

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Ефремова Виктория Александровна



КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ
АВТОМАТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Специальность 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Сафиуллин Р.Н.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1 Анализ развития современных технологий на транспортно-технологических машинах.....	12
1.2 Анализ нормативно-регулирующих документов, устанавливающих уровни автоматизации транспортно-технологических машин.....	14
1.3 Принципы построения функциональной и физической архитектуры транспортно-технологических машин	16
1.4 Анализ существующих компонентов автоматизированной системы управления движением транспортно-технологических машин.....	23
1.5 Выводы по Главе 1	27
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЦЕНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ УРОВНЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН.....	29
2.1 Моделирование функциональных возможностей транспортно-технологических машин	29
2.2 Анализ влияния автоматизированных систем управления на функциональные свойства транспортно-технологических машин	37
2.3 Определение весовых коэффициентов функциональных свойств транспортно-технологических машин	41
2.4 Определение критерия автоматизации транспортно-технологической машины	45
2.5 Алгоритм определения уровня автоматизации транспортно-технологических машин	48
2.6 Практическая реализация метода технологической оценки уровня автоматизации транспортно-технологической машины.....	51
2.7 Выводы по Главе 2	52

ГЛАВА 3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН.....	55
3.1 Методика построения функциональной и физической архитектур автоматизированных систем управления транспортно-технологических машин .	55
3.2 Определение эффективности торможения и расчет тормозного пути транспортно-технологической машины.....	58
3.3 Определение показателей эффективности системы экстренного торможения	61
3.4 Имитационное моделирование системы экстренного торможения транспортно-технологических машин	61
3.4.1 Методика экспериментального исследования	61
3.4.2 Определение показателей системы экстренного торможения при варьировании различных уровней автоматизации транспортно-технологических машин	66
3.5 Моделирование влияния внедрения автоматизированных систем управления ТТМ на технико-эксплуатационные показатели перевозочного процесса.....	70
3.5.1 Методика экспериментального исследования	70
3.5.2 Формирование имитационной модели перевозочного процесса	71
3.5.3 Обработка результатов исследования.....	77
3.6 Выводы по Главе 3	80
ГЛАВА 4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ РЕШЕНИЙ. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ.....	82
4.1 Результаты исследования по оценке влияния автоматизированных систем управления на эффективность перевозочного процесса.....	82
4.2 Определение параметров оценки ручного управления транспортно-технологических машин на различных уровнях их автоматизации	84
4.3 Разработка модели нормирования ручного управления транспортно-технологической машины	90
4.4 Аналитический аппарат оценки степени автоматизации транспортно-технологических машин	94

4.5 Технико-экономическое обоснование предлагаемых решений	97
4.5.1 Расчет суммарных затрат на автоматизацию ТТМ.....	97
4.5.2 Определение затрат на автоматизацию транспортно-технологических машин минерально-сырьевого комплекса.....	99
4.6 Выводы по Главе 4	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патенты на изобретения.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения ПАО «КАМАЗ».....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт внедрения НПП «ЭЛВО».....	127

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Изменение качественных и количественных показателей транспортно-технологических машин при применении автоматизированных систем управления движением при одновременном увеличении объема перевозки грузов приводят к необходимости повышения эффективности управленческих решений по оптимизации процесса перевозки транспортно-технологическими машинами (ТТМ).

В соответствии с приоритетными направлениями научно-технологического развития в сфере информационных технологий, утвержденных Указом Президента РФ № 529 от 18.06.2024 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» и международным стандартом SAE J3016 «Классификация, термины и определения систем автоматизированного управления движением АТС» возникает необходимость использования интеллектуальных транспортных систем в процессе организации доставки грузов на основе научно-обоснованных принципов формирования управленческих решений. Создание аналитического аппарата количественной и качественной оценки уровня автоматизации ТТМ с привлечением научного потенциала в сфере перевозочного процесса транспортно-технологических машин при внедрении автоматизированных систем управления в сегментах грузовых перевозок и горнодобывающей отрасли (при переходе с 3 уровня на 4 уровень автоматизации ТТМ) позволит повысить эффективность перевозок за счет снижения человеческого фактора в процессе эксплуатации ТТМ.

Разработка соответствующих количественных и качественных показателей оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин требует проведения научного анализа существующих подходов к определению уровня автоматизации ТТМ и поиска резервов обеспечения эффективности грузоперевозок.

Степень разработанности темы исследования. По вопросу определения уровня автоматизации ТТМ с учетом применения автоматизированных систем их

управления проведены обширные исследования отечественными и зарубежными учеными и специалистами, и рассматривались в работах: Жанказиева С.В., Макаровой И.В., Шаталовой Н.В., Малыгина И.Г., Гаврилова А.А., Сафиуллина Р.Р., Зотова В.Г., Кузнецова В.И., Литвинова А.С., Маркова В.А., Павлова А.Н., Петрова И.П., Смирнова А.В., Титова В.С., Чернышева В.В., Швецова В.И. и др.

Несмотря на значительный объем теоретических и экспериментальных исследований по установлению показателей уровня автоматизации ТТМ при внедрении автоматизированных систем их управления установлено, что до настоящего времени научно-методический аппарат количественной и качественной оценки уровня автоматизации ТТМ не разработан, не существуют методики для оценки уровня автоматизации, а эффективность использования ТТМ при варьировании их уровней автоматизации не в полной мере возможно оценить.

Объектом исследования являются уровни автоматизации транспортно-технологических машин.

Предметом исследования являются методы, алгоритмы, модели комплексной аналитической оценки уровней автоматизации транспортно-технологических машин.

Целью работы является повышение эффективности системы управления перевозочным процессом доставки грузов транспортно-технологических машин посредством сформированного научно-методического аппарата количественной и качественной оценки их уровня автоматизации с использованием частных методов принятия управленческих решений.

Идея работы заключается в разработке комплексного аналитического аппарата оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин с целью повышения эффективности перевозочного процесса с учетом определения количественных и качественных показателей оценки уровня их автоматизации.

Задачи исследования:

1. Провести анализ влияния внедрения автоматизированных систем управления движением транспортно-технологических машин на их эксплуатационную эффективность.

2. Разработать техноценологический метод оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин с учетом оценки влияния автоматизированных систем управления транспортно-технологических машин на их функциональные свойства.

3. Обосновать метод нормирования ручного управления транспортно-технологических машин на основе разработанного обобщенного критерия их автоматизации.

4. Сформировать аналитический аппарат оценки степени автоматизации транспортно-технологических машин на основе изменения их функциональных свойств при внедрении систем управления движением транспортно-технологических машин.

5. Разработать предложения и практические рекомендации по внедрению результатов исследований и их технико-экономическая оценка.

Научная новизна работы заключается в создании научно-обоснованного методического аппарата оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин, а именно:

1. Сформирован обобщенный критерий оценки уровня автоматизации ТТМ - Уавт, на основе установленных системообразующих факторов производительности грузоперевозок, то есть их функциональных свойств, позволяющих определить границы обобщенного критерия.

2. Разработан техноценологический метод оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин, позволяющий рационально реализовать функциональные свойства транспортно-технологических машин в условиях варьирования уровней автоматизации.

3. Предложен метод нормирования ручного управления транспортно-технологической машины, включающий алгоритм оценки уровня ее автоматизации и коэффициент ручного управления транспортно-технологических машин.

4. Разработан аналитический аппарат количественной и качественной оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы по пунктам:

3. Формализованные методы обработки, анализа и передачи информации в интеллектуальных транспортных системах, применение информационных, телематических и биоинформационных технологий для управления транспортными системами, процессами и транспортными средствами.

7. Теоретические основы и методы моделирования транспортных технологических процессов с целью автоматизированного поиска эффективных решений и интеллектуальных алгоритмов управления транспортными системами, объектами транспортной инфраструктуры, одиночными транспортными средствами.

12. Нормативное регулирование разработки и реализации интеллектуальных транспортных систем.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обоснованы модели и алгоритмы построения программно-технического комплекса транспортно-технологических машин, на основе установленных закономерностей влияния автоматизированных систем управления ТТМ на их функциональные свойства.

2. Предложена методика аналитической оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин с учетом реализации их функциональных свойств.

3. Доказана эффективность применения методик и алгоритмов определения уровня автоматизации транспортно-технологических машин с целью совершенствования системы управления дорожно-транспортным комплексом (патенты на изобретения № 2798641, №2849087, Приложение А).

4. Результаты исследования, включая техноценологический метод аналитической оценки уровня автоматизации ТТМ и практические рекомендации по формированию функциональной архитектуры транспортно-технологической машины, внедрены в деятельность ПАО «КАМАЗ» (акт внедрения

диссертационных исследований от 10.08.2025, Приложение Б) и НПП «ЭЛВО» (акт внедрения диссертационных исследований от 04.02.2026, Приложение В).

Методология и методы исследования. При проведении исследования использовались методы математического и имитационного моделирования, системного анализа, декомпозиции, экспертного опроса и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный обобщенный критерий аналитической оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин – $K_{авт}$, учитывающий специфику их применения и степень реализации функциональных свойств транспортно-технологических машин при применении автоматизированных систем управления движением, позволяет установить границы уровней автоматизации транспортно-технологических машин.

2. Предложенный метод нормирования рабочего времени водительского состава на основе разработанного коэффициента ручного управления транспортно-технологических машин позволяет установить взаимосвязь повышения степени их автоматизации и производительности, которая варьируется в пределах 15-25 %.

3. Использование разработанного аналитического аппарата оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин позволяет определять количественные и качественные показатели их автоматизации, при внедрении которого установлено повышение эффективности перевозочного процесса - на 40%.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием методов математического моделирования, проведением имитационного моделирования в верифицированных программах совместно предприятиями транспортной отрасли, подтверждены сопоставлением результатов исследования с данными практики предприятий, на основании которых получены акты внедрения и защищены патентами.

Апробация результатов диссертации проведена на 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 6 международных; за последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных:

1. Международная научно-практическая конференция «Транспорт России: проблемы и перспективы» (09-10 ноября 2022, г. Санкт-Петербург).

2. XV Международная научно-техническая конференция «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» (26-29 октября 2022, г. Санкт-Петербург).

3. XXXVI Национальная (с международным участием) научно-техническая конференция «Улучшение эксплуатационных показателей и технический сервис автомобилей, тракторов и двигателей» (23-24 марта 2023, г. Санкт-Петербург).

4. IX Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и инновации на транспорте» (15-18 мая 2023, г. Орёл).

5. II Международная научно-практическая конференция «Сейфуллинский чтения» (17 ноября 2023, г. Астана).

6. Международная научно-практическая конференция «Транспорт. Взгляд в будущее» (07-08 ноября 2024, г. Санкт-Петербург).

7. II Международный Форум «Подъемная сила. Инновационное развитие подъемно-транспортного машиностроения» (14 ноября 2025, г. Москва).

Личный вклад автора состоит в выполнении теоретических и экспериментальных исследований, в том числе сбор и обработка статистических данных, формирование методик, моделей и алгоритмов по разработке методики количественной и качественной оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 11 печатных работах (пункты списка литературы № 24, 65, 67, 68, 71-74, 77, 78, 113), в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы

основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получены 2 патента на изобретение (пункты списка литературы № 57, 58, Приложение А)

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований, и 3 приложения. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков и 43 таблицы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ развития современных технологий на транспортно-технологических машинах

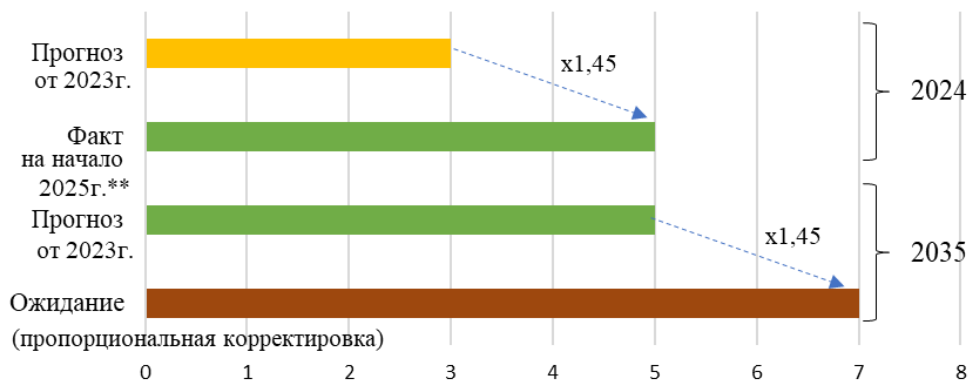
В настоящее время в связи с ускоренным технологическим прогрессом и приоритетом перехода к передовым производственным технологиям с целью создания интеллектуальной транспортной системы (ИТС), охватывающей всю транспортную отрасль, вопрос автоматизации транспортных средств стал особенно актуальным. Задача повышения степени цифровой зрелости ИТС производится за счет построения комплексной системы, которая решает множество частных задач, направленных на [77]:

- сокращение смертности при дорожно-транспортных происшествиях, за счет сокращения человеческого фактора в процессе управления транспортным средством;
- фиксация нарушений правил дорожного движения и оперативная передача данных требуемым службам;
- контроль внимания водителей за счет фиксации взгляда и местонахождения рук;
- увеличение пропускной способности дорог и формирование предиктивной аналитики дорожного движения;
- поиск оптимальных маршрутов на основании данных, получаемых в режиме реального времени, и др.

Анализ состояния вопроса показал, что рост доли автоматизированных ТТМ мирового парка ежегодно увеличивается (рисунок 1).

Особенно эффективен процесс автоматизации на горном транспорте за счет использования программно-аппаратных компонентов и технологий, соединяющих уровни предприятия минерально-сырьевого комплекса [119]. Исследование статистики влияния повышения уровня автоматизации ТТМ способствует приросту производительности ТТМ до 35% за счет сокращения человеческого фактора в процессе ее эксплуатации (рисунок 2).

**Рост доли автоматизированных карьерных
самосвалов, мир**
(в парке 55 тыс. ед. в 2025 г. и 90 тыс. ед. - в 2033 г.)*

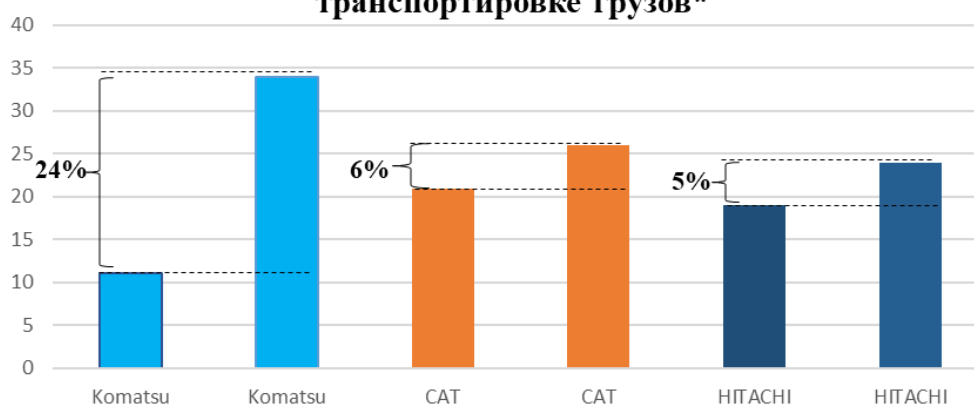


*На основании прогноза Parker Bay, 2022, от мирового парка

**Согласно отчетам International Mining по итогам 2024г.

Рисунок 1 – Статистика увеличения роста доли автоматизированных карьерных самосвалов (составлено автором)

**Прирост производительности ТТМ до 35% при
транспортировке грузов***



* По данным Komatsu, CAT, Hitachi

Рисунок 2 – Прирост производительности ТТМ (составлено автором)

Сообщество автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers (SAE)) разработало стандарт SAE J3016, который определяет шесть уровней автоматизации транспортно-технологических машин (таблица 1), определяющие задачи динамического вождения для каждого уровня автоматизации, роль водителя и системы в процессе ее эксплуатации [118]. Промышленные и исследовательские сообщества работают над возможностью перевода ТТМ с уровня условной автоматизации на уровень высокой автоматизации посредством внедрения автоматизированных систем управления движением (АСУД) ТТМ, а именно электронных систем автомобиля - АДАС.

Таблица 1 – Уровни автоматизации ТТМ в соответствии стандарту SAE J3016 [43]

Уровень	Режим	Описание	Управление ТТМ в случае нештатных ситуаций
0	Ручное управление	Полное управление ТТМ осуществляет водитель	Водитель
1	Помощь автоматизированных систем в управлении частными задачами по информированию водителя	Управление ТТМ осуществляет водитель с использованием информационной поддержки	Водитель
2	Частичная автоматизация	Одна из систем управления автоматизирована	Водитель
3	Условная автоматизация	Часть функций выполняет ТТМ	Водитель, система
4	Высокая автоматизация	Система выполняет задачи управления ТТМ в ограниченном контуре	Система
5	Полная автоматизация	Водитель может быть заменен на удаленного оператора	Система

Однако, автоматизация ТТМ должна проводиться в соответствии с повышением цифровизации транспортной инфраструктуры, которое необходимо для возможности их взаимодействия как единой системы, позволяя достигать максимальной эффективности эксплуатации ТТМ [80, 117].

1.2 Анализ нормативно-регулирующих документов, устанавливающих уровни автоматизации транспортно-технологических машин

В связи с установленной необходимостью повышения уровня автоматизации ТТМ и цифровизации элементов ТИ приказом Росстандарта от 30 июля 2018 года № 1600 «Об утверждении Программы национальной стандартизации на 2018 год» утверждена Программа национальной стандартизации на 2018 год, которая включает в себя разработку ГОСТов в сфере интеллектуально-транспортных систем по направлениям (таблица 2).

Таблица 2 – Нормативная документация по направлению автоматизации ТТМ (по данным автора)

Шифр национального стандарта	Наименование проекта
ГОСТ Р 1.2.057-1.001.17	Идентификация объектов в транспортном средстве.
ГОСТ Р 1.2.057-1.002.17	Принципы автоматического распознавания ДТП в рамках задач транспортной инфраструктуры.
ГОСТ Р 1.2.057-1.003.17	Стационарная система мониторинга метеоусловий в комплексе задач информационной системы управления состоянием дороги при развитии ИТС.

Распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации № АК-247-р от 30 сентября 2022 года была утверждена Концепция создания и функционирования национальной сети интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования. Основная поставленная цель – создать и развить интегрированные в транспортное средство цифровые сервисы [116]. Поставленная цель будет достигаться за счет формирования единых нормативных правовых национальных стандартов, унификации требований к бортовому оборудованию, внедрению «бесшовной» логистической системы [77]. Концепция включает в себя 5 этапов, которые предполагается осуществить в срок не позднее 2035 года [14-16, 76]:

1. Разработка и принятие нормативно-правовых документов, которые регламентируют требования к созданию и внедрению интеллектуально-транспортных систем.

2. Формирование технологического сегмента национальной сети интеллектуально-транспортной системы – разработка основной конфигурации федеральной платформы национальной сети, внедрение систем на дороги общего пользования, формирование общих требований и создание тестовой зоны интеллектуально-транспортных систем.

3. Формирование систем отслеживания функционирования технологического сегмента национальной сети – создание систем мониторинга.

4. Завершение работ по формированию технологического сегмента – создание облачной базы по платформе и подсистемам интеллектуальных транспортных систем, формирование базовых цифровых сервисов транспортных средств, перевод разработок в режим полноценной эксплуатации, с целью обеспечения бесперебойного функционирования национальной сети ИТС, проведение программ международного сотрудничества для объединения информационных баз и обеспечения совместимости оборудования и технологий ИТС.

Однако все проведенные исследования, а также нормативно-техническая документация в области оснащения ТТМ автоматизированными системами ее управления, не регламентируют состав оборудования в зависимости от типа машин и специфики ее эксплуатации, а также до сих пор не установлены границы уровней автоматизации ТТМ, что делает невозможным полноценный переход к формализованной структуре ИТС.

1.3 Принципы построения функциональной и физической архитектуры транспортно-технологических машин

Согласно проведенным исследованиям, около 94% дорожно-транспортных происшествий (ДТП) происходит по причине невнимательности водителя и ошибок действий человека в процессе эксплуатации. По предварительным прогнозам, при успешном внедрении систем автоматизации на ТТМ ежегодные социальные и экономические выгоды составят более 800 миллиардов долларов к 2050 году, за счет повышения пропускной способности дорог, сокращение числа ДТП, снижения энергопотребления, повышения производительности ТТМ. Кроме того, это значительно повысит безопасность эксплуатации ТТМ. Однако архитектура ИТС еще не доведена до требуемого уровня цифровизации в связи с отсутствием единой методологии внедрения автоматизированных систем управления в состав ТТМ и элементы ТИ [33-35].

Архитектура интеллектуальной транспортной системы формирует концептуальную основу системы управления движения ТТМ и определяет, какие функции выполняются в автоматизированном и ручном режимах, какие

подсистемы взаимодействуют при этом и какие информационные потоки используются [105]. Согласно ГОСТ Р 56294-2014 архитектура ИТС описывается через функциональную и физическую архитектуры, а также через архитектуру данных и коммуникаций. Функциональная архитектура описывает, какие именно функции реализуют подсистемы ИТС за счет подсистем мониторинга, управления, информирования, планирования и позиционирования ТТМ, в каком порядке эти функции выполняются и как они взаимосвязаны. Физическая архитектура устанавливает, какими техническими средствами - центрами управления, автоматизированными системами управления, каналами связи реализуются заданные функции элементами ИТС [75].

