в диссертации методике формирования маршрутов автобусов с применением ИПС, основанной на ЦС в ЦТЭС.

Представленная модель, в первую очередь, отличается от традиционных тем, что в ней рассмотрены новые источники дохода, возникающие от коммерческой реализации прямых транспортных и косвенных сопутствующих услуг. Примерами прямых услуг является предоставление услуги перевозки пассажирам, доход от которых распределяется между перевозчиками, операторами цифровых сервисов, инвесторами (государственными и/или частными) и другими участниками (например, банками, обеспечивающими пополнение платежных инструментов, микрокредитование типа отложенный платеж пассажирам и т. п.).

Дополнительные информационные услуги, основанные на данных, получаемых от мониторинга (например, точное текущее геопозиционирование, матрицы пассажирских корреспонденций, данные контроля состояния дорожного покрытия и других объектов транспортной инфраструктуры в зоне движения маршрутных ТС и т.п.) представляют коммерческий интерес для сетевых пассажирских сервисов, ремонтных служб, торговых и коммерческих предприятий и др. Важным источником доходов является продажа прав (лицензий на право подключения немаршрутных средств к мультимодальной поездке, аренду мест в узлах пересадки, рекламы т др.). Также изменяется структура расходов для всех участников (перевозчиков, пассажиров, ИОГВ), что обусловлено оптимизацией траекторий поездки и использованию в качестве периферийного оборудования крупносерийных мобильных «гаджетов» с гарантированным внешним сервисным обслуживанием и уменьшение доли узкоспециализированных устройств. С точки зрения главного потребителя услуг-пассажира, также произошли существенные изменения - основная из них сокращение затрат времени на поездку.

Экспериментальные данные для экономической модели получены в одной из типовых зон застройки СПб (район станций метро «Гражданский проспект» и «Проспект Просвещения»). От граждан собирались предварительные заказы с недельным графиком поездок, выявлялась корреляция между интересами граждан-заказчиков, формировались «гибкие» маршруты автобусов или микроавтобусов для групповой поездки до ближайшей станции метро, которые обеспечивали посадку в удобном для пассажиров месте и доставляли их за минимально возможное время до станции метро, которая была наиболее удобна для дальнейшей поездки.

Комплексная экономическая модель внедрения разработок исследования представлена на рисунке 5.

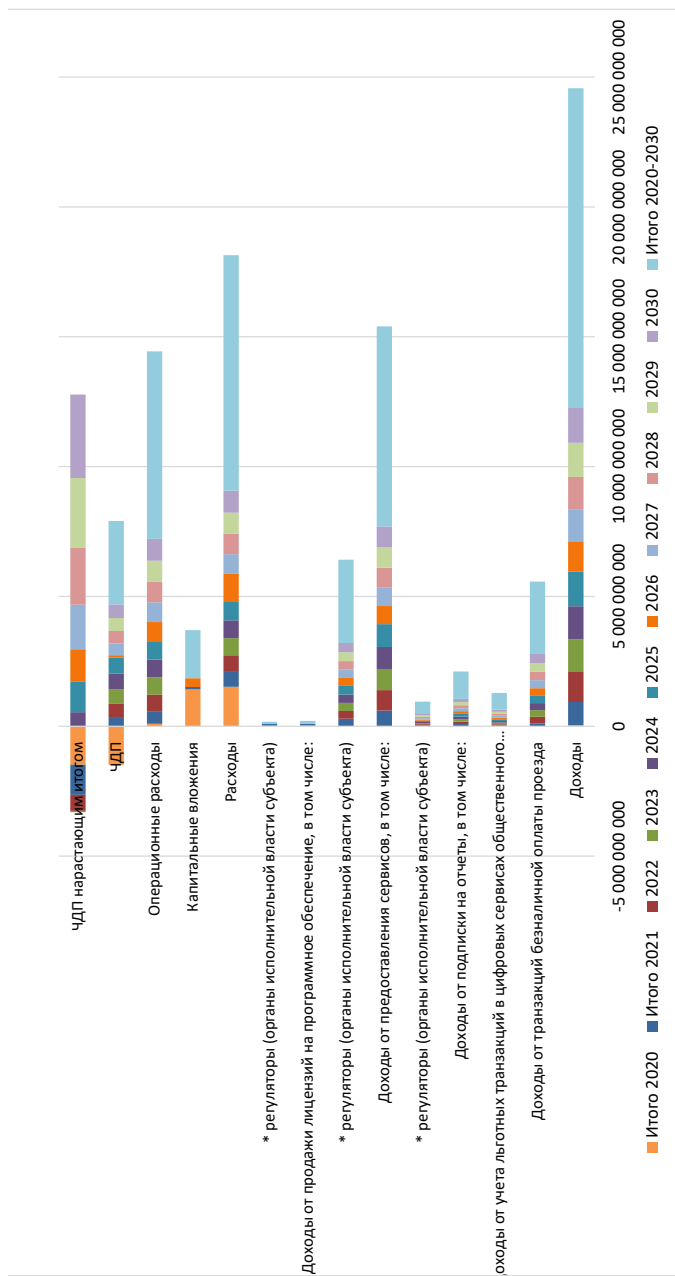


Рисунок 5 – Комплексная экономическая модель проекта внедрения ЦТЭС в Ленинградской области