В национальных стандартах подчёркивается необходимость иерархического подхода к построению архитектуры: система делится на уровни управления, каждый из которых решает свои задачи и опирается на собственный набор сервисов. На верхнем, стратегическом уровне формируются долгосрочные цели развития транспортной системы и ИТС: определяются приоритетные направления развития инфраструктуры, принимаются решения о внедрении новых подсистем, утверждаются нормативные документы и программы развития [110]. Для этого уровня характерны планово-аналитические функции, работа с агрегированными показателями и сценарный анализ. На среднем, тактическом уровне реализуются функции планирования и настройки режимов работы подсистем ИТС: разрабатываются схемы организации дорожного движения, планы координации светофорных объектов [17, 18, 36], правила приоритизации транспорта, режимы использования полос движения и прочее, причём эти решения обновляются в режиме реального времени на основании данных, получаемых с объектов транспортной инфраструктуры. На нижнем, оперативном уровне осуществляется непосредственное управление в реальном времени: выполняется обработка телеметрии от детекторов, принимаются решения о переключении фаз светофоров, изменении ограничений скорости, включении или отключении переменных знаков, рассылке информационных сообщений пользователям (рисунок 3).



Рисунок 3 - Иерархия уровней управления ИТС (составлено автором)

Такая многоуровневая структура управления требует чёткого разделения ответственности между уровнями и согласованного распределения функций. На стратегическом уровне формулируются цели и критерии эффективности (например, снижение времени поездки и аварийности) [11-13], на тактическом уровне эти цели трансформируются в набор управленческих решений и регламентов, а на оперативном уровне реализуются конкретные управляющие воздействия с использованием технических средств ИТС. При этом архитектура должна предусматривать обратную связь: результаты работы оперативного уровня (фактические значения показателей движения, показатели аварийности, загрузки сети) поступают на верхние уровни и учитываются при корректировке стратегий и планов. архитектура ИТС должна быть открытой и масштабируемой, чтобы допускать постепенное добавление новых подсистем, сервисов и каналов обмена данными без радикальной перестройки существующей системы [37-39].

Особое значение в архитектуре ИТС имеет интеграционная платформа, обеспечивающая обмен данными между разнородными подсистемами и внешними системами [8-10]. Требования к интеграционной платформе и взаимодействию подсистем закреплены в современных национальных стандартах на подсистемы ИТС, принятых в 2023 году. Наличие такой платформы позволяет объединять данные о дорожной обстановке, дорожных работах, погоде и авариях

в едином информационном пространстве и на этой основе реализовывать комплексные алгоритмы управления. В рамках архитектуры также формализуются интерфейсы между подсистемами, требования к обмену данными, форматы сообщений, уровни доступа и требования к информационной безопасности, что превращает ИТС в устойчивую, управляемую и расширяемую инфраструктуру, а не набор несвязанных автоматизированных систем (рисунок 4).



Рисунок 4 - Структура ИТС [76]

Теоретическая база построения интеллектуальных транспортных систем носит междисциплинарный характер и опирается на совокупность подходов из теории управления, теории систем, транспортной науки, теории массового обслуживания, теории вероятностей и статистики, а также информационных и телекоммуникационных технологий [7, 40]. Центральным элементом является системный подход, согласно которому транспортная система рассматривается как многофакторная система с множеством взаимодействующих подсистем — транспортных потоков, инфраструктуры, участников движения, служб эксплуатации, органов управления. Системный анализ позволяет выделять уровни иерархии, формулировать цели и критерии эффективности, проводить декомпозицию крупной задачи управления на ряд более узких задач, которые можно решать специализированными подсистемами ИТС [106].

Управление транспортной системой в рамках ИТС рассматривается как процесс формирования и реализации управляющих воздействий на основы транспортного процесса в условиях значительной неопределённости и вариативности внешних факторов. Теоретический аппарат оптимального и адаптивного управления используется для разработки алгоритмов, минимизирующих заданные критерии (задержки, потери времени, длину очередей, риск аварий) при выполнении установленных ограничений.

С развитием вычислительной техники и сенсорной инфраструктуры в теоретическую базу ИТС внедряются методы анализа больших данных с использованием искусственного интеллекта. Большие объёмы информации, поступающие от детекторов движения, видеокамер, навигационных систем и пользовательских устройств, требуют применения алгоритмов статистического анализа, машинного обучения и распознавания объектов в процессе движения ТТМ, на основе которых строятся предиктивные модели.

Теоретическая база ИТС включает принципы построения телекоммуникационных сетей, протоколы обмена данными и концепции киберфизических систем. Связь между элементами ИТС реализуется через проводные и беспроводные сети, в том числе специализированные сети связи с транспортными средствами и дорожной инфраструктурой. Теория телекоммуникаций определяет требования к пропускной способности, задержкам передачи, надёжности и отказоустойчивости каналов связи, а также определяет структуру сетей [41-43].

Автоматизированная система управления движением ТТМ, представляющая сочетание подсистем, предназначенных для обеспечения указанных функций управления и определяемых функциональной и физической архитектурой ТТМ, может быть расширена при помощи интегрированных технологий [73, 102]. Комплексные автоматизированные системы управления ТТМ и помощи водителю (АДАС) могут изменять показатели функциональных свойств ТТМ при переходе на более высокий уровень автоматизации (рисунок 5).

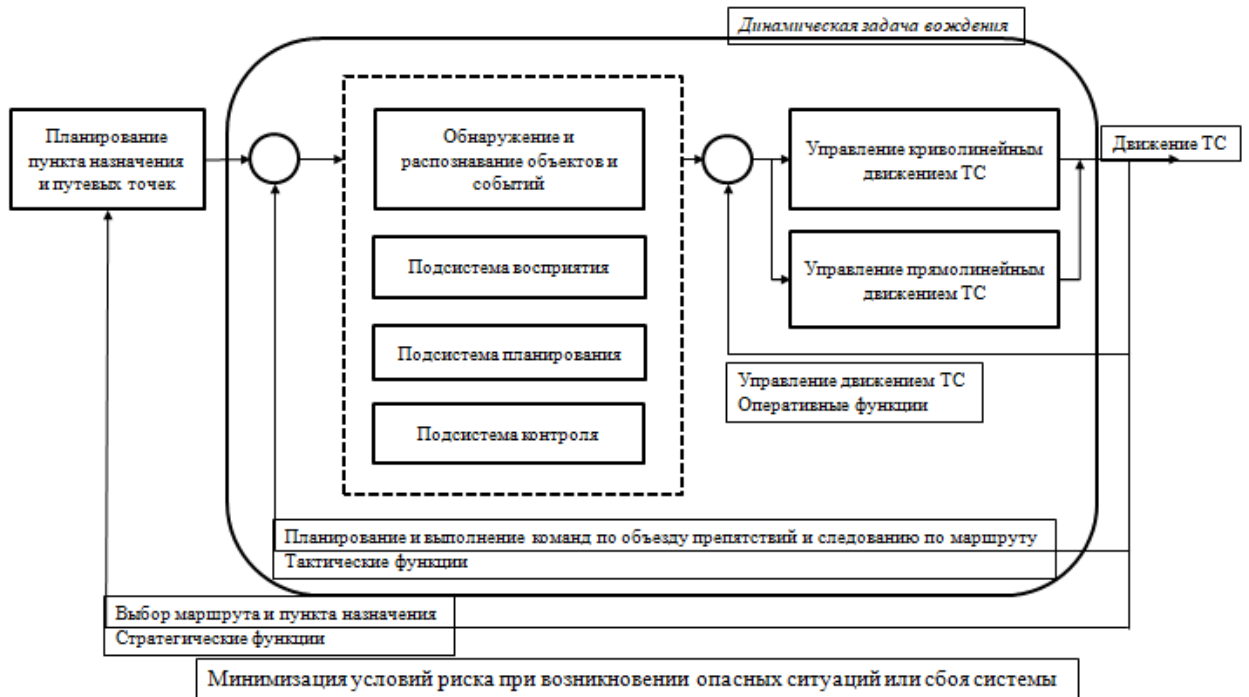


Рисунок 5 - Место DDT и OEDR в задачах управления ТТМ (составлено автором)

Необходимо учитывать выполнение задачи динамического вождения [19, 20], то есть комплекс операционных и тактических функций по принятию решений движения ТТМ, принимаемых в режиме реального времени [92]. Кроме того, при формировании методики оценки уровня автоматизации ТТМ важно учитывать область и специфику ТТМ и подключенность к транспортной инфраструктуре посредством системы V2X («Vehicle-to-everything» - автомобиль ко всему) (таблица 3) [71, 74].

Для функционирования ТТМ на уровне высокой автоматизации необходимо программно-аппаратное обеспечение [4-6], позволяющее взаимодействовать с инфраструктурной технологией V2X - технология связи, объединяющая дорожную инфраструктуру, транспортные средства и систему управления в единую информационную систему. При помощи данной технологии все элементы системы непрерывно обмениваются данными в режиме реального времени и на основе полученных данных осуществляют корректировку эксплуатации транспортно-технологических машин и принимают решения о дальнейших управленческих решениях [72].

Таблица 3 - Определение специфики эксплуатации ТТМ при определении задачи динамического вождения (по данным автора)

Задача динамического вождения (DDT)	Область эксплуатационного проектирования и условия эксплуатации (ODD), обнаружение и распознавание объектов и событий (OEDR)	
	Инфраструктура	Эксплуатационные ограничения
Условия, контролируемые автоматизированными системами управления движением ТТМ в рамках DDT – выполнение оперативных и тактических функций	<p>Управление траекторией движения посредством рулевого управления.</p> <p>Удерживание в полосе движения с заданной погрешностью.</p> <p>Сканирование информации о дорожной обстановке при помощи радаров, лидаров и камер.</p> <p>Осуществление реагирования функций управления и планирования действий.</p> <p>Планирование и обеспечение маневров.</p> <p>Передача и прием информации от объектов транспортной инфраструктуры.</p>	<p>Поддержание требуемой скорости.</p> <p>Поддержание требуемого расстояния между ТТМ.</p> <p>Непрерывный мониторинг функционирования систем ТТМ и поддержания их в установленных пределах.</p> <p>Расчет и поддержание необходимой кривизны движения.</p>

Степень взаимодействия ТТМ и транспортной инфраструктуры определяет подключенность ТТМ (рисунок 6).

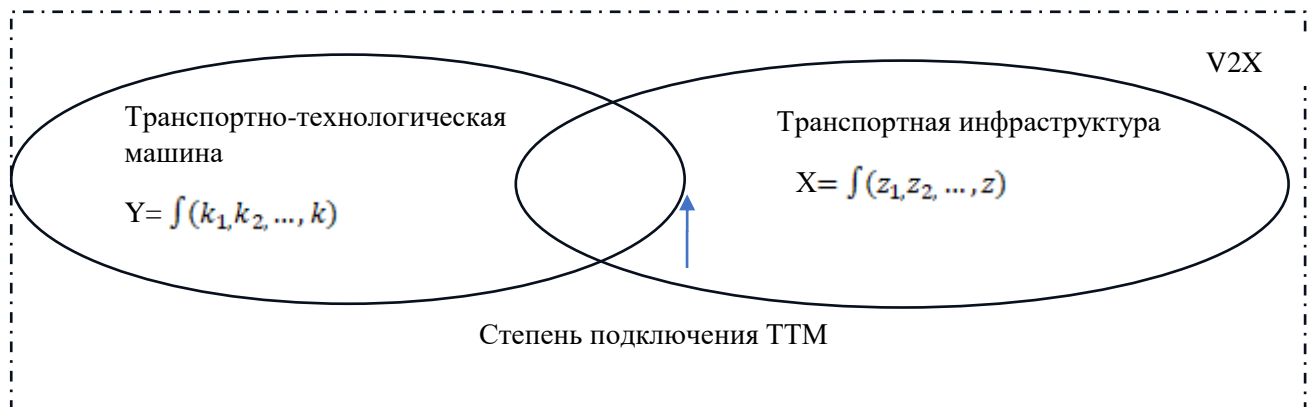


Рисунок 6 - Степень подключения ТТМ к транспортной инфраструктуре, где K_1, K_2, \dots, K_n – факторы, влияющие на подключенное ТТМ, Z_1, Z_2, \dots, Z_n – факторы, влияющие на подключенное транспортной инфраструктуры (составлено автором)

В настоящее время технология все еще находится на стадии разработки, требует тестирования и создания методического аппарата оценивания

эффективности от внедрения автоматизированных систем управления ТТМ (рисунок 7).



Рисунок 7 - Алгоритм сбора и обработки информации, получаемой с автоматизированных систем управления ТТМ в ИТС (составлено автором)

Автоматизированные системы управления ТТМ позволяют повышать функциональные свойства ТТМ и общую эффективность перевозочного процесса, но в связи с отсутствием комплексного метода оценки уровней автоматизации ТТМ в зависимости от внедряемых автоматизированных систем, не могут быть полноценно реализованы [115].

1.4 Анализ существующих компонентов автоматизированной системы управления движением транспортно-технологических машин

Основные компоненты (слои) автоматизированной ТТМ - уровни восприятия, планирования и контроля, позволяющие собирать, обрабатывать и

получать информацию о техническом состоянии транспортного средства, а также объектов транспортной инфраструктуры. Каждый из перечисленных компонентов отвечает за выполнение определенных функций и принятия решений [21-23]. Реализация межуровневого информационного взаимодействия позволяет достичь автоматизации транспортного средства (рисунок 8) [24].

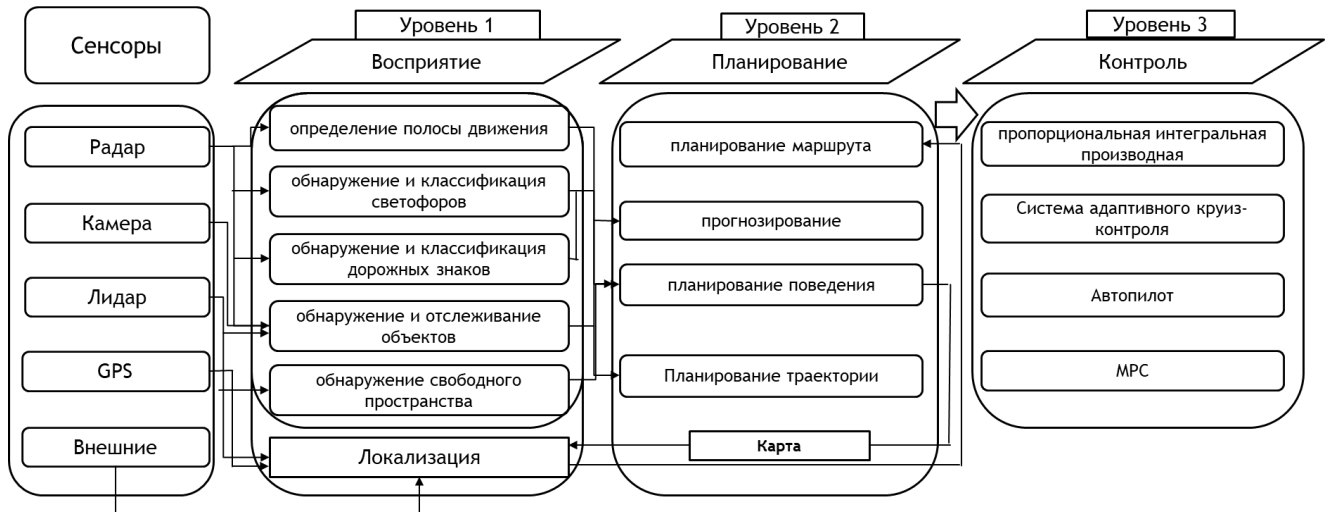


Рисунок 8 - Компоненты автоматизированной системы управления движением ТТМ (составлено автором)

Слой восприятия реализует функции, позволяющие ТТМ собирать и обрабатывать информацию об окружающей среде из различных источников. В этом компоненте проводится анализ находящихся рядом объектов, понимание состояния дорожного движения и потока, определение полос движения, восприятие знаков, светофоров и поворотов. Восприятие производится посредством внутренних и внешних источников [58, 71]. К внутренним относятся датчики транспортного средства, к внешним – элементы транспортной инфраструктуры и дороги. Корректное восприятие окружающей среды – решающий фактор для обеспечения безопасной навигации и поведения ТТМ. Система восприятие особенно значимо влияет на локализацию ТТМ и точное географическое положение на участке дорожной сети.

Планирование – процесс более высокого порядка, необходимый для реализации функции расчета последующих действий исходя из полученной информации. Основными 2 подзадачами являются глобальное планирование маршрута и локальное планирование пути ТТМ [69]. Глобально планирование

выполняет функции поиска маршрута в транспортной сети от начального до конечного пункта, то есть, нахождение кратчайшего пути между точками. Цель локального планирования – выполнить глобальный план так, как рассчитано, без препятствий. Планирование, основанное на глубоком обучении ТТМ, пока что не используются в полной мере [95, 96]. В данной сфере все еще требуется решение, связанные с определением мер безопасности, обобщения получаемых данных и их обработки. В условиях загруженной городской среды особенно важна детальная проработка системы планирования, которая бы учитывала множество факторов, таких как характеристика дороги, окружающие ТТМ и препятствия, здания и сооружения, круговые перекрестки, мосты, ремонтные участки и многое другое.

Система контроля не только обеспечивает выполнение задач предыдущих двух систем, но и оценивает уровни риска ситуаций, прогнозирования дальнейших обстоятельств, прогнозирование поведения водителя и пешехода, оценка риска неопределенной ситуации. Система должна работать бесперебойно, так как ошибки работы системы контроля могут привести к ДТП [24-26, 74]. В результате развития и внедрения систем контроля показатели безопасности ТТМ становятся выше на 60% [97].

Использование автоматизированных систем движения ТТМ ведет к реализации полностью автономного вождения. Системы автономного вождения состоят из задач на нескольких уровнях, описанных в разделе 1.2. На данный момент они достигли высокой точности, благодаря использованию архитектуры глубокого обучения. Датчики, используемые для решения задач восприятия (сегментация, оценка движения, обнаружение движущихся и статичных предметов и т.д.), могут быть эффективно объединены в многозадачную модель. Слияние датчиков повышает также значение безопасности, так как их совместное использование повышает вероятность все целостного обнаружения информации об окружающей обстановке [98]. Глубокое обучение подразумевает расширение нейронной сети во время обучения, чтобы модель научилась определять полезную функцию для своей задачи в конкретных ситуациях в режиме реального времени [77, 82]. На данный момент существует множество доступных алгоритмов

обучения ТТМ, но большинство из них являются контролируемыми или принудительными, в то время как развитие интеллектуальных-транспортных систем позволит сделать эту функцию полностью автоматизированной. Для сложных задач, таких как автоматизированное вождение, ведется разработка обобщаемой модели, которая сможет управлять автомобилем в различных средах при разнообразном наборе данных.

Глубокое обучение ТТМ можно также усовершенствовать путем слияния различных датчиков. Слияние датчиков в основном применяется для многоцелевого отслеживания и понимания ТТМ окружающей среды. Объединение многих источников информации обеспечивает комплексное использование информации, что позволяет избежать ограничений восприятия и неопределенностей при использовании одного датчика, формирует более полное восприятие и распознавание окружающей среды и улучшает способность системы к внешнему восприятию [67]. В настоящее время технология всесторонне применяется в таких областях, как обнаружение неисправностей, дистанционное зондирование, мониторинг состояния водителя, роботизированная система, взаимодействие водителя и ТТМ, цель распознавание и отслеживание, локализация и усовершенствованная система помощи водителю [27].

Глубокое обучение подразумевает создание набора случаев, происходящих при движении, то есть любые сценарии, которые могут произойти при вождении ТТМ. На основе набора этих сценариев, автоматизированная ТТМ имеет четкий алгоритм действий при любом происшествии. Использование глубокого обучения позволяет повысить производительность ТТМ до 9%, а скорость реакции на дорожную обстановку до 7% [66].

Основная проблема глубокого обучения – недостаточная база сценариев. В случае неполной базы сценариев, ТТМ не может самостоятельно принять решение о дальнейших действиях, также может возникнуть конфликт обучения, который происходит из-за двух или более одинаковых входных значений, но требований к разным целевым значениям.

При разработке системы важно четко анализировать набор выборок и входящие в систему входные данные с целью избежания сходства между ними. Однако это сложная многофакторная задача, так как при движении многие ситуации могут быть похожими [72, 93].

В дополнение к глубокому обучению, ТТМ может создавать модель поведения с минимальным участием человека [94]. В случае, если в наборе случаев присутствуют конфликты, то модель будет не совсем корректной и производительность системы ухудшится. Для решения этой проблемы ведутся разработки программно-аппаратного обеспечения, которое могло бы производить анализ наборов сценариев автоматически, исключая конфликтные сцены, но на данный момент оно не может быть полностью автоматизировано и требует контроля со стороны человека [67, 73, 74].

1.5 Выводы по Главе 1

Автомобильная промышленность в сотрудничестве с исследовательскими организациями разрабатывают множество автоматизированных систем управления ТТМ, внедряемых в состав техники, главная цель которых – повысить эффективность использования ТТМ, а вместе с тем повысить производительность предприятий.

Требования должны быть направлены на создание единой информационной базы для получения, хранения и обработки данных, получаемых с объединенных автоматизированных ТТМ, оборудования и центров обработки данных. Также должны быть урегулированы стандарты, предъявляющие требования к оборудованию и опорным технологиям ИТС, на основе общих принципов и в соответствии с общей моделью системы. Создание типовых сервисов и стандартов поможет повысить эффективность ТТМ, унифицировать виды систем, объединить информацию с автоматизированных систем управления движением ТТМ в единую базу. Однако для достижения данной цели необходимо установление требований к уровню подключенности ТТМ, который определяется, в первую очередь, оснащением транспортно-технологических машин и элементов транспортной инфраструктуры, а также определением четких границ между

уровнями автоматизации, которые на данный момент осложнены в связи с отсутствием:

- нормативно-технической базы, определяющей требования к минимальному составу электронных систем управления ТТМ;

- комплексной методики аналитической оценки уровней автоматизации ТТМ.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЦЕНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ УРОВНЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

2.1 Моделирование функциональных возможностей транспортно- технологических машин

Одним из требований к построению интеллектуальной транспортной системы является оснащение ТТМ автоматизированными системами управления ее движением, соответствующей требованиям подключения к транспортной инфраструктуре, с целью обеспечения эффективного взаимодействия между образцом и элементами транспортной инфраструктуры в конкретных условиях эксплуатации.

Для повышения уровня автоматизации ТТМ необходимо использование интеграционных технологий нового поколения, соответствующих степени цифровизации транспортной инфраструктуры [63-65, 71]. Внедрение продвинутых автоматизированных систем управления ТТМ позволит расширять функциональные свойства ТТМ, что особенно актуально на предприятиях минерально-сырьевого комплекса [109].

В процессе исследования установлено, что взаимодействие ТТМ и транспортной инфраструктуры не реализовано на требуемом уровне из-за несовместимости технического оснащения ТТМ с требованиями инфраструктуры. Кроме того, до сих пор не унифицировано применяемое на ТТМ оборудование и программное обеспечение, не разработана методика определения уровней автоматизации ТТМ. Оценка уровня автоматизации транспортно-технологической машины должна производиться не только с учетом ее технического оснащения, но и многих факторов, определяющих основные направления повышения автоматизации (таблица 4).

Таблица 4 - Показатели автоматизации ТТМ, способные повышать общий уровень автоматизации (по данным автора)

Показатель автоматизации	Подкритерий
Функциональная автоматизация	Выполнение функции автоматического рулевого управления; Поддержание функции автоматического торможения; Автоматическое ускорение; Автоматическая коробка передач
Техническая автоматизация	Наличие радара, камеры, лидара; Система слияния данных (сенсорное слияние); Вычислительная платформа; Поддержание системы V2X
Когнитивная автоматизация	Распознавание объектов; Прогнозирование поведения; Планирование траектории; Адаптация к условиям
Эксплуатационная автоматизация	Длительность возможной автономной работы без сбоев и ложных сигналов; Возможность поддержания движения без водителя; Самодиагностика; Регулирование энергопотребления
Показатели функциональной безопасности	Резервные системы; красный контур при отказе работы системы; Сертификация ISO 26262

С целью определения уровня автоматизации транспортно-технологической машины необходимо в первую очередь выделить ее функциональные свойства и степень их выполнения за счет внедрения автоматизированных систем управления движением в конкретных условиях эксплуатации [60-62]. Комплексная оценка технической оснащенности ТТМ, его функциональных свойств и подключенности к элементам транспортной инфраструктуры позволит сформировать техноценологический метод определения уровня автоматизации транспортно-технологической машины, что в дальнейшем приведет к возможности обоснованно совершать выбор автоматизированных систем управления, а следовательно, организовать полноценное функционирование интеллектуальной транспортной системы [89].

Формирование техноценологического метода определения уровня автоматизации транспортно-технологической машины производится путем определения основных параметров, то есть функциональных свойств транспортно-технологической машины, влияющих на эффективность ее функционирования [103, 113]. Каждое выбранное функциональное свойство характеризуется перечнем количественных или качественных показателей, позволяющих оценить степень реализации выбранного свойства, значения которых будут меняться при разных уровнях автоматизации и степени

подключенности к транспортной инфраструктуре (рисунок 9). Совокупность функциональных свойств формирует основу для техноценологического метода определения уровня автоматизации транспортно-технологической машины [59, 67, 72].

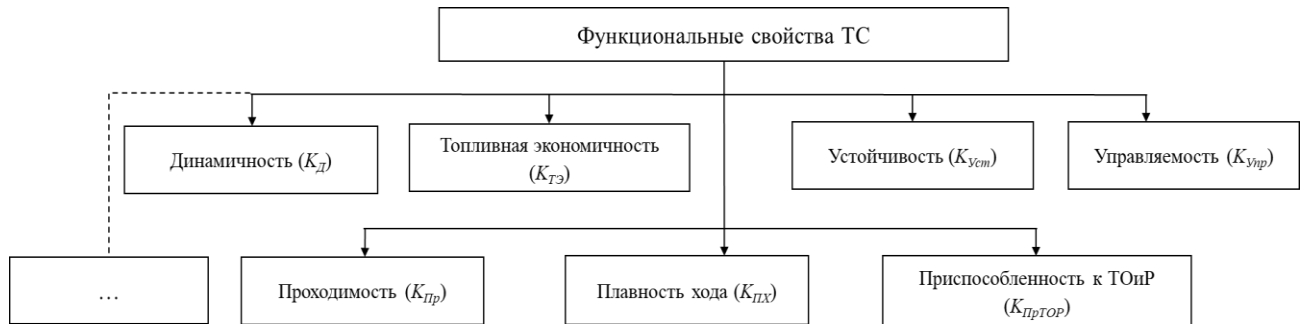


Рисунок 9 - Функциональные свойства транспортно-технологических машин
(составлено автором)

Для рационального определения уровня автоматизации транспортно-технологической машины необходимо провести сравнительный анализ влияния автоматизированных систем управления ее движением на эффективность функциональных свойств транспортно-технологической машины и выбрать тот комплекс, при котором каждое свойство будет иметь максимальное значение в конкретных условиях эксплуатации [81, 88].

Основными функциональными свойствами, подходящими для всех типов транспортно-технологических машин, определены динамичность, топливная экономичность, устойчивость, управляемость, проходимость, плавность хода, приспособленность к техническому обслуживанию и ремонту. Однако, совокупность и значимость функциональных свойств может изменяться в зависимости от назначения транспортно-технологической машины, условий ее эксплуатации, технико-технологических требований к производственному процессу, а также особенностей взаимодействия с транспортной инфраструктурой [56-58, 78]. Выбранные функциональные свойства подходят как для легкового и грузового транспорта, так и для транспорта, эксплуатируемого в условиях горно-добывающего производства, где основным подвижным составом являются карьерные самосвалы, бульдозеры, экскаваторы и специализированная техника. В то же время необходимо учитывать, что выбранные функциональные свойства

будут иметь разный вес значимости, что обусловлено спецификой эксплуатации разных транспортно-технологических машин. Для горной техники плавность хода и топливная экономичность, хотя и имеют высокую значимость, имеют меньший приоритет, чем возможность непрерывного технологического цикла, что определяется экономической составляющей эксплуатации [87]. В то время как в городских или междугородних транспортных системах, где основными типами эксплуатируемых ТТМ являются легковые и грузовые транспортные средства общего назначения, большим приоритетом обладают динамичность, топливная экономичность, плавность хода и управляемость. Таким образом, каждому функциональному свойству необходимо определить весовые коэффициенты, отражающие значимость реализации функционального свойства под конкретный тип транспортно-технологической машины и специфики ее эксплуатации [91].

На динамичность влияют скоростные и тормозные показатели транспортного средства, которые, в свою очередь, зависят от множества показателей, таких как максимальная и минимальная скорости, время разгона до 60 км/ч, время разгона на пути 400 м и прочее (рисунок 10).

Критерий эффективности реализации выбранного функционального свойства транспортно-технологической машины определяется при помощи оценки показателей свойства. Для функционального свойства динамичности основными показателями являются тормозные и скоростные свойства, при этом, чем выше степень реализации функционального свойства за счет влияния автоматизированных систем управления движением ТТМ, тем выше уровень автоматизации транспортно-технологической машины (1):

$$K_D = f(K_{cc}, K_{trc}) \rightarrow max, \quad (1)$$

где $K_{cc} = f(K_{Vmax}, K_{Vmin}, K_{tV-60}, K_{tS-400}, K_{tS-1000}, K_{S-50}) \rightarrow max$;

$$K_{trc} = f(K_{PTC}, K_{ZTC}, K_{CTC}) \rightarrow max.$$

По аналогии составлена архитектура показателей приспособленности к техническому обслуживанию и ремонту (рисунок 11).

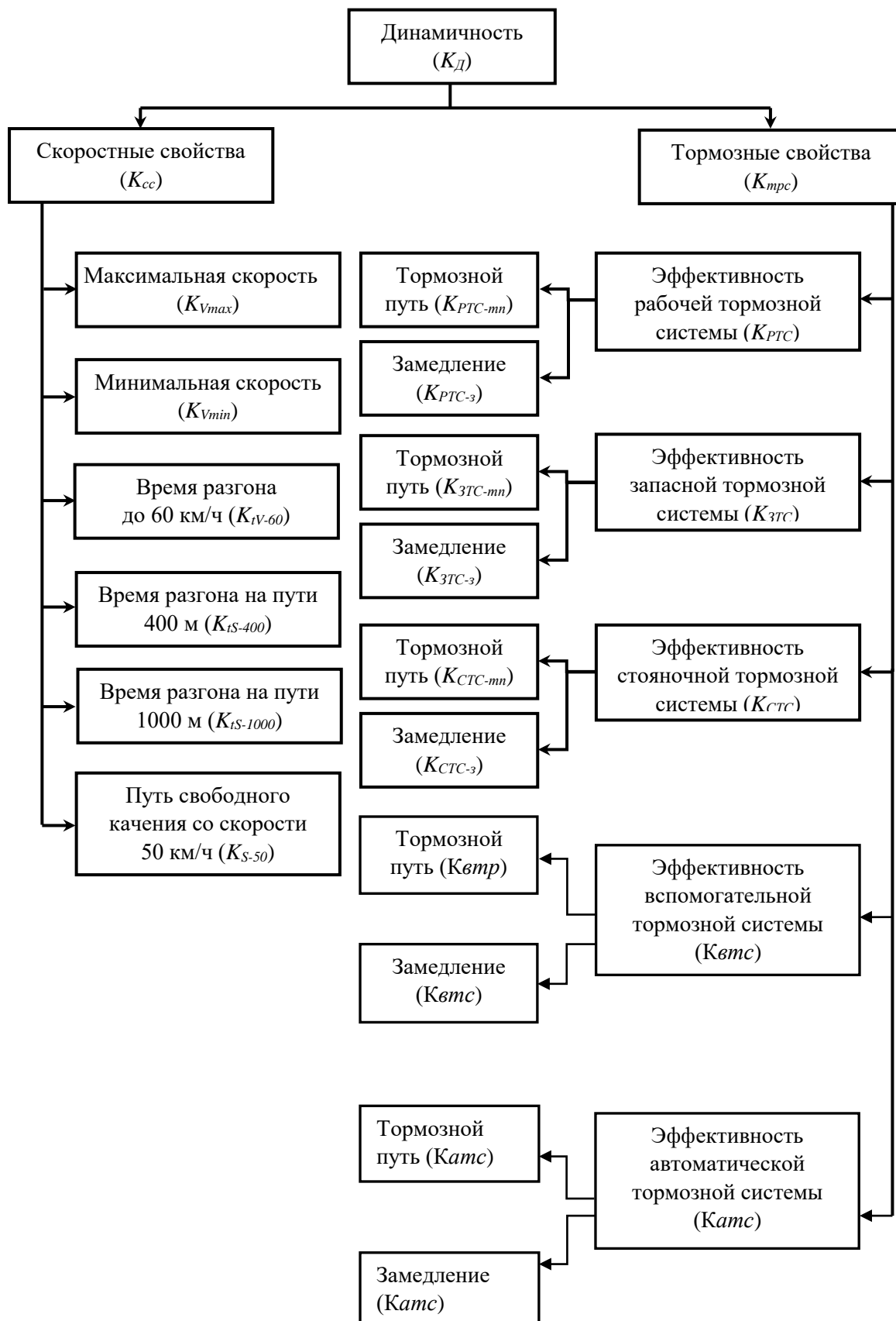


Рисунок 10 - Архитектура показателей динамичности транспортно-технологической машины (составлено автором)

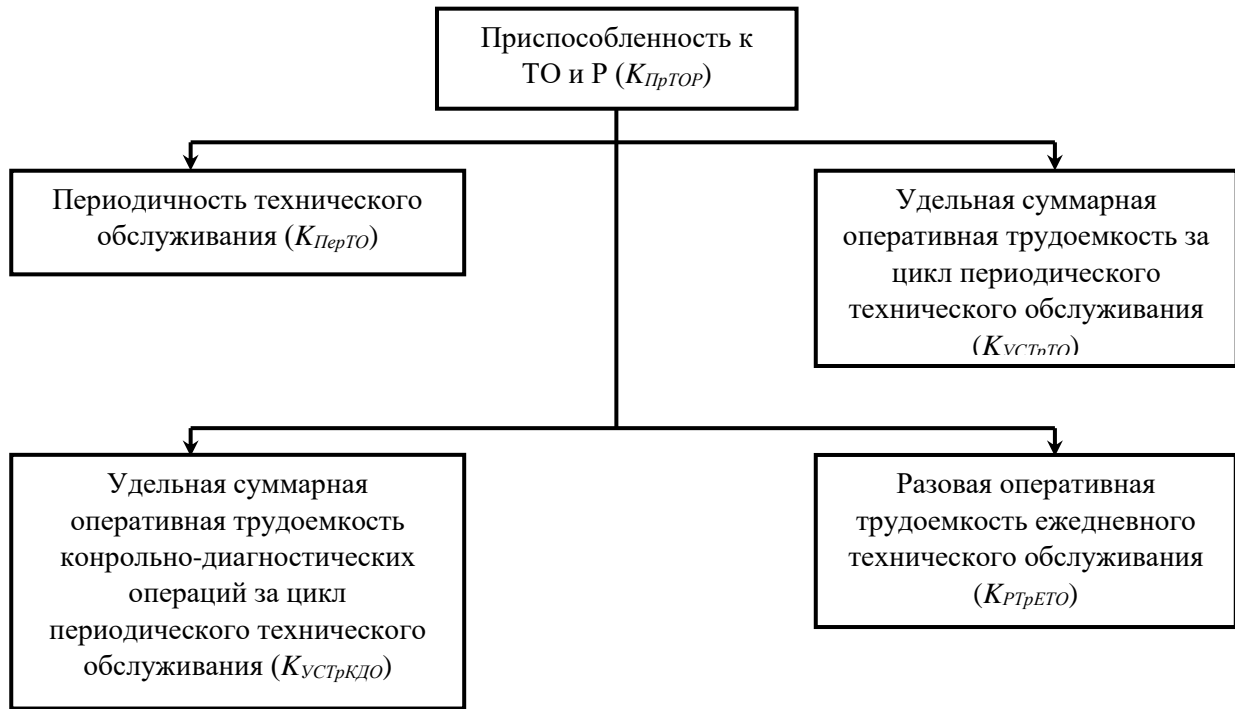


Рисунок 11 - Архитектура показателей приспособленности транспортного средства к техническому обслуживанию и ремонту (составлено автором)

Для определения критерия эффективности приспособленности к техническому обслуживанию и ремонту сформирована обобщенная математическая модель (2):

$$K_{\text{прТОР}} = f(K_{\text{перТО}}, K_{\text{устрТО}}, K_{\text{устрКДО}}, K_{\text{ртрЕТО}}) \rightarrow \max. \quad (2)$$

Для оценки топливной экономичности ТТМ при применении бортовых информационно-управляющих систем сформирована архитектура их показателей (рисунок 12).



Рисунок 12 – Архитектура показателей топливной экономичности (составлено автором)

Для определения показателей топливной экономичности представлена обобщенная зависимость (3) (рисунок 13).

$$K_{ТЭ} = f(K_{рт-40}, K_{рт-60}) \rightarrow \min \quad (3)$$



Рисунок 13 - Архитектура показателей с условными показателя контроля расхода топлива (составлено автором)

С целью упрощения дальнейших расчетов введем понятие условного показателя контроля расхода топлива на скорости 40 км/ч и 60 км/ч – $K_{урт-40}$ и $K_{урт-60}$ соответственно, чтобы все параметры стремились к максимальному значению (4).

$$K_{урт} = \frac{1}{K_{рт-40, рт-60}} \rightarrow \max \quad (4)$$

Таким образом, алгоритм оценки функциональных свойств транспортно-технологических машин представлен на рисунке 14.

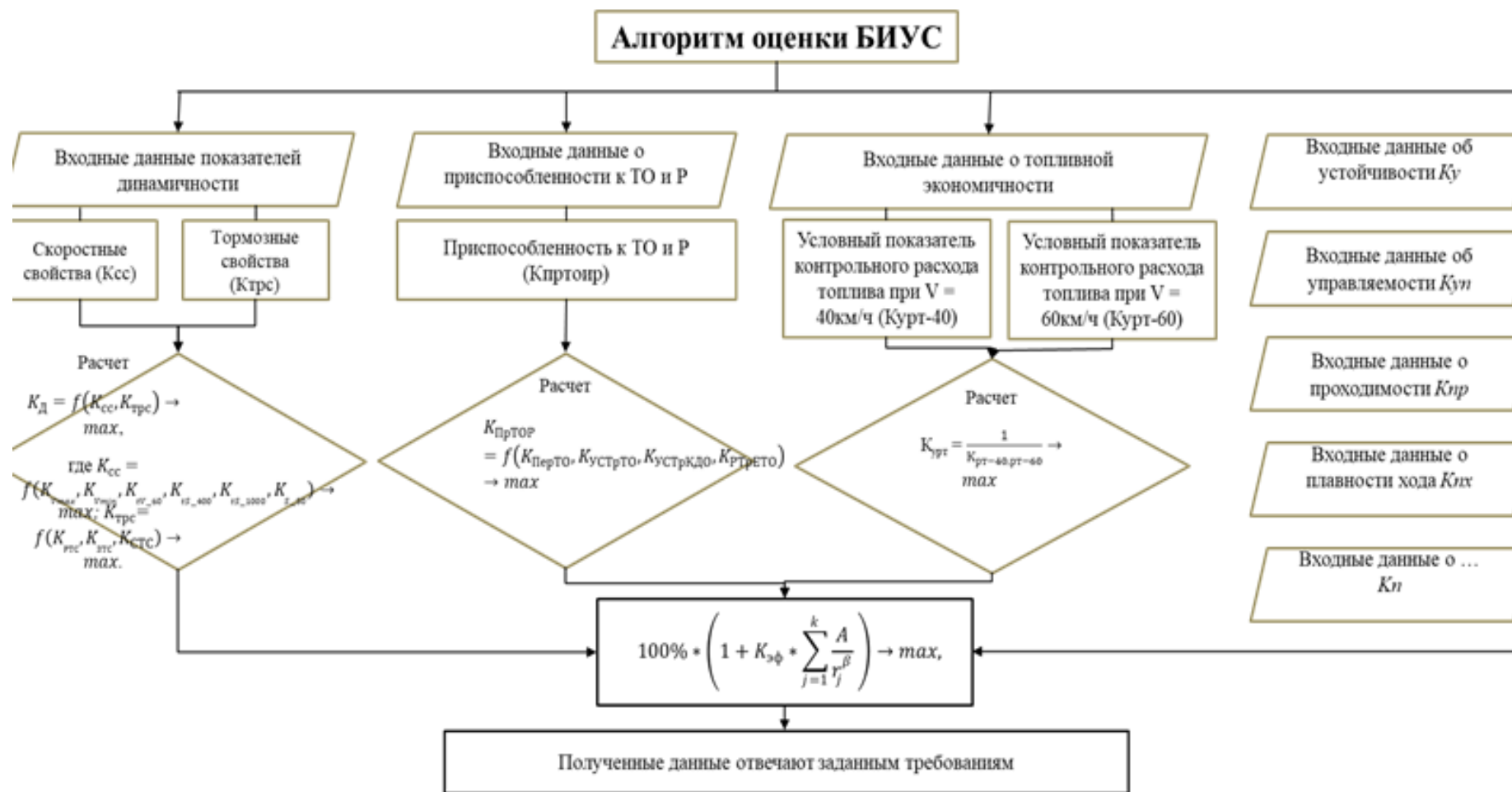


Рисунок 14 – Алгоритм оценки функциональных возможностей транспортно-технологических машин (составлено автором)

2.2 Анализ влияния автоматизированных систем управления на функциональные свойства транспортно-технологических машин

Значения функционального свойства $K_i \in [0; 1]$ отражают степень реализации i -го функционального свойства за счёт автоматизированных систем управления движением ТТМ. Для каждого уровня автоматизации определены минимально достаточные значения реализации функциональных свойств, обеспечивающие переход на следующий уровень, в соответствии с существующими стандартами. Например, на уровне L3 обязательна реализация функциональной безопасности ≥ 0.65 и минимальная интеграция с ИТС (≥ 0.55), что позволяет системе вождения выполнять задачу динамического вождения, но требует готовности водителя к вмешательству [79].