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных научно-методических исследований, реализованных в новых математических моделях, разработана методика формирования автобусных маршрутов в цифровых транспортных экосистемах. При создании методики формирования маршрутной сети применялись аналитические модели теории принятия решения в информационных ситуациях, характеризуемых как ситуации с неопределенным состоянием среды исследования. Эффективность разработанной методики формирования автобусных маршрутов в цифровых транспортных экосистемах достигается за счет использования современных цифровых ресурсов и алгоритмов, позволяющих производить «он-лайн» мониторинг пассажиропотоков и объективную аналитическую обработку больших объемов данных при формировании графика движения автобусов. Для достижения цели исследования решены следующие задачи:

1. Разработана концептуальная архитектура системы контроля и управления движения автобусов в ЦТЭС.
2. Разработаны аналитические модели формирования автобусных маршрутов, позволяющих учитывать неограниченное количество критериев эффективности и качества транспортных услуг.
3. Определен необходимый набор цифровых сервисов, обеспечивающих универсальный комплексный мониторинг основных параметров технологических параметров ЦТЭС и информационно-платежных функций.
4. Разработаны алгоритмы автоматизированного построения расписания автобусов, позволяющие синхронизировать мультимодальные поездки пассажиров в сложных пассажирских системах.
5. Разработана структура сервисно-ориентированной организации пассажирской транспортной системы с элементами цифровых сервисов.
6. Выполнена апробация и экономическое обоснование методики формирования автобусных маршрутов в комплексе с ИПС основанной цифровых сервисах.

Эффективность разработанной методики формирования автобусных маршрутов в цифровых транспортных экосистемах подтверждена апробацией её в ряде экспериментальных исследований и испытаний, показавшим улучшение важнейших качественных показателей транспортного обслуживания населения: среднее время поездки для пассажиров, с учётом сокращения времени ожидания автобуса сократилось на 20...25 % при повышении коэффициента наполнения автобусов на 10 % при соблюдении обязательных требований комфортабельности (поездки только на сидячих местах).

Разработанный в исследовании научно-методический подход является необходимым компонентом эффективного развития НГПТ в РФ в направлении создания интеллектуальной системы управления пассажирским транспортом, посредством формирования ЦТЭС отдельных регионов с последующее интеграцией в единую систему.

Поэтому разработанные в исследовании инструменты решения задач управления в ЦТЭС, а именно, методика формирования автобусных маршрутов в цифровых транспортных экосистемах является решением важной народнохозяйственной проблемы гарантированного повышения качества транспортных услуг, предоставляемых населению в РФ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ:

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. Горелик С.Л. Методология формирования региональной системы транспортной мобильности поколения на основе универсальных цифровых сервисов / Горелик С.Л. Арифуллин И.В. Терентьев А.В. **Иванов И.А.**// ВИНТИ РАН. Транспорт: наука, техника, управление, 2020. №7, – С.4–49.

2. **Иванов, И.А.** Аналитическая модель формирования автобусных маршрутов в цифровой транспортной экосистеме / **И.А. Иванов**, А.В. Терентьев // Вестник гражданских инженеров. – СПб: СПбГАСУ, 2020. № 5 (82). С. 194–198.

Публикации в изданиях, индексируемых международной системой цитирования Scopus и Web of Sciens

1. **Ivanov I**, Digital platform and ecosystem for providing regional transport mobility / **Ivanov I**, Terentyev A., Yevtukov S // Transportation Research Procedia 50 (2020) 211–217.

Патенты, имеющие государственную регистрацию

1. Горелик С.Л., **Иванов И.А.**, Лещинский В.В., Носков К.Ю., Способ оплаты проезда в общественном транспорте / Патент РФ. № охранного документа 0002646396, Дата охранного документа, 02.03.2018, <https://findpatent.ru/patent/264/2646396.html>

Публикации в прочих изданиях, индексируемых в РИНЦ

1. Горелик С.Л. Эволюция научных дисциплин с точки зрения теории информации / С.Л. Горелик, **И.А. Иванов**, Я.Г. Марков, М.А. Чернышкова // Информатика, вычислительная техника и управление. Серия: «Естественные и технические науки». Май, 2016, № 5. С. 38–42.

2. Горелик С.Л. Третье поколение территориальных пассажирских транспортных систем / С.Л. Горелик, **И.А. Иванов**, В.В. Лещинский, А.А. Малахов / Материалы Юбилейной XV Санкт-Петербургская международной конференции «Региональная информатика (РИ-2016)». Санкт-Петербург, 26–28 октября 2016 г.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 09.09.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 72.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.