На уровне L4 реализация функциональных свойств достигает значений ≥ 0.80 , что обеспечивает автономное функционирование в определённых зонах (например, карьер), а на уровне L5 ≥ 0.90 по всем свойствам, за исключением проходимости и динамичности, где физические ограничения техники не позволяют достичь абсолютной реализации.

Границы значений функциональных свойств на разных уровнях автоматизации, исходя из технических возможностей транспортно-технологической машины и соответствию международным стандартам представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Границы значений критериев функциональных свойств транспортно-технологических машин (по данным автора)

Функциональные свойства ТТМ	Уровень автоматизации	Показатели физической архитектуры	Показатели функциональной архитектуры	Соответствие стандартам	Значения
Функциональная безопасность	L0–L1	Минимальный контроль: ручное управление, базовая помощь (ABS/ESP)	ABS, ESP, базовые датчики	SAE J3016; ГОСТ Р 56829–2015, п. 5.2; UNECE R13	0.20
	L2	Частичное автоматическое торможение, предупреждение о столкновении	АЕВ (низкоскоростной), FCW, камера/радар	ISO 26262-6:2018 (ASIL B); UNECE R152; ГОСТ Р 71533–2024, п. 6.3	0.45

Продолжение Таблицы 5

Функциональные свойства ТТМ	Уровень автоматизации	Показатели физической архитектуры	Показатели функциональной архитектуры	Соответствие стандартам	Значения
Функциональная безопасность	L3	Полноценный АЕВ, мониторинг водителя, частичное резервирование	АЕВ (все скорости), DMS, резервный канал управления	ISO 26262-3:2018; SAE J3016, Sec. 3.4; ГОСТ Р 71533–2024, п. 7.1; UNECE R157	0.65
	L4	Полная отказоустойчивость	Дублирование тормозов/руля, ASIL D	ISO 26262-5:2018 (ASIL D); SOTIF ISO 21448:2023, п. 8.4	0.90
	L5	Автономная реакция на ЧС, интеграция с ИТС	Прогнозирующая безопасность, ИТС-мониторинг	ISO 21448:2023; SAE J3016, Sec. 3.6; ГОСТ Р 71533–2024, п. 9	0.95
Управляемость	L0–L1	Полный ручной контроль траектории	Рулевое управление, гидроусилитель	UNECE R79; ГОСТ 31507–2011	0.25
	L2	Удержание в полосе, адаптивный круиз	ЛКА, АСС, датчик полосы, радар	SAE J3016, Tab. 2; UNECE R79 (amend. 03); ГОСТ Р 71533–2024, п. 6.4	0.50
	L3	Автоматическое перестроение, активное рулевое	Автоматическое перестроение, ODD-режим	SAE J3016; UNECE R157; ГОСТ Р 71533–2024, п. 7.3	0.70
	L4	Точное управление (≤ 5 см), управление без водителя	Steer-by-wire, GNSS+IMU, V2X	ISO 26262 для steer-by-wire; SAE J3016; ГОСТ Р 71533–2024, п. 8.5	0.90
	L5	Полная автономия рулевого управления в любых условиях	Мультисенсорная система, адаптивное рулевое	SAE J3016; ISO 21448; ГОСТ Р 71533–2024, п. 9.1	0.95
Устойчивость	L0–L1	Базовая электронная стабилизация	ESP, датчики крена/ускорения	UNECE R13; ГОСТ Р 52051–2003	0.30
	L2	Адаптация к массе и скорости	ESP+, адаптивные алгоритмы	ISO 26262 (ASIL A/B); ГОСТ Р 71533–2024, п. 6.5	0.55
	L3	Адаптация к модели прицепа и покрытию	Камера + радар, модель взаимодействия	SAE J3016; ISO 21448, Annex D	0.75
	L4	Предиктивная устойчивость (на основе ИТС)	V2X-данные, предиктивная модель	ISO 21448:2023, п. 7; ГОСТ Р 56829–2015, п. 6	0.90

Продолжение Таблицы 5

Функциональные свойства ТТМ	Уровень автоматизации	Показатели физической архитектуры	Показатели функциональной архитектуры	Соответствие стандартам	Значения
Устойчивость	L5	Компенсация внешних возмущений в реальном времени	Полная сенсорная интеграция, ИИ	SAE J3016; ISO 26262 + ISO 21448	0.95
Топливная экономичность	L0–L1	Контрольный расход (базовый режим)	Стандартный ДВС, базовая КПП	ГОСТ 20307–2014	0.10
	L2	Эко-режим, рекуперация	Гибрид/ЭД, алгоритм есо-управления	ISO 14001; ГОСТ Р 71533–2024, п. 6.7	0.40
Топливная экономичность	L3	Локальный есо-routing (бортовой)	Бортовой ИИ-маршрутизатор	ГОСТ Р 56829–2015, п. 7.4	0.60
	L4	V2I-оптимизация (светофоры, загруженность)	V2I-модуль, облачные данные	ISO/TS 19091 (V2I); ГОСТ Р 71533–2024, п. 8.8	0.85
	L5	Глобальная оптимизация траектории и расхода	Цифровая транспортная среда	ISO 19091; SAE J2945/1; ГОСТ Р 56829–2015, п. 9	0.90
Интеграция с ИТС (V2X)	L0–L1	Только GNSS	GNSS-приёмник	—	0.05
	L2	Телематика, передача состояния ТТМ	Бортовой телематический модуль	ГОСТ Р 56829–2015, п. 5.3; ISO/SAE 21434	0.25
	L3	V2I: знаки, скорости, дорожные работы	V2I-модуль, цифровая карта	ISO/TS 19091 (2019); ГОСТ Р 71533–2024, п. 7.5	0.55
	L4	Кооперативное управление, platooning	V2V/V2I, модуль группового движения	ISO 23159:2023; UNECE R157; ГОСТ Р 71533–2024, п. 8.9	0.95
	L5	Полная интеграция в ЦУП и IoT	Облачный ИИ, диспетчеризация	ISO 21448 + ISO 19091; ГОСТ Р 56829–2015, п. 10	1.00
Плавность хода	L0–L1	Базовые параметры, без активного контроля	Подвеска, амортизаторы	ГОСТ 31507–2011	0.10
	L2	Плавное ускорение/торможение через ACC	ACC, адаптивный контроль	SAE J3016; ГОСТ Р 71533–2024, п. 6.6	0.35

Продолжение Таблицы 5

Функциональные свойства ТТМ	Уровень автоматизации	Показатели физической архитектуры	Показатели функциональной архитектуры	Соответствие стандартам	Значения
Плавность хода	L3	Адаптация к стилю вождения и дорожным условиям	Алгоритмы персонализации	ISO 21448, Annex F	0.60
	L4	Предиктивное плавное движение (V2X + светофоры)	V2X, предиктивные траектории	ISO/TS 19091; SAE J2945/1	0.85
	L5	Максимальная плавность даже в аварийных режимах	ИИ-планирование манёвров	ISO 21448:2023	0.90
Приспособленность к ТОиР	L0–L1	Плановое ТО по регламенту	Стандартная сервисная карта	ГОСТ 25478–2013	0.05
	L2	Базовая диагностика (OBD-II)	OBD-II, датчики состояния	ISO 15031-5; ГОСТ Р 57985–2017	0.20
	L3	Прогноз износа на основе сенсоров	Условный мониторинг, модели износа	ISO 13374-1; ГОСТ Р 71533–2024, п. 7.6	0.50
	L4	Прогностическая аналитика, запросы в ЦУП	ИИ-диагностика, облачные отчёты	ISO 22739; ГОСТ Р 71533–2024, п. 8.10	0.85
	L5	Самообновление ПО, цифровые двойники	ОТА, цифровой двойник ТТМ	ISO/SAE 21434 (ОТА); ГОСТ Р 56829–2015, п. 9.2	0.95
Проходимость	L0–L1	Базовые характеристики (клиренс, углы)	Базовое шасси, шины	ГОСТ 31507–2011	0.15
	L2	Адаптивная подвеска (если оснащена)	Адаптивная подвеска	ISO 12097; ГОСТ Р 71533–2024, п. 6.8	0.30
	L3	Автоматический выбор режима (грязь, снег)	Сенсоры рельефа, модуль режима	ISO 21448, Annex E	0.50
	L4	Планирование маршрута с учётом рельефа	V2X, карта рельефа	ISO 19091, Annex C	0.80
	L5	Автономная адаптация к любому рельефу/погоде	Полная адаптивность подвески и тяги	ISO 21448, п. 9	0.90

Продолжение Таблицы 5

Функциональные свойства ТТМ	Уровень автоматизации	Показатели физической архитектуры	Показатели функциональной архитектуры	Соответствие стандартам	Значения
Динамичность	L0–L1	Паспортные характеристики	Двигатель, КПП, тормоза	ГОСТ 25478–2013	0.10
	L2	Управление сцеплением, селективное торможение	ESP, ABS, дифференциалы	ISO 26262 (ASIL A); UNECE R13	0.25
	L3	Активное управление тягой и тормозами в поворотах	Алгоритмы распределения момента	SAE J3016; ISO 21448, Annex G	0.45
	L4	Предиктивная динамика (с ИТС и сенсорами)	ИТС-модель, предиктивное управление	ISO 19091; ГОСТ Р 71533–2024, п. 8.11	0.80
	L5	Экстренные манёвры без участия человека	ИИ-реакция на критические ситуации	ISO 21448:2023, п. 10	0.90

2.3 Определение весовых коэффициентов функциональных свойств транспортно-технологических машин

Для определения весовых коэффициентов выбранных функциональных свойств транспортно-технологических машин использован метод экспертных оценок и методика рангового анализа теории техноценоза [111]. На основе метода экспертных оценок сформирована структурная модель оценки функциональных возможностей горных машин по перевозке ископаемых и грузов на предприятии минерально-сырьевого комплекса, которая представляет собой совокупность показателей, установленных в разделе 2.1, а именно показатели динамичности, топливной экономичности, устойчивости, управляемости, проходимости, плавности хода, приспособленности к техническому обслуживанию и ремонту.

Значимость (Z_i) оцениваемых параметров оценивается экспертами по десятибалльной шкале из интервала $Z_i \in \{1..10\}$. Определены вопросы в соответствии с перечисленными показателями функциональных возможностей горных машин, а именно:

- значимость для горных машин в целом автоматизированных систем управления движением ТТМ;

- значимость функциональных свойств горных машин грузоподъемностью от 10 до 25 тонн;

- значимость функциональных свойств горных машин грузоподъемностью от 25 до 60 тонн;

- значимость функциональных свойств горных машин грузоподъемностью от 10 до 25 тонн;

- значимость функциональных свойств горных машин грузоподъемностью от 25 до 60 тонн.

Результаты экспертного опроса анализируются с применением ценологического подхода, а именно с помощью методик рангового анализа теории техноценоза [112]. Метод рангового анализа техноценоза АСУ горных машин, при котором каждая АСУ представляет собой единицу системы, совокупность АСУ каждого механизма (агрегата, системы) – единица в системе ценоза, а совокупность АСУ каждой группы из предложенной классификации образуют математическое распределение систем [82, 86].

Структура ценозов описывается разными типами распределений:

- видовое распределение – зависимость числа видов с равным количеством единиц системы от количества математического распределения системы;

- рангово-видовое распределение – ранговое представление основывается на расположении элементов в порядке убывания величины описывающего их параметра или частоты появления;

- ранговое параметрическое, при расположении видов в порядке уменьшения какого-либо параметра [90].

Для корректного расчета средневзвешенного комплексного показателя функционального свойства транспортно-технологической машины и коэффициентов их весомости, выбор формулы осуществляется на основании соответствия цели оценки реализации свойства и последующему управлению, должно быть выполнено условие состоятельности. При определении коэффициента весомости сравнивают показатели свойств нескольких прототипов автоматизированных систем управления движением транспортно-

технологической машины [85, 113]. В случае, когда число исследованных изделий равно или превышает количество выбранных показателей качества, используется метод регрессионного анализа параметрических показателей качества для выбора численных значений коэффициента весомости [36, 40].

Коэффициенты весомости определяют математическим методом наименьших квадратов из подобной системы уравнений для коэффициентов регрессии. Следовательно, на основании данных расчетов можно осуществить обоснованный подбор состава автоматизированных систем управления движением ТТМ с учетом весомости выбранных функциональных свойств ТТМ. В нашем случае используется ранговое параметрическое распределение по коэффициентам весомости АСУ горных машин (таблица 6).

Таблица 6 – Математическое описание гиперболического Н-распределения (по данным автора)

Распределение	Ось абсцисс	Ось ординат	Форма записи
Видовое	Число единиц в системе ценоза x	Число единиц в системе одинаковым числом	$\Omega(x) = \frac{A}{x^{(1+a)}}$
Рангово-видовое	Ранг R	Число единиц в математическом распределении системы	$\Lambda(R) = \frac{B}{R^\beta}$
Ранговое параметрическое	Ранг r	Значение параметра	$W(r) = \frac{A}{r^{(1+a)}}$

Согласно закону рангового распределения систем в ценозе (Н-распределение) имеет гиперболический вид (5):

$$W_r = \frac{W_1}{r^\beta}, \quad (5)$$

где W_r – коэффициент весомости АСУ горных машин при формировании номенклатуры оборудования ТТМ с рангом r ;

W_1 – коэффициент весомости АСУ горных машин при формировании АСУ ТТМ с рангом $r = 1$ (максимальный коэффициент весомости системы);

r – ранг АСУ горных машин;

β – ранговый коэффициент, характеризующий форму кривой распределения.

Предполагается, что стабильность техноценоза характеризуется значением рангового коэффициента β , находящегося в пределах от 0,5 до 1,5. В ходе обработки результатов экспертной оценки ранговый коэффициент был принят $\beta = 0,6$.

В результате рангового параметрического анализа техноценоза получены весовые коэффициенты АСУ горных машин и предложенной классификации, сумма которых равна $\sum_{i=1}^n V_{esu_i} = 1$.

График рангового параметрического распределения АСУ горных машин в соответствии с методом техноценоза представлен на рисунке 15.

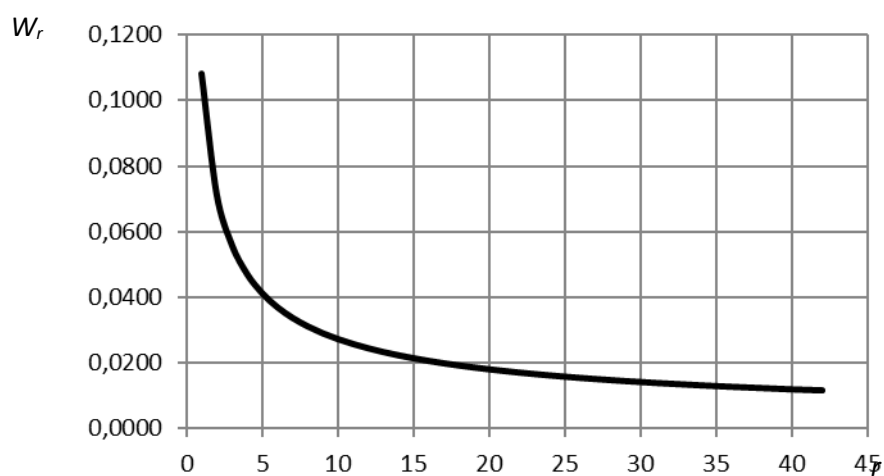


Рисунок 15 – График рангового параметрического распределения АСУ горных машин при формировании номенклатуры оборудования ТТМ
(составлено автором)

Одними из основных функциональных возможностей транспортно-технологических машин, которые могут быть оценены количественными показателями, являются подвижность, проходимость и безопасность движения [44-46, 84]. Коэффициенты эффективности этих функциональных свойств были выбраны в качестве эталонных. Тактико-технические характеристики по функциональным свойствам могут быть улучшены на 30-50%. Для исследований выбирается нижняя граница вышеуказанного интервала – 30%, в связи с тем, что контроль указанных функциональных возможностей ограничен дорожно-климатическими условиями и конструктивными особенностями транспортно-технологической машины, в связи с чем принимается погрешность учета

оцениваемых параметров в 10%. Нижним значением показателей функциональных свойств принято 5%. Погрешность измерений учитываем как 10%. Следовательно, суммарное отклонение при расчетах составит 15% или 0,5 от верхней границы. Сумма весовых коэффициентов автоматизированных систем управления, интегрированных в состав транспортно-технологической машины, должна быть не ниже показателя - 0,5. Сумма коэффициентов весомости внедряемых систем с учетом ранга каждой системы и параметра устойчивости техноценоза примет вид (α) (6):

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{A}{r_i^\beta}, \quad (6)$$

где n – количество АСУ (ед.);

A – весовой коэффициент АСУ с рангом «1»;

r – ранг АСУ;

β – эмпирический параметр устойчивости техноценоза ($\beta = 0,6$).

Номенклатура АСУ для формирования образца, должна быть сформирована в соответствии со следующим ограничением (7):

$$\left(\alpha + \sum_{i=1}^n \frac{A}{r_i^\beta} \right) \geq 0,5, \quad (7)$$

Математическая модель обоснования количества АСУ для горных машин (8):

$$\left\{ \begin{array}{l} 15\% \geq K_{\text{эс}} * R \geq 30\% \\ R = \left(\alpha + \sum_{i=1}^n \frac{A}{r_i^\beta} \right) \geq 0,5, \end{array} \right. \quad (8)$$

где $K_{\text{эс}}$ – коэффициент повышения функциональных возможностей ТТМ;

R – сумма весовых коэффициентов ЭСУ.

2.4 Определение критерия автоматизации транспортно-технологической машины

Определив показатели каждого функционального свойства и присвоив им оценку в соответствии со степенью реализации на транспортно-технологической

данными с инфраструктурой. Соответственно, из девяти функциональных возможностей реализуются не более 2–3 (например, базовая управляемость и устойчивость), причём с коэффициентами $K_i \leq 0,2$. Учитывая веса, суммарный вклад в не превышает 0,12–0,15. Таким образом, порог $K_{авт} = 0,15$ формально отражает наличие в составе ТТМ хотя бы одной активной интеграционной системы, способной оказывать целенаправленное влияние на функциональные свойства машины (например, адаптивный круиз-контроль, автоматическое экстренное торможение или базовая система самодиагностики) [101].

Верхняя граница соответствует уровню L5 (полная автоматизация). При этом предполагается, что реализованы все выбранные функциональные возможности на уровне не ниже 0,85–0,95 (в силу физических и экономических ограничений абсолютная реализация $K_i = 1$ недостижима). В условиях высокой интеграции с транспортной инфраструктурой, полной отказоустойчивости и наличия прогностической аналитики суммарный критерий приближается к верхней границе 0,85–0,90. Значение $K_{авт} = 0,85$ установлено как технически достижимый уровень автоматизации в условиях контролируемой технологической среды (например, горный карьер), где отсутствуют стохастические внешние факторы, характерные для общих дорог.

Установлено, что минимально допустимое значение $K_{авт}=0,15$ соответствует порогу интеллектуализации, начиная с которого ТТМ считается высокоавтоматизированным. Верхняя граница критерия ($K_{авт} \geq 0,85$) условно соответствует уровню полной автоматизации (L5). Промежуточные границы уровней автоматизации установлены линейно-интерполяционным методом с учётом нелинейности восприятия интеллектуальности экспертами (таблица 7).

Таблица 7 – Границы критерия уровней автоматизации ТТМ (по данным автора)

Уровень автоматизации ТТМ	Границы обобщенного критерия автоматизации ТТМ
L0–L1(ручное / помощь)	$0,00 \leq K_{авт} < 0,15$
L2(частичная автоматизация)	$0,15 \leq K_{авт} < 0,35$
L3(условная автоматизация)	$0,35 \leq K_{авт} < 0,60$
L4(высокая автоматизация)	$0,60 \leq K_{авт} < 0,85$
L5(полная автоматизация)	$K_{авт} > 0,85$

Для верификации предложенных границ был проведён опрос группы экспертов в области интеллектуальных транспортных систем, проектирования горной техники и систем управления. Экспертам были предложены различные гипотетические конфигурации ТТМ с заданными наборами реализованных функциональных возможностей и просили отнести каждую к одному из уровней автоматизации L0–L5. На основании полученных оценок был построен распределительный профиль значений $K_{авт}$ по уровням автоматизации. Медианные значения оказались следующими:

L0–L1: медиана , 90-й перцентиль = 0,14

L2: медиана = 0,28, 10-й перцентиль = 0,16, 90-й = 0,38

L3: медиана = 0,53, диапазон = [0,41; 0,64]

L4: медиана = 0,74, диапазон = [0,66; 0,83]

L5: медиана = 0,88

Полученные эмпирические границы практически совпадают с теоретически предложенными. Коэффициент конкордации Кендалла составил $W = 0,613$, что подтверждает статистическую значимость согласованности экспертных мнений и обоснованность выбранных пороговых значений.

2.5 Алгоритм определения уровня автоматизации транспортно-технологических машин

В условиях развития интеллектуальной транспортной системы и широкого внедрения автоматизированных систем управления в состав транспортно-технологических машин установлена необходимость в объективной, количественной и качественной оценке уровня автоматизации транспортно-технологических машин. Отсутствие унифицированной методики, учитывающей техническое оснащение образца, специфику эксплуатации транспортно-технологической машины и подключенность к транспортной инфраструктуре делают невозможным проведение полноценного сравнительного анализа различных конфигураций автоматизированных систем управления ТТМ для

определения наиболее оптимального состава технического оснащения в конкретных условиях эксплуатации, что особенно актуально для горной техники.

Уровень автоматизации транспортно-технологических машин напрямую коррелирует со степенью реализации их функциональных возможностей, то есть потребительских показателей, включающих динамичность, топливную экономичность, устойчивость, управляемость, проходимость, плавность хода и приспособленность к техническому обслуживанию и ремонту, и которые могут быть расширены для определенных задач и весовые коэффициенты которых могут варьироваться в зависимости от типа транспортно-технологической машины и условий ее эксплуатации [47-49].

На основании многокритериального анализа и теории техноценоза разработан техноценологический метод, позволяющий формализовать уровень автоматизации ТТМ через обобщенный критерий [108]. Таким образом, техноценологический метод определения уровня автоматизации транспортно-технологической машины состоит из следующих этапов:

1. Формирование перечня функциональных свойств и определение их нормированных значений для конкретной ТТМ в условиях эксплуатации.

2. Проведение экспертной оценки и ранжирование функциональных свойств с последующим расчётом весовых коэффициентов по формуле с учётом типа и назначения ТТМ.

3. Анализ состава предлагаемых АДАС: выбор АСУ, определение их рангов, расчёт значимости и коэффициентов влияния на каждое функциональное свойство.

4. Моделирование повышения функциональных свойств и расчёт интегрального критерия автоматизации.

5. Сопоставление результата с пороговыми значениями и принятие решения о соответствии достигнутого уровня автоматизации требуемому.

На основании разработанного техноценологического метода определения уровня автоматизации транспортно-технологических машин сформирован алгоритм определения уровня автоматизации, учитывающий реализацию

функциональные возможности транспортно-технологической машины, состав автоматизированных систем управления движением ТТМ и подключенность к транспортной инфраструктуре (рисунок 16).

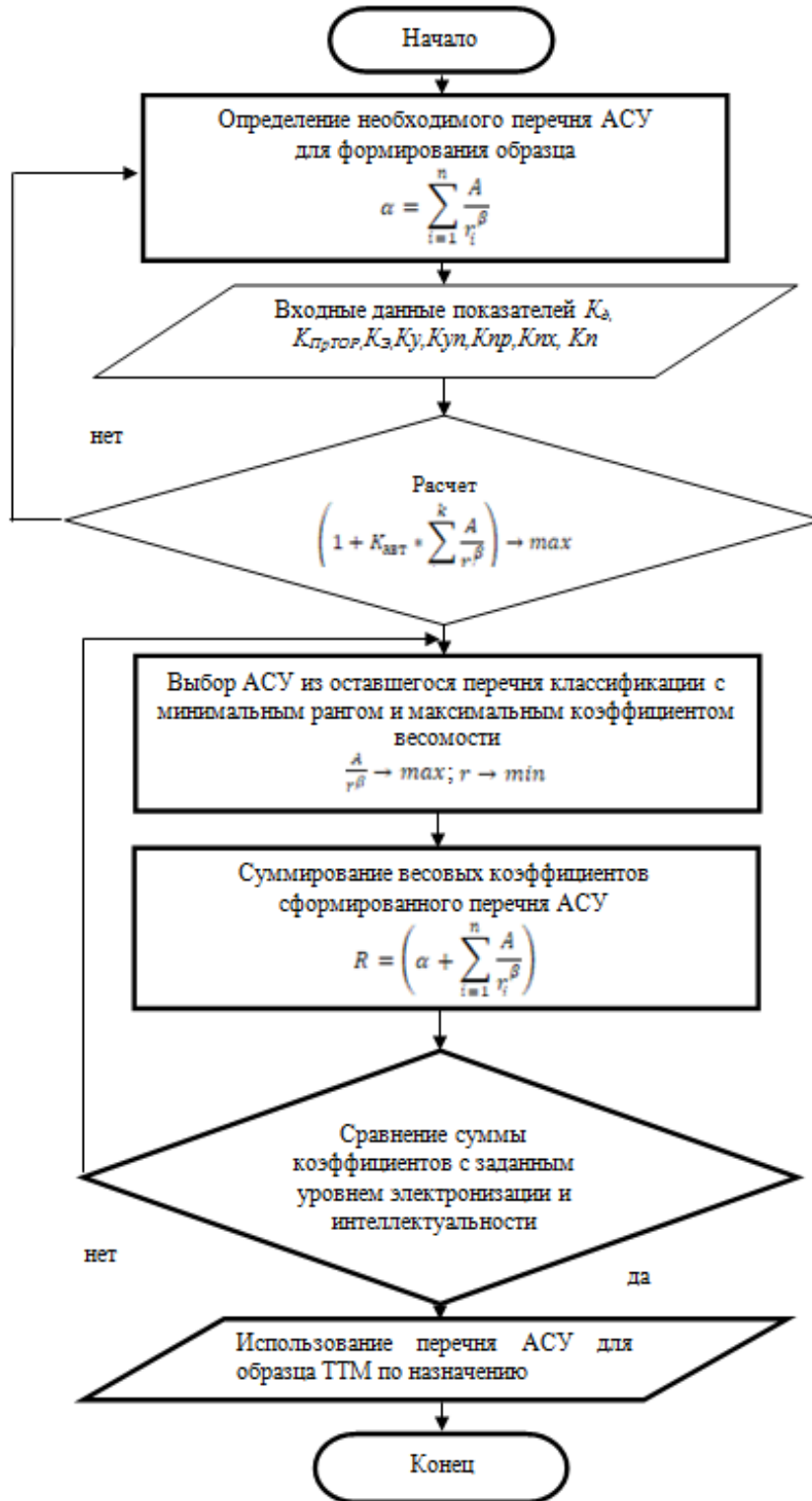


Рисунок 16 – Алгоритм оценки уровня автоматизации транспортно-технологической машины (составлено автором)

Алгоритм оценки уровня автоматизации ТТМ обеспечивает научно-обоснованный, количественный подход к определению уровня автоматизации транспортно-технологической машины и возможности обоснования состава автоматизированных систем управления движением ТТМ, позволяет избежать избыточного или недостаточного оснащения транспортно-технологической машины за счет соответствия реализуемого уровня автоматизации нормативным и эксплуатационным требованиям транспортной инфраструктуры.

2.6 Практическая реализация метода технологической оценки уровня автоматизации транспортно-технологической машины

С целью подтверждения зависимости произведен расчет уровня автоматизации КамАЗ-54901:

1. Проведен анализ реализуемых АДАС-функций, а именно наличие: адаптивного круиз-контроля (ACC), системы автоматического экстренного торможения (АЕВ), системы удержания в полосе (ЛКА), система распознавания дорожных знаков (ISA), предупреждение о непреднамеренном съезде с полосы (LDW). Однако, отсутствует возможность V2X-подключения, что соответствует условному уровню автоматизации L2-L2+.

2. Оценка реализации функциональных свойств, влияющих на эксплуатацию ТТМ (таблица 8).

Таблица 8 – Функциональные свойства ТТМ и способы их реализации (по данным автора)

Функциональное свойство ТТМ	Реализация функций за счет АСУ ТТМ	Показатель К _i
Управляемость	ЛКА, ACC – частичная автоматизация рулевого управления	0,65
Устойчивость	ESP + АЕВ – повышенная устойчивость при торможении	0,70
Проходимость	Не улучшена АДАС – базовый уровень	0,30
Плавность хода	ACC обеспечивает плавное ускорение/торможение	0,60
Топливная экономичность	ACC оптимизирует режим движения – снижение расхода	0,65
Приспособленность к ТО	Бортовая диагностика присутствует	0,50
Функциональная безопасность	АЕВ, LDW, ISA – высокий уровень	0,80
Интеграция с ИТС	Нет V2X – только бортовые системы	0,40
Динамичность	Не улучшена АДАС – базовый уровень	0,35

3. Вес каждого критерия определяется по гиперболическому распределению (12):

$$w_i = \frac{A}{r_i^{\beta}}, \quad (12)$$

Сумма всех коэффициентов без нормирования (13):

$$\begin{aligned} \sum W_i &= A * (\sum k_i) \\ \sum W_i &= A * (4,8002) \end{aligned} \quad (13)$$

Так как $\sum W_i$ не может превышать 1, то $A \approx 0,2083$.

Следовательно, результирующая таблица функциональных свойств ТТМ и веса каждого из свойств примет вид (таблица 9).

Таблица 9 – Функциональные свойства ТТМ и их весовые коэффициенты (по данным автора)

Функциональное свойство ТТМ	Ранг r_i	$w_i = \frac{A}{r_i^{0,6}}$	$w_i = \frac{0,2083}{r_i^{0,6}}$
Функциональная безопасность	1	A	0,2083
Управляемость	2	0,6597A	0,1374
Устойчивость	3	0,5173A	0,1078
Топливная экономичность	4	0,4353A	0,0907
Интеграция с ИТС	5	0,3807A	0,0793
Плавность хода	6	0,3413A	0,0711
Приспособленность с ТО и Р	7	0,3111A	0,0648
Проходимость	8	0,2872A	0,0598
Динамичность	9	0,2676A	0,0558

4. Расчет обобщенного критерия автоматизации (14):

$$K_{авт} = \sum_{i=1}^9 w_i * K_i = 0,535 \quad (14)$$

5. Показатель $K_{авт} = 0,535$ подтверждает уровень автоматизации L3.

Таким образом, проведен расчет определения уровня автоматизации на примере конкретного образца, на основании разработанного техноценологического метода оценки уровня автоматизации ТТМ.

2.7 Выводы по Главе 2

К основным результатам проведенного исследования можно отнести:

1. Обоснована необходимость разработки многокритериального метода оценки функциональных свойств транспортно-технологических машин,

обусловленная отсутствием унифицированных подходов к определению уровня автоматизации при внедрении бортовых информационно-управляющих систем и недостаточной интеграцией транспортных средств в единую инфраструктуру интеллектуальных транспортных систем.

2. Выделен и систематизирован перечень ключевых функциональных свойств транспортно-технологических машин, включающий динамичность, топливную экономичность, устойчивость, управляемость, проходимость, плавность хода и приспособленность к техническому обслуживанию и ремонту. Установлено, что значимость каждого свойства варьируется в зависимости от типа транспортно-технологической машины и условий ее эксплуатации.

3. Разработана иерархическая архитектура показателей функциональных свойств, позволяющая количественно оценивать степень их реализации при применении разной конфигурации электронных систем управления ТТМ. Для каждого свойства сформированы соответствующие нормированные показатели, стремящиеся к максимальному значению при улучшении функциональных свойств транспортно-технологической машины за счёт автоматизированных систем. Предложен алгоритм определения уровня автоматизации транспортно-технологических машин исходя из степени реализации выбранных функциональных свойств.

4. Предложена математическая модель влияния АСУ ТТМ на функциональные возможности транспортно-технологической машины, в которой изменение каждого функционального свойства описывается вкладом соответствующих электронных систем управления через коэффициенты влияния и веса. На её основе сформирован обобщённый техноценологический критерий уровня автоматизации транспортно-технологической машины – $K_{авт}$.

5. Установлены количественные пороговые значения критерия $K_{авт}$ для уровней автоматизации L0–L5, соответствующие требованиям международных и национальных стандартов.

6. Доказана практическая применимость техноценологического метода оценки уровня автоматизации транспортно-технологической машины на примере

конкретного образца.

Таким образом, предложенный техноценологический метод оценки уровня автоматизации транспортно-технологической машины обеспечивает объективную, количественную и научно обоснованную оценку уровня автоматизации ТТМ, позволяя обоснованно формировать состав АСУ ТТМ, соответствующий как техническим, так и эксплуатационным требованиям конкретных транспортных систем. Сформированный техноценологический метод определения уровня автоматизации транспортно-технологических машин позволит:

- производить выбор состава автоматизированных систем управления транспортно-технологических машин с учетом специфики их эксплуатации и требуемого уровня автоматизации;

- разработать и внедрить стандарты и процедуры по формированию физической архитектуры систем ТТМ, необходимых для эффективной эксплуатации транспортно-технологических машин.

ГЛАВА 3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ АВТОМАТИЗАЦИИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

3.1 Методика построения функциональной и физической архитектур автоматизированных систем управления транспортно-технологических машин

При повышении уровня автоматизации транспортно-технологических машин, ужесточаются требования, предъявляемые к показателям функциональной безопасности электронных систем управления, входящих в состав транспортно-технологических машин. Функциональная безопасность – отсутствие неоправданного риска в следствии опасностей, вызванных неправильным поведением электронных систем транспортного средства. В первую очередь повышение требований относится к рулевой и тормозной системам, определяемые как системы опасности уровня D по международному стандарту ISO 26262. Уровня полноты безопасности систем ТТМ оценивается по параметрам – тяжесть последствий (таблица 10), вероятность воздействия (таблица 11) и управляемость опасного объекта (таблица 12).

Таблица 10 – Определение класса тяжести последствий [104]

Описание	Класс			
	S0	S1	S2	S3
Безопасно	Умеренные травмы	Тяжелые травмы	Опасные травмы, вероятность смертельного исхода	

Таблица 11 – Определение класса вероятности воздействия эксплуатационных ситуаций систем ТТМ [104]

Описание	Класс				
	E0	E1	E2	E3	E4
Невероятно	Очень низкая вероятность	Низкая вероятность	Средняя вероятность	Высокая вероятность	

Таблица 12 – Определение класса управляемости систем ТТМ [104]

Описание	Класс			
	C0	C1	C2	C3
Полностью управляемая	Легко управляемая	Обычно управляемая	Трудно управляемая	

На основании показателей, влияющих на безопасность ТТМ, присваивается уровень полноты безопасности автомобиля (УПБА), где уровень А – самое низкое значение, уровень D – самое высокое значение (таблица 13), QM – система, к которой не назначаются требования.

Таблица 13 – Определение уровня полноты безопасности отдельных систем ТТМ [107]

Классы тяжести последствий	Класс вероятности воздействия	Класс управляемости		
		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	A
	E4	QM	A	B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	A
	E3	QM	A	B
	E4	A	B	C
S3	E1	QM	QM	A
	E2	QM	A	B
	E3	A	B	C
	E4	B	C	D

В условиях высокой степени автоматизации транспортно-технологических машин, система экстренного торможения (АЕВ – Advanced Emergency Braking System) классифицируется как уровень D, так как сбой в автономной системе экстренного торможения может привести к опасным для жизни и смертельным травмам. Основная концепция функциональной безопасности подразумевает распределение информации по элементам архитектуры и их взаимодействия, с целью достижения максимальной безопасности. В отличие от традиционных систем, в высокоавтоматизированных ТТМ АЕВ интегрирована в единую архитектуру управления и взаимодействует с подсистемами наблюдения, планирования траектории и принятия решений.

Работа системы начинается с обнаружения опасной ситуации с помощью комплексных датчиков: радаров, лидаров, камер и ультразвуковых датчиков. Данные агрегируются в модуль сенсорного слияния, где формируется единая картина окружающей среды. При обнаружении препятствий на траектории движения (например, стоящее ТТМ, пешеход, оборудование) [1], система

измеряет параметры сближения: расстояние, относительную скорость, время до столкновения. При сокращении дистанции система инициирует значительное торможение с постепенным нарастанием усилия. В высокоавтоматизированных системах (уровни 4–5 по SAE) АЕВ способен производить полностью автоматизированное торможение до полной остановки без участия водителя, за счет управления тормозной системой через электронный блок управления (ЭБУ), интегрированный с системой ABS, EBS и, при наличии, с системой динамической передачи [28-30].

Формирование системы экстренного торможения и последующая интеграция в единую архитектуру ТТМ, с целью нахождения наиболее эффективного режима работы системы экстренного торможения, является сложной и актуальной задачей, при которой необходимо учитывать не только технические показатели ТТМ, но и аспекты, связанные с ее сенсорикой. Особенностью АЕВ в грузовых ТТМ является учёт инерционных характеристик, таких как большая масса, длина тормозного пути и распределение нагрузки [100]. Таким образом, система экстренного торможения в грузовом транспорте представляет собой интеллектуальную, многоуровневую подсистему функциональной безопасности, являющуюся необходимым условием критерием оценки при уровне автоматизации.

Система экстренного торможения используется с целью избегания возможной коллизии с движущимся или стоячим объектом в предположительной полосе движения ТТМ и запускает механизма торможения для недопущения столкновения или смягчения его последствий, либо исключения столкновения с движущимся объектом в поперечной, пересекающей полосе движения ТТМ на расстоянии менее 50 метров при движении ТТМ со скоростью $v \leq 60$ км/ч.

Функция экстренного торможения может быть в 3 состояниях:

1. Выключена/недоступна.
2. Работа в штатном режиме.
3. Стадия экстренного торможения при соблюдении всех условий потенциальной коллизии и включенном режиме Автопилота:

3.1. Активное торможение выключено, система оповещает о возможной коллизии.

3.2. Система активирует экстренное торможение.

Система запускает механизм экстренного торможения в случае, если объект находится на предполагаемой траектории попутного движения ТТМ, режим Автопилота включен и пересечение с объектом составляет более 10 см, при условии, что $v_{\text{ТТМ}} \geq 3\text{ м/с}$ и превышает проекцию скорости объекта.

Функция экстренного торможения реализуется при следующей дистанции между ТТМ и объектом с учетом данной зависимости (15):

$$S_{\text{brake}} = \frac{(V_{\text{ego}} - V_1)}{2 \cdot (a_{\text{dec.max}} - a_{\text{dec.1}})} + (V_{\text{ego}} - V_1) \cdot t_{\text{actuation}} + d_0, \quad (15)$$

где V_{ego} – скорость ТТМ (м/с),

V_1 - скорость впередиидущей ТТМ по той же полосе движения (м/с),

$a_{\text{dec.max}}$ - максимальное торможение ТТМ (м/с²),

$a_{\text{dec.1}}$ – ускорение впередиидущей ТТМ (м/с²),

$t_{\text{actuation}}$ – время актуации тормозной системы в зависимости от автоматизации ТТМ и наличия автоматизированных систем управления, до 0,3 секунд (с),

d_0 - минимальная дистанция до впередиидущей ТТМ, до 50 см (см).

То есть текущая активация до объекта меньше или равна S_{brake} .

Функция запускается только в том случае, если объект невозможно объехать (16):

$$S_{\text{steer}} = v_{\text{ego}} \cdot 2 \cdot \sqrt{d_{\text{lane}} / a_{\text{lat.max}}}, \quad (16)$$

где d_{lane} – ширина полосы движения ТТМ (м), $a_{\text{lat.max}}$ – допустимое поперечное ускорение (м/с²).

3.2 Определение эффективности торможения и расчет тормозного пути транспортно-технологической машины

Эффективность системы экстренного торможения транспортно-технологической машины можно определить как расчет количества километров,

пройденных на одно неверное срабатывание системы [83, 99]. Для полноценной оценки эффективности срабатывания системы экстренного торможения транспортно-технологической машины также учитываются следующие параметры [114]:

- время срабатывания системы (обычно 0,1–0,3 с);
- снижение скорости до столкновения ТТМ с объектом (или полная остановка);
- количество ложных сигналов;
- адаптация к погодным условиям.

Посредством блока восприятия ТТМ сканируется окружающая обстановка и рассчитывается вероятность столкновения, учитывая положение ТТМ и дистанцию от объекта столкновения, скорость ТТМ и объекта столкновения, относительное ускорение со следующими требованиями к точности определения (таблица 14).

Таблица 14 – Максимально допустимые продольные и поперечные ошибки модели (по данным автора)

Фактор	Максимально допустимая продольная ошибка	Максимально допустимая поперечная ошибка
Положение ТТМ	$\max(0,3m; 0,05r)$	$\max(0,1m; 0,01r)$
Скорость движения ТТМ и объекта	$\max(0,5m/s; 0,02r)$	$\max(0,5m/c; 0,01r)$
Ускорение ТТМ и объекта	$\max(0,5m/s^2; 0,01r)$	$\max(0,5m/s^2; 0,005r)$
Габариты ТТМ и объекта	Ширина	Длина
	$\max(0,1m; 0,003r)$	$\max(0,1m; 0,0165r)$

где r – дистанция между ТТМ и объектом (м).

Для каждого срабатывания АЕВ рассчитывается расстояние до объекта, на основании чего строится график распределения событий по расстоянию. Рассчитывается количество срабатываний АЕВ с торможением меньше 8 м/с^2 . Строится гистограмма распределения по максимальным значениям ускорения при срабатывании АЕВ (рисунок 17).

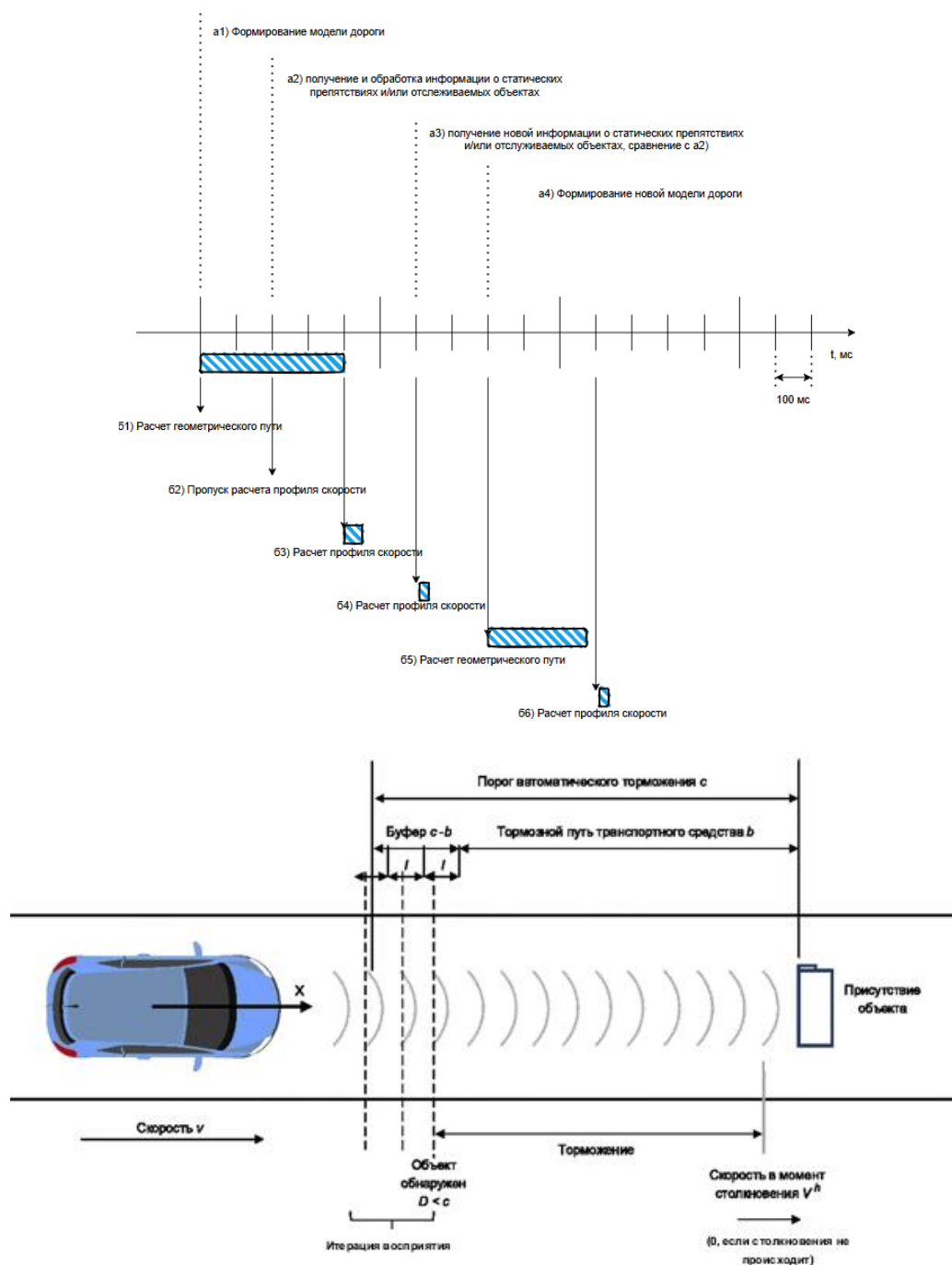


Рисунок 17 – Моделирование значений времени для срабатывания системы экстренного торможения при приближении к объекту (составлено автором)

Расчет скорости в начале торможения ТТМ (17):

$$v = \sqrt{2aS_t}, \quad (17)$$

где a – отрицательное ускорение (м/с^2), S_t – тормозной путь ТТМ (м).

Из-за неточности регулирования тормозов невозможно реализовать теоретически возможную полную величину тормозной силы, следовательно,

вводится поправочный коэффициент – K_3 , то есть, варьирующийся от 1,1 до 1,3 (18):

$$S_t = \frac{K_3 v^2}{2a} \quad (18)$$

3.3 Определение показателей эффективности системы экстренного торможения

При тестировании эффективности срабатывания функции экстренного торможения рассчитывается метрика тормозной системы – мера, позволяющая получить численное значение эффективности выбранного свойства.

1. TP (TruePositive) – система сработала корректно, ед.
2. FP (FalsePositive) – ложное срабатывание системы, ед.
3. FN (FalseNegative) – система не сработала, при условии, что водитель инициировал экстренное торможение, автопилот включен, ед.

Расчет количества километров, пройденное в среднем на 1 некорректное срабатывание функции экстренного торможения, выражающее количество верных срабатываний алгоритмов системы к общему числу срабатываний (19):

$$F_{AEB} = \frac{TP}{(TP+FP+FN)} \quad (19)$$

3.4 Имитационное моделирование системы экстренного торможения транспортно-технологических машин

3.4.1 Методика экспериментального исследования

Разработана имитационная модель системы экстренного торможения AEB. В связи с высокой опасностью натурального эксперимента, в первую очередь система проходит тестирование в симуляции. В программе Prescan можно симулировать различные транспортные системы, включая автоматизированные ТТМ, системы помощи водителю ADAS, систему экстренного торможения AEB, работу радаров, лидаров и камер, а также динамику движения различного транспорта, что позволяет создавать виртуальные среды для тестирования взаимодействия транспортных средств с окружающей средой, инфраструктурой и другими участниками дорожного движения.

При разработке симуляции систем помощи водителю ADAS необходимо создание виртуальных сценариев для тестирования и верификации различных функций, включающее разработку функциональной и физических архитектур системы, графическая отрисовка инфраструктуры эксперимента.

В первую очередь, при формировании системы управления движением ТТМ необходимо разработать структуру управления для выполнения определенной функции [50], включающей ключевые составляющие системы. Для разработки системы экстренного торможения основными блоками являются (рисунок 18), а также радарно-лидарный комплекс:

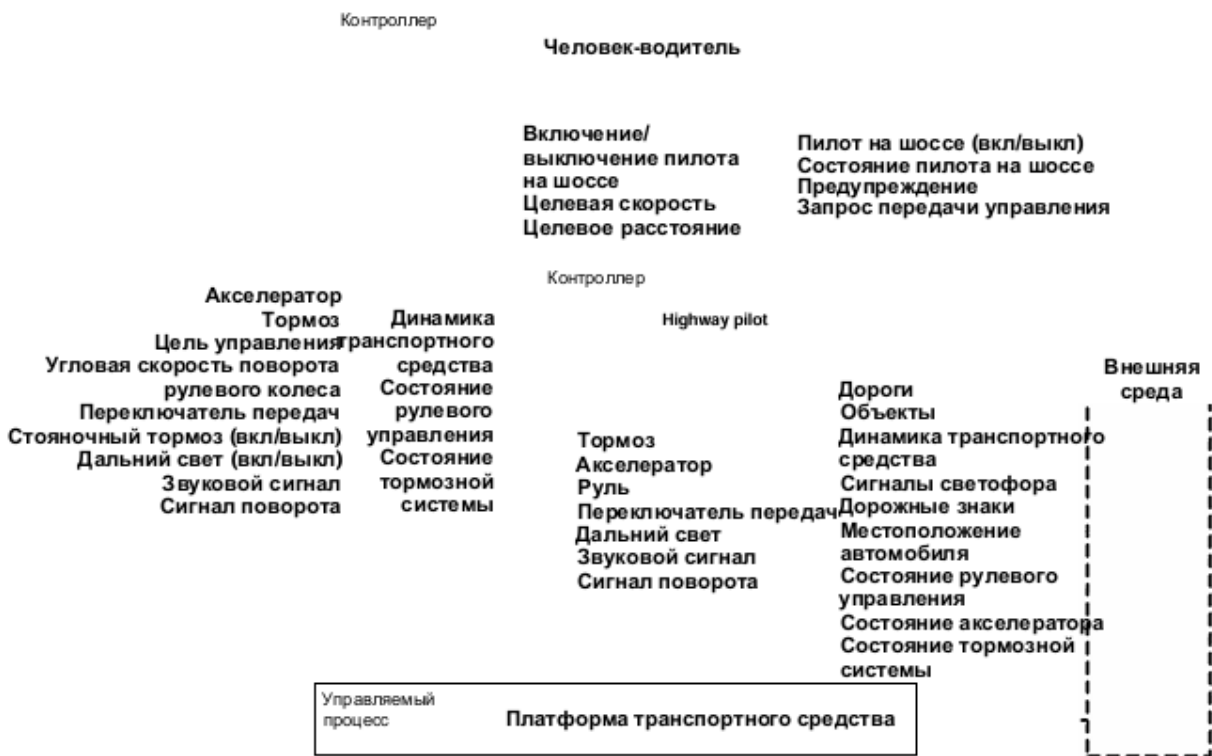


Рисунок 18 – Структурная схема управления системой экстренного торможения ТТМ (составлено автором)

При формировании структурной схемы управления системой экстренного торможения, рассматриваются возможные опасные управляющие действия [31, 32], такие как отсутствие подачи команды торможения, слишком поздняя подача запроса торможения, слишком раннее прекращение подачи запроса на торможение [68, 70]. Однако, задается номинальное замедление транспортного средства системой экстренного торможения при обнаружении помехи на пути движения (таблица 15, рисунок 19).

Таблица 15 – Номинальное тормозное усилие при срабатывании системы экстренного торможения ТТМ (по данным автора)

Время (с)	Событие сценария	Скорость ТТМ	Тормозное усилие
-2 до 0	Нормальное движение	60 км/ч	0%
0	Наружные препятствия	60 км/ч	0%
0,2	Предупреждение	60 км/ч	0%
0,5	Преднатяжение тормозов	58 км/ч	20%
1.0	Начало торможения	50 км/ч	50%
2.0	Активное торможение	30 км/ч	80%
3.5	Полное торможение	5 км/ч	100%
4.0	Остановка	0 км/ч	100% , переход к 0%

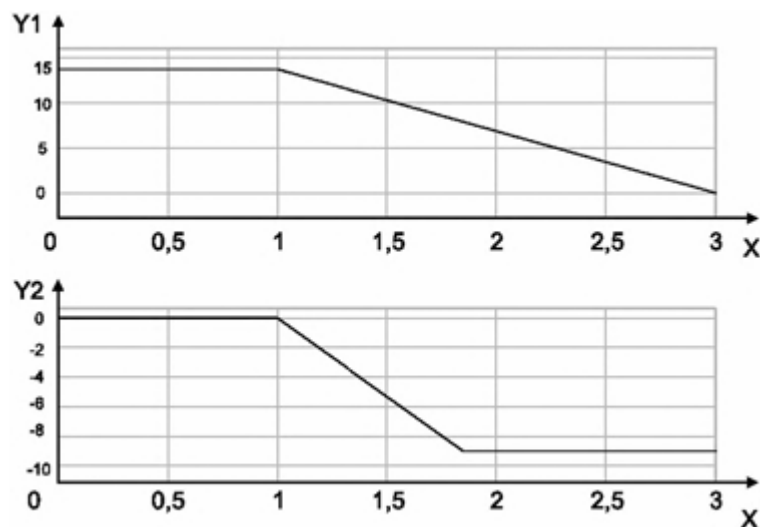


Рисунок 19 – Профиль замедления ТТМ системой экстренного торможения при обнаружении помехи на маршруте движения, где X — время, с; Y1 — скорость ТТМ, м/с; Y2 — замедление ведущей ТТМ, м/с² (составлено автором)

При проведении экспериментального исследования смоделированы функциональная и физическая архитектура система экстренного торможения грузового транспортного средства при начальной скорости 60 км/ч. Цель модели – нахождение оптимального расположение радарно-лидарного комплекса для определения статичного объекта на дороге и срабатывание системы АЕBS для остановки грузовика за метр до препятствия при разных погодных условиях. Учет погодных условий обусловлен необходимостью тестирования работы радара, лидара и камер в условиях не полностью ясной видимости (рисунок 20).



Рисунок 20 – Моделирование транспортной инфраструктуры
(составлено автором)

Структурная схема функциональной и физической архитектур представлена на рисунке 21.

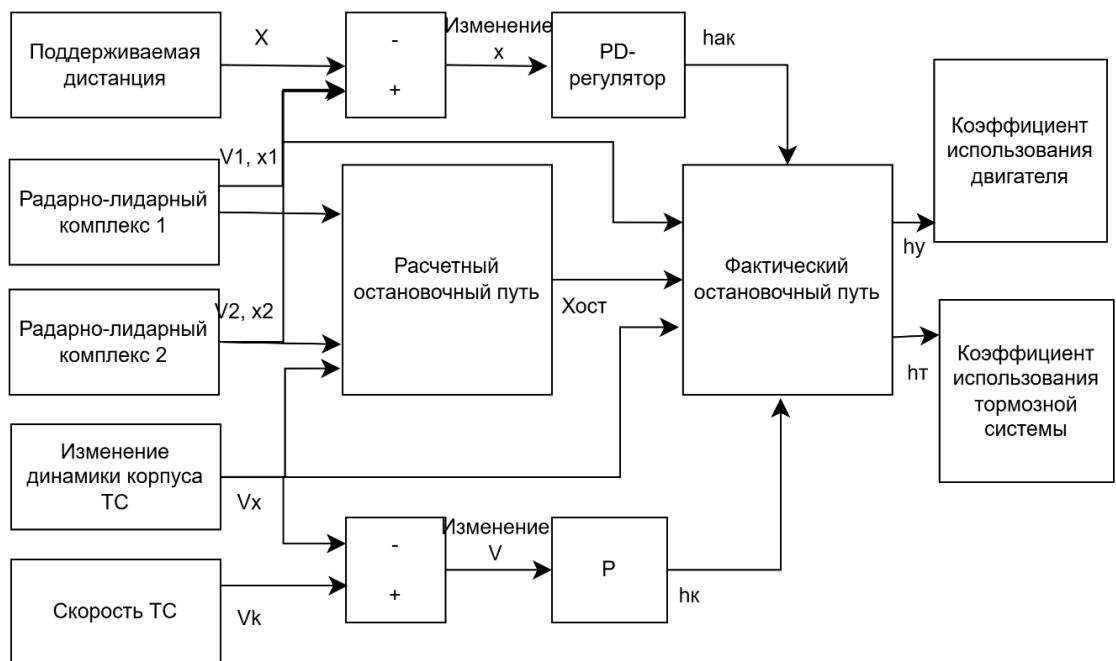


Рисунок 21 – Структурная схема функциональной архитектуры системы экстренного торможения, где x – дистанция до объекта, h_k , $h_{ак}$ – управляющее воздействие системы ТТМ (составлено автором)

Алгоритм срабатывания системы экстренного торможения переходит в активный режим, как только радарно-лидарный комплекс обнаруживает на пути движения транспортного средства объект, скорость которого меньше его собственной. Однако, в электронный блок управления закладывается параметр, при котором система экстренного торможения начнет процесс экстренного

торможения при минимальном расстоянии для объекта только в том случае, если водитель не реагирует дольше 0,6 секунд.

Фрагмент программы сопоставления скорости и необходимого тормозного усилия в режиме реального времени представлен на рисунке 22.

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 # Время (секунды)
5 t = np.linspace(-2, 6, 500)
6
7 # Начальная скорость (км/ч)
8 v0_kmh = 60
9 v0_ms = v0_kmh * 1000 / 3600 # в м/с
10
11 # Параметры торможения
12 deceleration = 4.0 # м/с2 (ускорение со знаком минус)
13
14 # Момент начала торможения (в секундах от начала графика)
15 t_brake_start = 1.0 # начало активного торможения
16
17 # Моделирование скорости
18 velocity = np.piecewise(t,
19 [t < 0,
20 (t >= 0) & (t < t_brake_start),
21 t >= t_brake_start],
22 [lambda t: v0_ms,
23 lambda t: v0_ms,
24 lambda t: np.maximum(0, v0_ms - deceleration * (t - t_brake_start))])
25
26 # Переводим обратно в км/ч
27 velocity_kmh = velocity * 3.6
28
29 # Моделирование тормозного усилия (%)
30 brake_force = np.zeros_like(t)
31 brake_force[(t >= 0.5) & (t < 1.0)] = np.linspace(0, 50, np.sum((t >= 0.5) & (t < 1.0)))
32 brake_force[t >= 1.0] = np.minimum(100, 50 + 100 * (t[t >= 1.0] - 1.0)) # нарастание
33 brake_force[brake_force > 100] = 100
34 brake_force[t < 0.5] = 0
35
36 # Построение графика
37 fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(12, 6))
38
39 # Основная ось – скорость
40 color = 'tab:blue'
41 ax1.set_xlabel('Время, с', fontsize=12)
42 ax1.set_ylabel('Скорость, км/ч', color=color, fontsize=12)
43 ax1.plot(t, velocity_kmh, label='Скорость', color=color, linewidth=3)
44 ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color)
45 ax1.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
46
47 # Вертикальные линии с событиями
48 events = {
49     0: 'Обнаружение\препятствия',
50     0.2: 'Предупреждение',
51     0.5: 'Преднапряжение',
52     1.0: 'Активное\торможение',
53     4.0: 'Остановка'

```

Рисунок 22 – Фрагмент программы сопоставления скорости и необходимого тормозного усилия ТТМ при срабатывании системы экстренного торможения (составлено автором)

3.4.2 Определение показателей системы экстренного торможения при варьировании различных уровней автоматизации транспортно-технологических машин

При формировании архитектуры системы экстренного торможения ТТМ на разных уровнях автоматизации учтены параметры разрабатываемых моделей, включающие различную техническую оснащенность транспортно-технологической машины, подключенность к элементам транспортной инфраструктуры, вовлеченность водителя в процесс управления ТТМ (таблица 16).

Таблица 16 – Показатели уровней автоматизации ТТМ (по данным автора)

Параметр	ТТМ уровня 0-1	ТТМ уровня 2-3 (полуавтоматизированный)	ТТМ уровня 3-4 (автоматизированный)
Тип датчиков	Радар, камера	Радар + камера + лидар	Радар + камера + лидар + ультразвук
Время работы системы	0,5 – 1,0 с	0,3 – 0,5 с	0,1 – 0,3 с
ТТС для активации	< 2,0 с	< 2,5 с	< 3,0 с (с прогнозированием)
Адаптация к условиям	Нет	Да (по данным датчиков давления)	Да (включая модель прицепа)
Работа в сложных условиях	Ограниченная (дождь, туман)	Средняя (с коррекцией)	Высокое (сенсорное слияние, II)
Ложные предупреждения	Высокие	Средние	Низкие (с машинным обучением)
Тормозной путь при 60 км/ч	~45 м	~40 м	~35–38 м (с учётом раннего обнаружения)
Прогнозирование поведения объектов	Нет	Стандартное с использованием сценариев	С использованием ИИ для прогнозирования событий

Симуляция системы экстренного торможения (АЕBS) в программе Prescan позволяет моделировать сценарии, в которых система автоматически активирует тормоза для предотвращения столкновений. После отрисовки перекрестка необходимо проработать архитектуру грузового транспортного средства – задать его координаты, скорость, ускорение, логику работы системы АЕBS при разном поведении водителя. Архитектура системы экстренного торможения ТТМ представлена на рисунке 23.

может быть интегрирован с другими автоматизированными системами управления для создания полноценной функциональной архитектуры транспортно-технологической машины при варьировании уровня автоматизации. Радарно-лидарный комплекс включает в себя перечень сенсорики для восприятия и подключения к автоматизированным системам управления, а также для тестирования систем ADAS, что способствует повышению безопасности на дорогах и улучшению взаимодействия ТТМ с окружающей средой. Архитектура радарно-лидарного комплекса (рисунок 24) и координаты его расположения (рисунок 25) прорабатывалась на основании статистических данных предприятия. Кроме того, получены результаты срабатывания радарно-лидарного комплекса при обнаружении статично стоящего объекта для передачи управляющего воздействия на тормозную систему ТТМ (рисунок 26).

При обнаружении радарно-лидарным комплексом ТТМ статично стоящего объекта, посредством электронного блока управления направляется управляющее воздействие на тормозную систему в случае, если водитель не среагировал на предупреждающий сигнал и не воздействовал на педаль тормоза дольше 0,6 секунд. При моделировании системы и генерации различных управляющих воздействий получены значения среднего тормозного пути при управлении ТТМ разных уровней автоматизации (таблица 17).

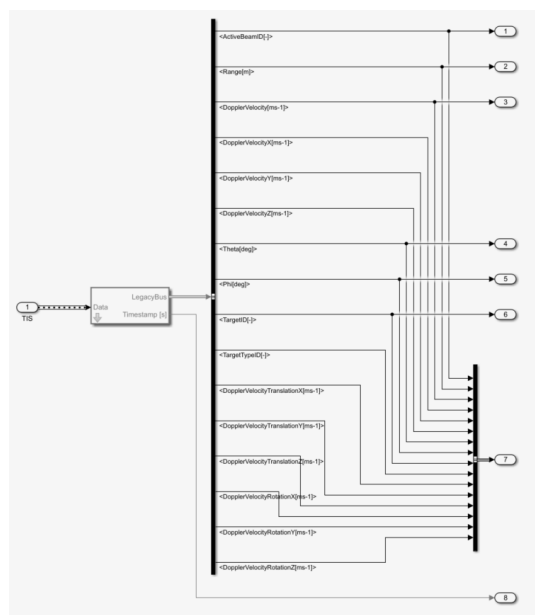


Рисунок 24 – Архитектура радарно-лидарного комплекса (составлено автором)

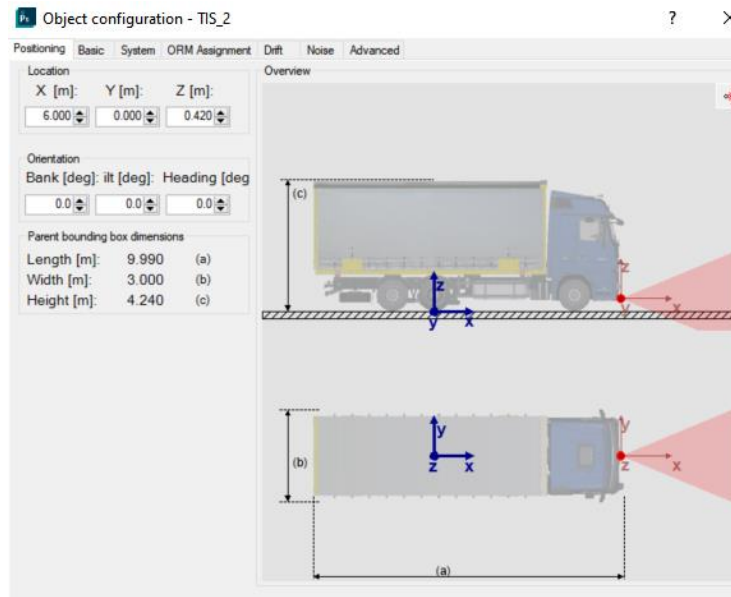


Рисунок 25 – Расположение радарно-лидарного комплекса (составлено автором)

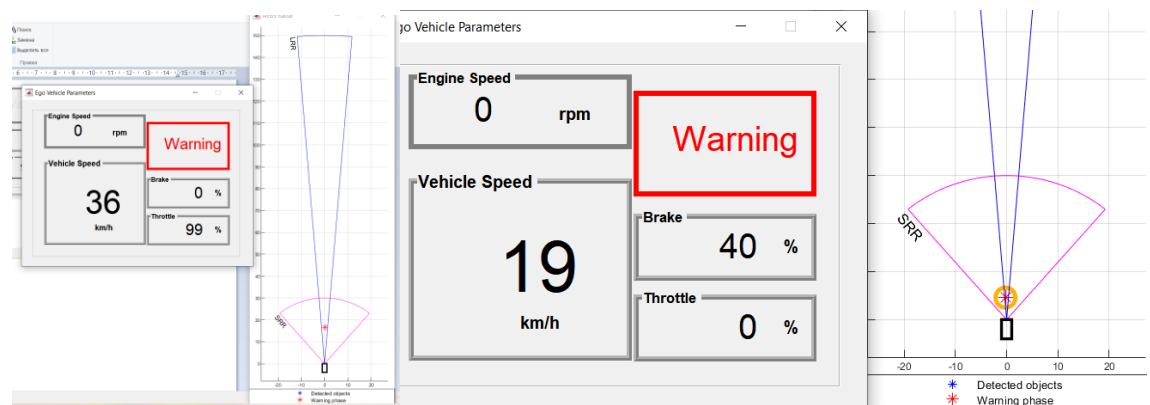


Рисунок 26 – Вывод результатов срабатывания работы радарно-лидарного комплекса, передаваемого на систему управления ТТМ (составлено автором)

Таблица 17 – Результаты моделирования системы экстренного торможения ТТМ (по данным автора)

Тип ТТМ	Уровень	Среднее время реакции, с	Частота пропусков, %	Средний тормозной путь, м	Инциденты, %
Грузовой	L1	1.9	27	38.5	5
Грузовой	L2	1.7	21	35.2	3
Грузовой	L3	3.8	52	31.0	18
Грузовой	L4	—	0	27.1	0
Горный	L1	2.4	34	52.1	9
Горный	L2	2.2	29	48.3	7
Горный	L3	4.2	58	44.0	24
Горный	L4	—	0	38.7	0

Усредненные результаты срабатывания системы экстренного торможения при разных уровнях автоматизации ТТМ (таблица 18).

Таблица 18 – Усредненные результаты моделирования системы экстренного торможения ТТМ (по данным автора)

Уровень автоматизации	Среднее время реакции, с	Частота запоздалых реакций	Средняя когнитивная нагрузка водителя (усл. Ед.)
L1	1.8	28%	82
L2	1.6	22%	75
L3	3.2	45%	68
L4	— (система сама тормозит)	0%	24
L5	—	0%	0

На основании полученных данных сформирован коэффициент ручного управления ТТМ при разном уровне ее автоматизации, определяющих долю участия водителя в процессе эксплуатации ТТМ, значения которого примут вид (таблица 19).

Таблица 19 – Показатели коэффициента ручного управления ТТМ при разных уровнях ее автоматизации (по данным автора)

Уровень автоматизации ТТМ	Коэффициента ручного управления ТТМ при торможении
L0–L1	1.0
L2	0.95
L3	0.85
L4	0.30
L5	-

3.5 Моделирование влияния внедрения автоматизированных систем управления ТТМ на технико-эксплуатационные показатели перевозочного процесса

3.5.1 Методика экспериментального исследования

В условиях современного развития транспортной отрасли одним из факторов, которые необходимо учитывать, становится уровень цифровой зрелости транспортной инфраструктуры и уровень автоматизации ТТМ на дорогах общего пользования. Уровень цифровой зрелости транспортной инфраструктуры, то есть уровень цифровизации различных секторов транспортной отрасли, который отражает готовность к цифровой трансформации, оценивается по критериям, обозначенным в Методологии определения уровня цифровой зрелости, а именно: стратегия, взаимодействие с участниками дорожного процесса, операции, цифровизация поддерживающих функций,

наличие цифровой платформы компаний, подготовка кадров, управление изменениями. С технической точки зрения влияние автоматизированных систем управления способствует повышению уровня цифровизации по критериям:

1. Операции, как аспект применения отдельных компаний базовых цифровых решений, оптимизация процесса технического обслуживания и диагностирования транспортно-технологических машин.

2. Цифровизация поддерживаемых функций, связанных с управлением не только отдельных транспортно-технологических машин, но и транспортной системы как единое целое, учитываемое в теории техноценоза. Также автоматизация рассматриваемых как конструкционные решения отдельных ТТМ, направленных на автоматизацию функций ручного управления ТТМ.

3. Наличие цифровой платформы, оцениваемая как гибкость инфраструктуры, ее элементов в целом и на отдельных участках, в области телематических и интеграционных систем управления движением.

По результатам множества исследований, предполагается, что внедрение ТТМ 4 уровня автоматизации на дороги общего пользования позволит повысить общую эффективность ее эксплуатации, за счет влияния внедряемых автоматизированных систем управления ТТМ на пропускную способность дорог, плотность и среднюю скорость транспортного потока.

Показатель пропускной способности дорог, то есть максимально возможное число ТТМ, проходящих через сечение дороги в определенный период времени, может меняться с учетом факторов, таких как дорожные условия, состав транспортного потока, наличия средств автоматизированного управления движением, конструкции ТТМ, участвующих в движении и пр.

3.5.2 Формирование имитационной модели перевозочного процесса

При формировании имитационной модели выбираются в первую очередь участки с наиболее затрудненным движением в часы пиковой нагрузки (интервалы 7:00-8:40, 17:20-19:00), в интерфейсе программы отрисовываются модели выбранных участков, настраиваются разрешенные направления движения

(рисунок 27), светофорное регулирование (рисунок 28), автобусное движение, парковочные зоны (рисунок 29) и пешеходные переходы (рисунок 30).

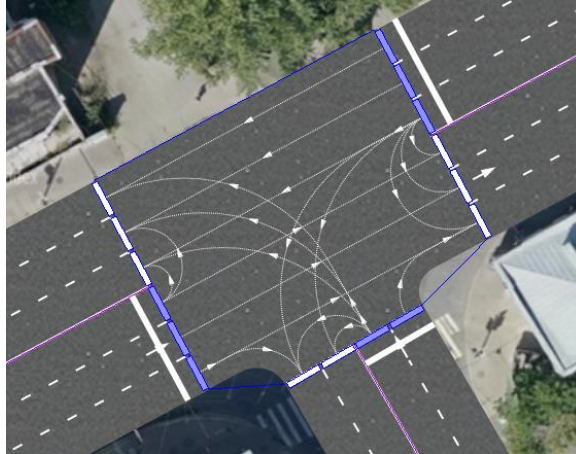


Рисунок 27 – Направления движения участка модели (составлено автором)

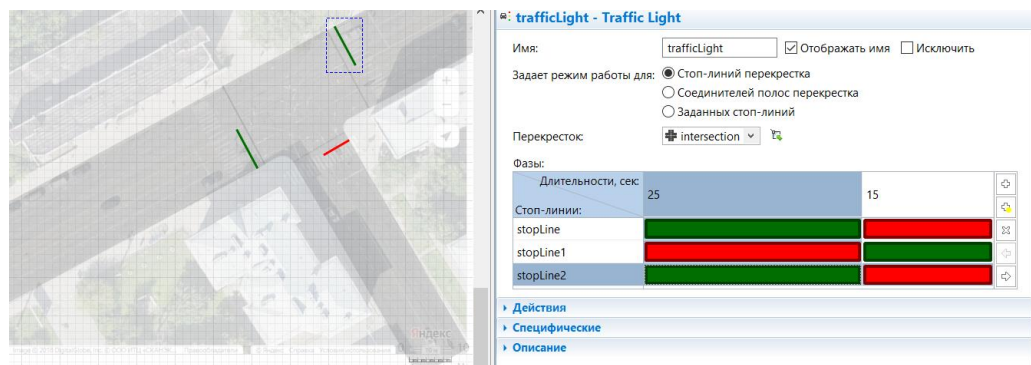


Рисунок 28 – Интерфейс настройки светофорного регулирования выбранного участка модели (составлено автором)

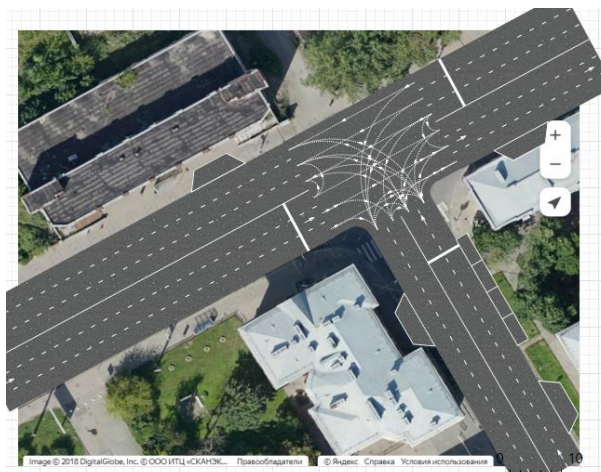


Рисунок 29 – Интерфейс настройки остановок общественного транспорта и парковочных мест (составлено автором)

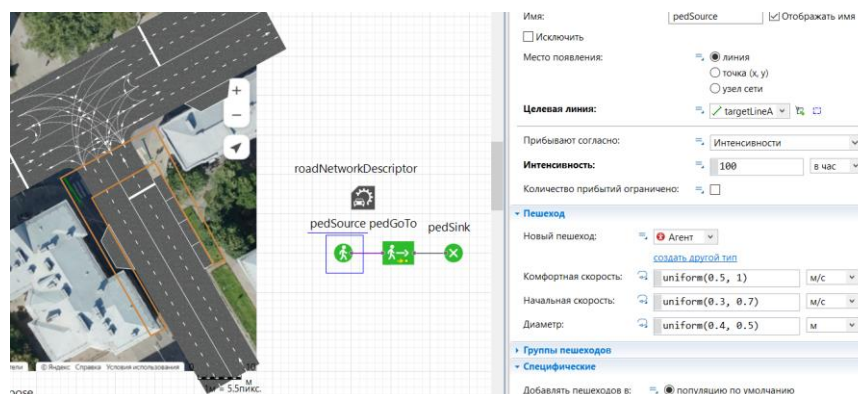


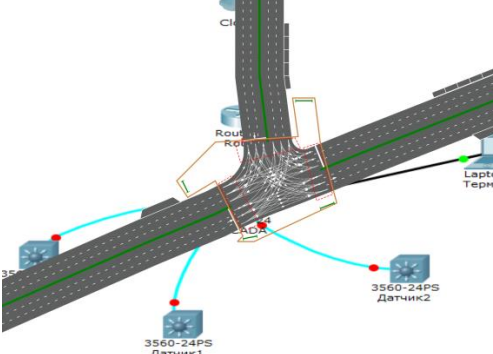
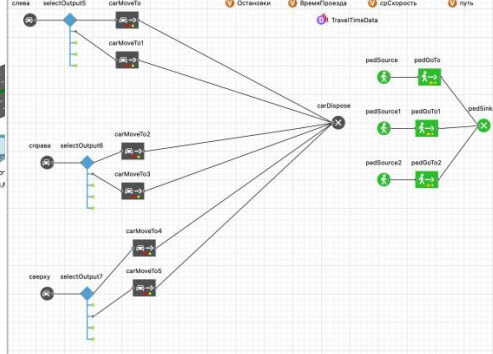

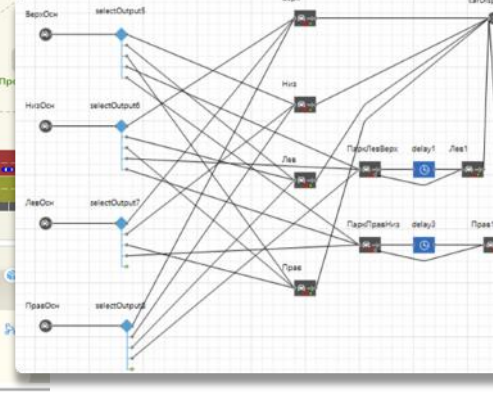

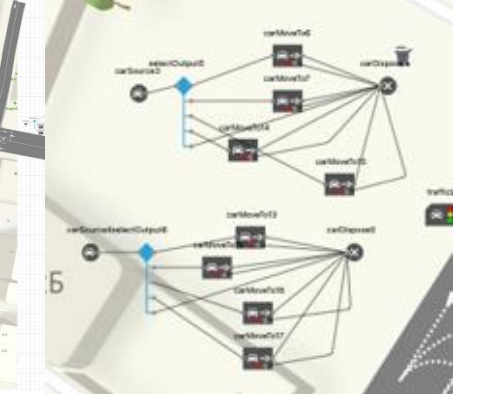

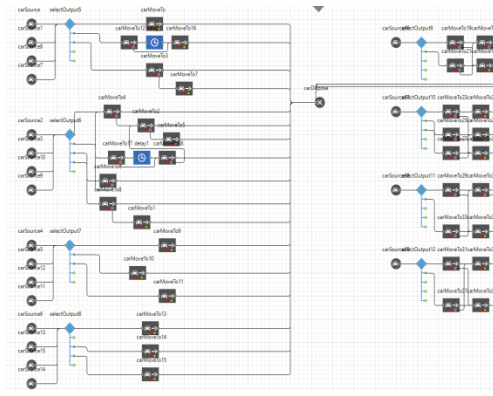
Рисунок 30 – Интерфейс настройки пешеходных переходов (составлено автором)

В качестве моделей выбраны 9 участков города Санкт-Петербурга, включающих перекрестки, круговые дороги, участки съезда с Западного Скоростного диаметра, для разнородности используемых моделей. Таким образом, разработаны модели, учитывающие конфигурацию транспортной инфраструктуры и уровень цифровизации (таблица 20).

Таблица 20 – Моделирование участков дорожно-транспортной инфраструктуры (по данным автора)

Участок	Внешний вид модели	Логика движения
Новоизмайловский проспект – Кузнецовская улица		
Новосмоленская набережная – Наличная улица		

Продолжение Таблицы 20

Участок	Внешний вид модели	Логика движения
<p>Проспект Энергетиков – Заневского</p>		
<p>Улица Есенина – улица Сикейроса</p>		
<p>Проспект Генерала Острякова – Улица Олега Кошевого</p>		
<p>Проспект Стачек</p>		

Во многих исследованиях утверждается, что при повышении уровня автоматизации и количества автоматизированных ТТМ показатели эффективности функционирования эксплуатационных показателей перевозочного процесса, такие как пропускная способность дорог, плотность транспортного

потока и средняя скорость потока, будут увеличиваться [81, 111, 116]. Повышение показателей обусловлено снижением человеческого фактора при начале движения и торможении, более плавных набора скорости и торможения, уменьшения интервалов между ТТМ за счет определения необходимого расстояния при внедрении радарно-лидарных комплексов и подключения к датчикам транспортной инфраструктуры, характерное для V2X-подключения [99].

Для имитации такого подключения использованы основные параметры (таблица 21).

Таблица 21 – Параметры моделирования ТТМ разных уровней автоматизации (по данным автора)

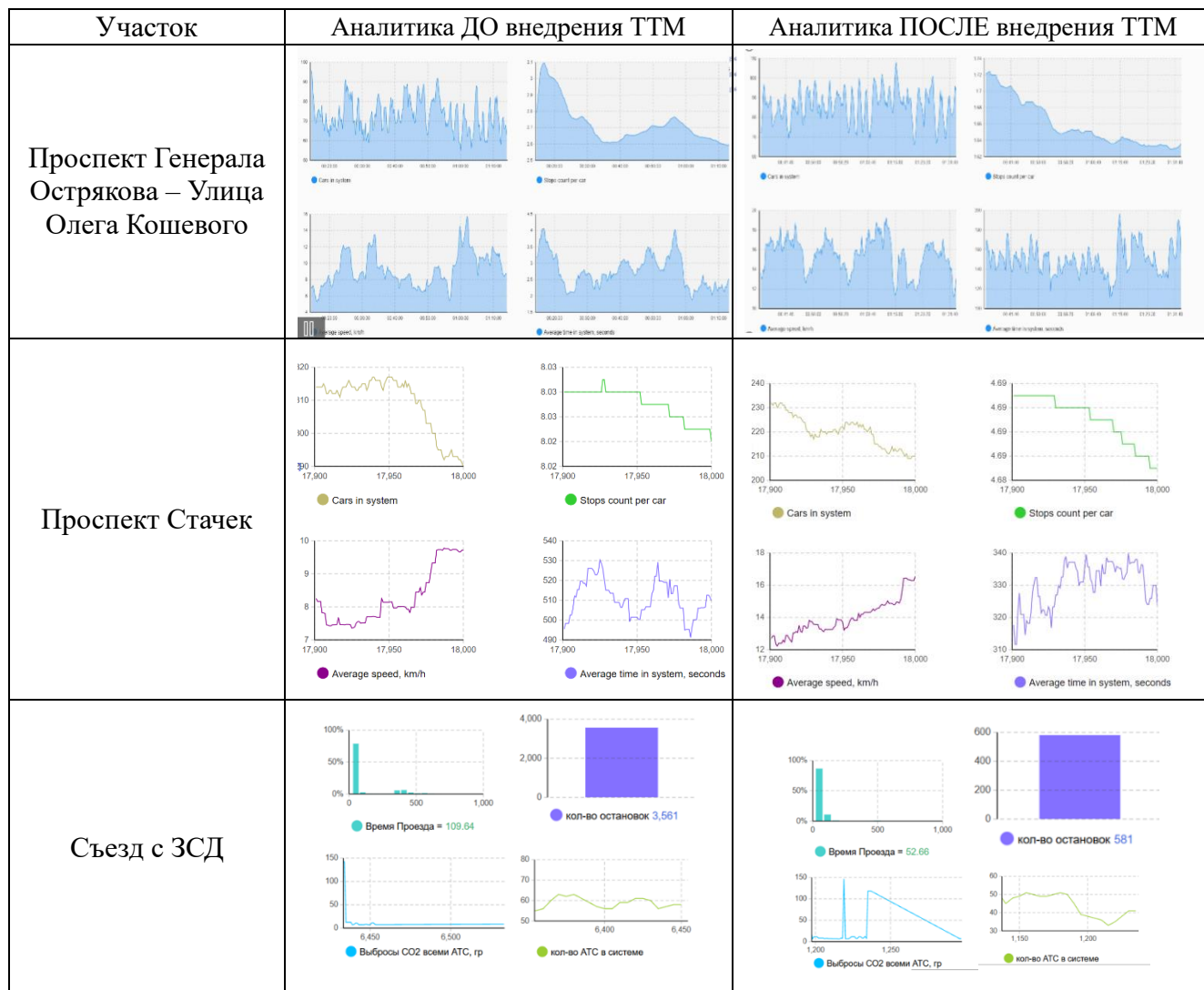
Уровень	Параметры AnyLogic	Функция
L0-L1	$reactionTime = 1.5-2.5$ с $minFollowingDistance = 2.0-2.5$ м/с (по скорости) $aggressiveness = 0.3-0.6$	«carMoveTo» с задержкой реакции через «uniform(1.5, 2.5)»
L2	$reactionTime = 0.8-1.2$ с $minFollowingDistance = 1.5$ м/с Адаптивный круиз-контроль (условия в onEnter блока)	«statechart» для режимов «ручной/автоматический»
L3-L4	$reactionTime = 0.2-0.5$ с $minFollowingDistance = 0.8-1.2$ м/с Координация с участниками движения через сообщения	«send()/receive()» для обмена данными между агентами
L5	$reactionTime \approx 0$ $minFollowingDistance = 0.5$ м/с Централизованное планирование маршрутов	Интеграция с pedestrian-подобной логикой через moveTo()

С целью определения зависимостей влияния изменения уровня автоматизации ТТМ на показатели дорожного движения, был совершен ряд экспериментов и получены динамичные графики (таблица 22).

Таблица 22 – Аналитика до и после внедрения автоматизированных систем управления ТТМ (по данным автора)

Участок	Аналитика ДО внедрения ТТМ	Аналитика ПОСЛЕ внедрения ТТМ
Новоизмайловский проспект – Кузнецовская улица		
Новосмоленская набережная – Наличная улица		
Проект Энергетиков – Заневского		
Улица Есенина – улица Сикейроса		

Продолжение Таблицы 22



3.5.3 Обработка результатов исследования

По проведенным моделям были получены и усреднены следующие данные:

1. Изменение пропускной способности дорог (авт/ч) при разном количестве внедрения автоматизированных систем управления ТТМ, по результатам которого установлено увеличение пропускной способности транспортной инфраструктуры до 53% (рисунок 31, таблица 23).

Таблица 23 – Результаты изменения пропускной способности транспортной инфраструктуры при внедрении автоматизированных систем управления ТТМ (по данным автора)

Уровень автоматизации	0–20% ТТМ	20–40%	40–60%	60–80%	80–100%
L0 (ручное)	1800	1800	1800	1800	1800
L1	1850	1900	1950	2000	2050

Продолжение Таблицы 23

Уровень автоматизации	0–20% ТТМ	20–40%	40–60%	60–80%	80–100%
L2	1900	2000	2100	2200	2300
L3	2000	2200	2400	2600	2700
L4	2100	2400	2700	3000	3200
L5	2200	2500	2800	3100	3400

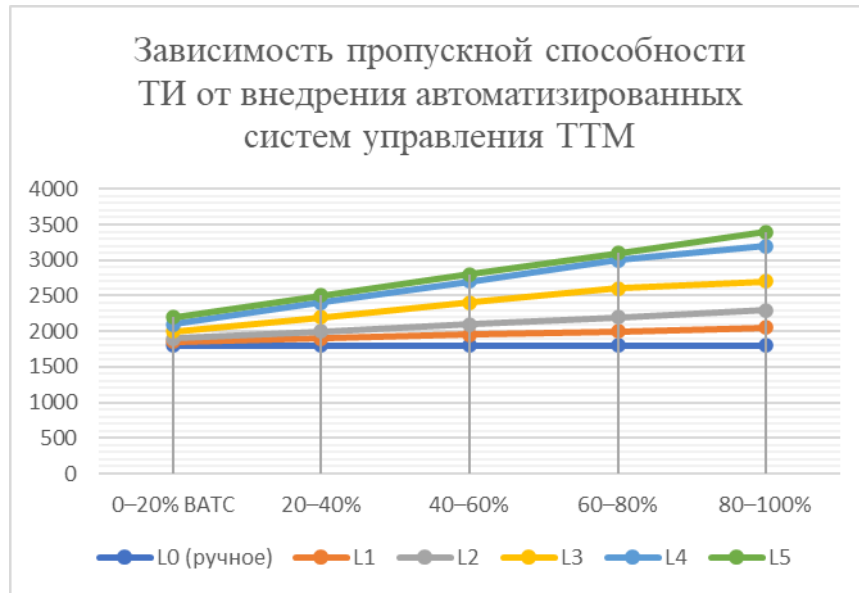


Рисунок 31 – Зависимость пропускной способности ТИ от уровня автоматизации ТТМ (составлено автором)

2. Средняя скорость потока (км/ч) за счет возможности подключения к элементам транспортной инфраструктуры и сокращению времени на реакцию водителя ТТМ, повысилась до 66% (рисунок 32, таблица 24).

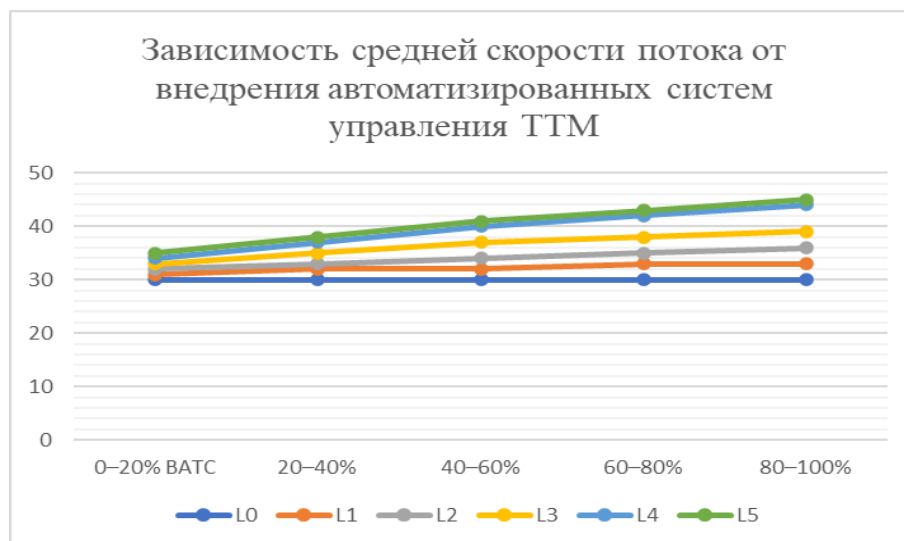


Рисунок 32 – Зависимость средней скорости потока от уровня автоматизации ТТМ (составлено автором)

Таблица 24 – Результаты изменения средней скорости потока транспортной инфраструктуры при внедрении автоматизированных систем управления ТТМ (по данным автора)

Уровень автоматизации	0–20% ТТМ	20–40%	40–60%	60–80%	80–100%
L0	30	30	30	30	30
L1	31	32	32	33	33
L2	32	33	34	35	36
L3	33	35	37	38	39
L4	34	37	40	42	44
L5	35	38	41	43	45

3. Плотность потока (авт/км) при внедрения автоматизированных систем управления ТТМ увеличилась до 73% за счет сокращения пространства между ТТМ при их движении при повышении средней скорости потока (рисунок 33, таблица 25).

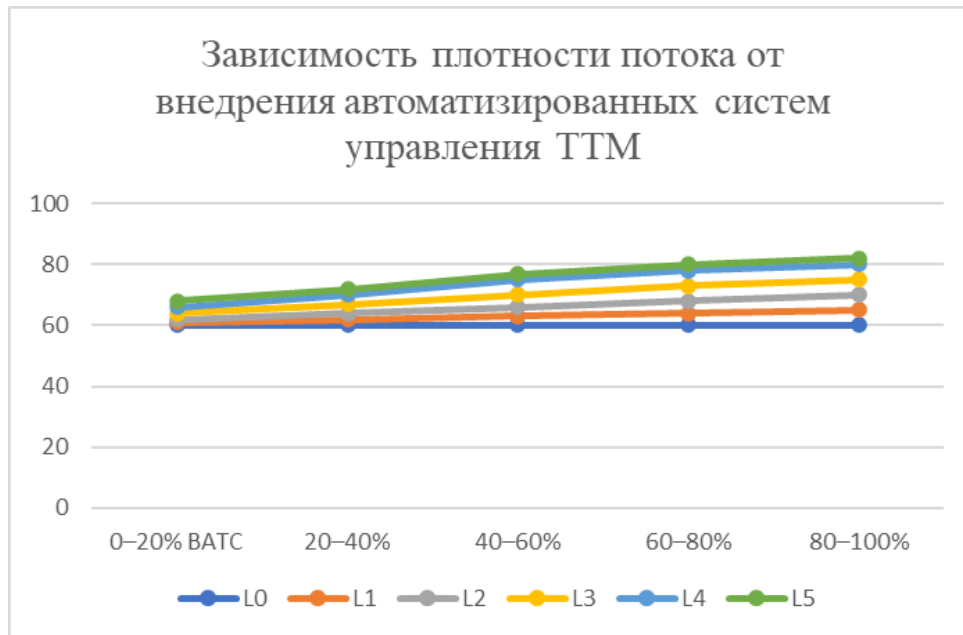


Рисунок 33 – Зависимость плотности потока от уровня автоматизации ТТМ (составлено автором)

Таблица 25 – Результаты изменения плотности потока при внедрении автоматизированных систем управления ТТМ (по данным автора)

Уровень автоматизации	0–20% ТТМ	20–40%	40–60%	60–80%	80–100%
L0	60	60	60	60	60
L1	61	62	63	64	65
L2	62	64	66	68	70
L3	64	67	70	73	75
L4	66	70	75	78	80
L5	68	72	77	80	82

Таким образом, усредненные зависимости результатов моделирования движения на эксплуатационные показатели движения в ПО AnyLogic примут вид (таблица 26).

Таблица 26 – Зависимости эксплуатационных показателей движения при внедрении АСУ ТТМ (по данным автора)

Показатель	Регрессионная зависимость	График
Пропускная способность дорог	<p>- при внедрении АСУ в частные ТТМ: $y = 1,5x - 4,6667$ $R^2 = 0,9838$</p> <p>- при внедрении АСУ в общественный транспорт: $y = 0,7429x + 0,8571$ $R^2 = 0,973$</p> <p>- при внедрении комбинированных ТТМ: $y = 1,55x - 0,3333$ $R^2 = 0,9834$</p>	
Средняя скорость потока	<p>- при низкой инфраструктурной поддержке: $y = 0,2029x - 0,1429$ $R^2 = 0,9865$</p> <p>- при высокой инфраструктурной поддержке: $y = 0,3129x + 0,1905$ $R^2 = 0,9666$</p>	
Плотность транспортного потока	$y = 0,6057x + 6,0476$ $R^2 = 0,9536$	

3.6 Выводы по Главе 3

Проведенное экспериментальное исследование по влиянию внедрения автоматизированных систем управления транспортно-технологических машин, с целью качественно оценить их вклад в уровень автоматизации ТТМ, позволило установить зависимости повышения уровня автоматизации ТТМ на эксплуатационные показатели перевозочного процесса, следовательно, повысить ее общую эффективности.

К основным результатам можно отнести:

1. Выявлены основные функциональные свойства ТТМ, влияющие на уровень ее автоматизации и на долю участия водителя ТТМ в процессе ее управления. Определены методики формирования функциональной и физической архитектур автоматизированных систем управления ТТМ, исходя из требований к функциональной безопасности электронных систем ее управления.

2. Предложена модель функциональной архитектуры системы экстренного торможения грузовой транспортно-технологической машины для проведения экспериментального исследования по влиянию автоматизированных систем управления ТТМ на изменение доли участия водителя в процессе ее управления. Определены максимально допустимые продольные и поперечные отклонения выполнения имитационного моделирования.

3. Экспериментальная оценка влияния автоматизированных систем управления ТТМ на долю участия водителя в процессе движения ТТМ выявила изменение времени, затрачиваемого водителем, на управляющие воздействия ТТМ за счет срабатывания автоматизированных систем ее управления, на основании чего определены показатели коэффициента ручного управления ТТМ.

4. На основании проведенного исследования по внедрению автоматизированных систем управления в состав ТТМ выявлены закономерности их влияния на эксплуатационные показатели перевозочного процесса – среднюю скорость движения ТТМ, пропускную способность и плотность транспортного потока, доказывающие повышение эффективности перевозочного процесса до 40%.

Однако, проведенное исследование требует технико-экономической оценки с целью установления окупаемости внедрения автоматизированных систем управления на предприятии минерально-сырьевого комплекса.

ГЛАВА 4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ РЕШЕНИЙ. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ

4.1 Результаты исследования по оценке влияния автоматизированных систем управления на эффективность перевозочного процесса

Одним из направлений развития национальной сети интеллектуальной транспортной системы является внедрение автоматизированных систем управления ТТМ и повышение уровня их автоматизации на дорогах общего пользования, позволяющих снять часть нагрузки по управлению с водителей ТТМ [51-53]. Систематизация применения ADAS (Advanced Driver Assistance Systems — продвинутое системы помощи водителю) является одной из возможных методик определения уровней автоматизации ТТМ [3]. На данный момент до сих пор не разработаны четкие границы уровней функций ADAS, хотя многие производители уже используют терминологию «ADAS...уровня» (таблица 27) [54, 55].

Таблица 27 – Уровни автоматизации ADAS (по данным автора)

Уровни автоматизации ADAS	Поддерживаемые функции	Необходимые интеграционные системы
ADAS 1 уровня	Предотвращение блокировки колес ТТМ при торможении, поддержание заданной скорости, контроль поперечной динамики ТТМ	Антиблокировочная система ABS, круиз-контроль, система стабилизации и курсовой устойчивости ESP
ADAS 2 уровня	Варьирование скорости в зависимости от дистанции до попутного транспорта или стационарной преграды, определение скорости движения попутных ТТМ, сверка данных от датчиков, обработка и сверка с параметрами, заданными водителем, снижение тормозного пути без блокировки колес с различием экстренного торможения от обычного по параметрам скорости, нажатия на педаль и глубины выжима педали	Адаптивный круиз-контроль ACC уровня Stop-Go, дополнительное ПО для передачи команд на системы ТТМ – тормозную, курсовой устойчивости, дроссельную заслонку и т.д., система экстренного торможения ЕВА
ADAS 3 уровня	Уведомление водителя о пересечении дорожной разметки звуком или вибрацией	Система помощи в удержании полосы LKA, уведомление о выходе из полосы LDW

Продолжение Таблицы 27

Уровни автоматизации ADAS	Поддерживаемые функции	Необходимые интеграционные системы
ADAS 4 уровня	Удерживание ТТМ в центре занимаемой полосы движения, считывание информации с дорожных знаков, анализ требований распознаваемых знаков и сопоставление с текущими показателями скорости и другими параметрами, сигнализирование в случае несоответствия	Активная помощь в удержании полосы движения Active LKA, Система распознавания дорожных знаков ISA
ADAS 5 уровня	Автоматическое планирование маршрутов с возможностью ручной корректировки, функции выполнения маневров, проезд перекрестков	Внутренние и внешние сенсоры, алгоритмы компьютерного зрения, система выстраивания и следования маршруту
ADAS 6 уровня	Поддержание полностью автоматизированного движения транспортного средства с возможностью выполнения маневра минимального риска	

При этом количество транспортно-технологических машин, оснащенных интеграционными технологиями, стремительно растет (рисунок 34).

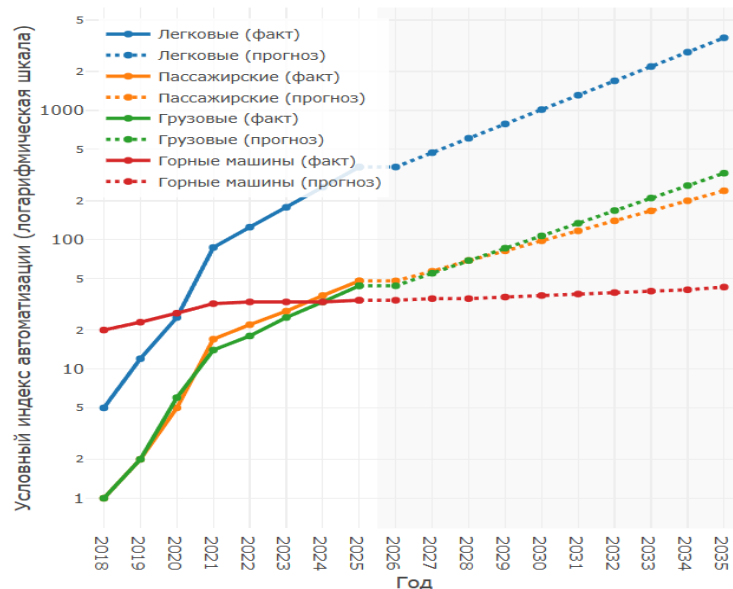


Рисунок 34 – Автоматизация транспортно-технологических машин до 2025 года;
прогноз автоматизации транспортно-технологических машин до 2035 года
(пунктиром) (составлено автором)

Современные транспортные системы сталкиваются с растущими издержками, связанными с эксплуатацией подвижного состава, в том числе

значительной долей расходов на оплату труда водителей. Одним из перспективных направлений снижения операционных затрат является внедрение ТТМ 4–5 уровней автоматизации по классификации SAE International, позволяющие полностью или частично исключить участие человека в процессе управления.

4.2 Определение параметров оценки ручного управления транспортно-технологических машин на различных уровнях их автоматизации

Внедрение автоматизированных систем управления ТТМ обеспечивает значительное сокращение операционных затрат за счёт исключения или снижения роли водителя. Зарубежный опыт развития интеллектуальной транспортной системы Японии и Китая демонстрируют, что с ростом уровня автоматизации коэффициент ручного управления ТТМ (K_y) снижается в 5–8 раз, что напрямую повышает безопасность и экономическую эффективность транспортных операций.

Коэффициент ручного управления (K_y) – условный показатель, отражающий фактическую трудоемкость ручного труда водителя в процессе вождения ТТМ, который может меняться в зависимости от уровня автоматизации ТТМ, связанного с возможностью ТТМ выполнять часть функций в автоматизированном режиме за счет АСУ ТТМ; количественный показатель, позволяющий нормировать рабочее время в зависимости от степени автоматизации ТТМ, повышая экономическую эффективность при увеличении производительности труда.

Нормы трудового времени водителей ТТМ разработаны в расчёте на ручной режим управления и не учитывают снижение нагрузки водителя при использовании систем автоматизации ТТМ. В условиях постепенного внедрения автоматизированных систем управления ТТМ возникает необходимость в формировании коэффициента ручного управления ТТМ, который бы отражал реальный уровень функций по управлению ТТМ человеком в процесс его эксплуатации: Коэффициент ручного управления (20) ТТМ является

комплексным показателем и складывается из воздействия водителя на отдельные системы (таблица 28).

$$K_{yi} = \frac{1}{n} (\sum F_{0y} * \Delta x_i) \quad (20)$$

Таблица 28 – Функции по управлению ТТМ (по данным автора)

Функции по управлению водителем ТТМ в процессе эксплуатации	Обозначение	При повышении уровня автоматизации ТТМ	
Управление направлением движения (руление)	$F_{0рул}$	$F_{1рул} = \Delta x_1 F_{0рул}$ $F_{2рул} = \Delta x_2 F_{0рул}$ $F_{3рул} = \Delta x_3 F_{0рул}$ $F_{4рул} = \Delta x_4 F_{0рул}$	
Управление продольной динамикой (ускорение/торможение)	$F_{0уск}, F_{0торм}$	$F_{1уск} = \Delta x_1 F_{0уск}$ $F_{2уск} = \Delta x_2 F_{0уск}$ $F_{3уск} = \Delta x_3 F_{0уск}$ $F_{4уск} = \Delta x_4 F_{0уск}$	$F_{1торм} = \Delta x_1 F_{0торм}$ $F_{2торм} = \Delta x_2 F_{0торм}$ $F_{3торм} = \Delta x_3 F_{0торм}$ $F_{4торм} = \Delta x_4 F_{0торм}$
Мониторинг дорожной обстановки	$F_{0мон}$...	
Принятие решений (выбор траектории, манёвров)	$F_{0реш}$...	
Контроль состояния ТТМ и отдельных систем	$F_{0кон}$...	

Значение критерия ручного управления $K_y = 0,15$ принято в качестве порога, отделяющего низкие уровни автоматизации (L0–L1) от высокоавтоматизированных (L2 и выше).

На уровне L0–L1 реализуются лишь базовые функции передвижения без интеграции систем активной безопасности, адаптивного управления или обмена данными с инфраструктурой. Соответственно, из девяти функциональных возможностей реализуются не более 2–3 (например, базовая управляемость и устойчивость), причём с коэффициентами $K_i \leq 0,2$. Учитывая веса, суммарный вклад в не превышает 0,12–0,15. Таким образом, порог $K_{зф} = 0,15$ формально отражает наличие в составе ТТМ хотя бы одной активной интеграционной системы, способной оказывать целенаправленное влияние на функциональные свойства машины (например, адаптивный круиз-контроль, автоматическое экстренное торможение или базовая система самодиагностики).

Верхняя граница соответствует уровню L5 (полная автоматизация). При этом предполагается, что реализованы все выбранные функциональные

возможности на уровне не ниже 0,85–0,95 (в силу физических и экономических ограничений абсолютная реализация $K_i = 1$ недостижима). В условиях высокой интеграции с транспортной инфраструктурой, полной отказоустойчивости и наличия прогностической аналитики суммарный критерий приближается к верхней границе 0,85–0,90. Значение $K_{уст} = 0,85$ установлено как технически достижимый уровень автоматизации в условиях контролируемой технологической среды (например, горный карьер), где отсутствуют стохастические внешние факторы, характерные для общих дорог.

Установлено, что минимально допустимое значение $K_{уст} = 0,15$ соответствует порогу интеллектуализации, начиная с которого ТТМ считается высокоавтоматизированным. Верхняя граница критерия ($K_{уст} \geq 0,85$) условно соответствует уровню полной автоматизации (L5). Промежуточные границы уровней автоматизации установлены линейно-интерполяционным методом с учётом нелинейности восприятия интеллектуальности экспертами.

Для верификации предложенных границ был проведён опрос группы из экспертов в области интеллектуальных транспортных систем, проектирования горной техники и систем управления. Экспертам были предложены различные гипотетические конфигурации АСУ ТТМ с заданными наборами реализованных функциональных возможностей и просили отнести каждую к одному из уровней автоматизации L0–L5 (рисунок 35).

На основании полученных оценок был построен распределительный профиль значений $K_{уст}$ по уровням автоматизации. Медианные значения оказались следующими:

L0–L1: медиана, 90-й перцентиль = 0,14

L2: медиана = 0,28, 10-й перцентиль = 0,16, 90-й = 0,38

L3: медиана = 0,53, диапазон = [0,41; 0,64]

L4: медиана = 0,74, диапазон = [0,66; 0,83]

L5: медиана = 0,88

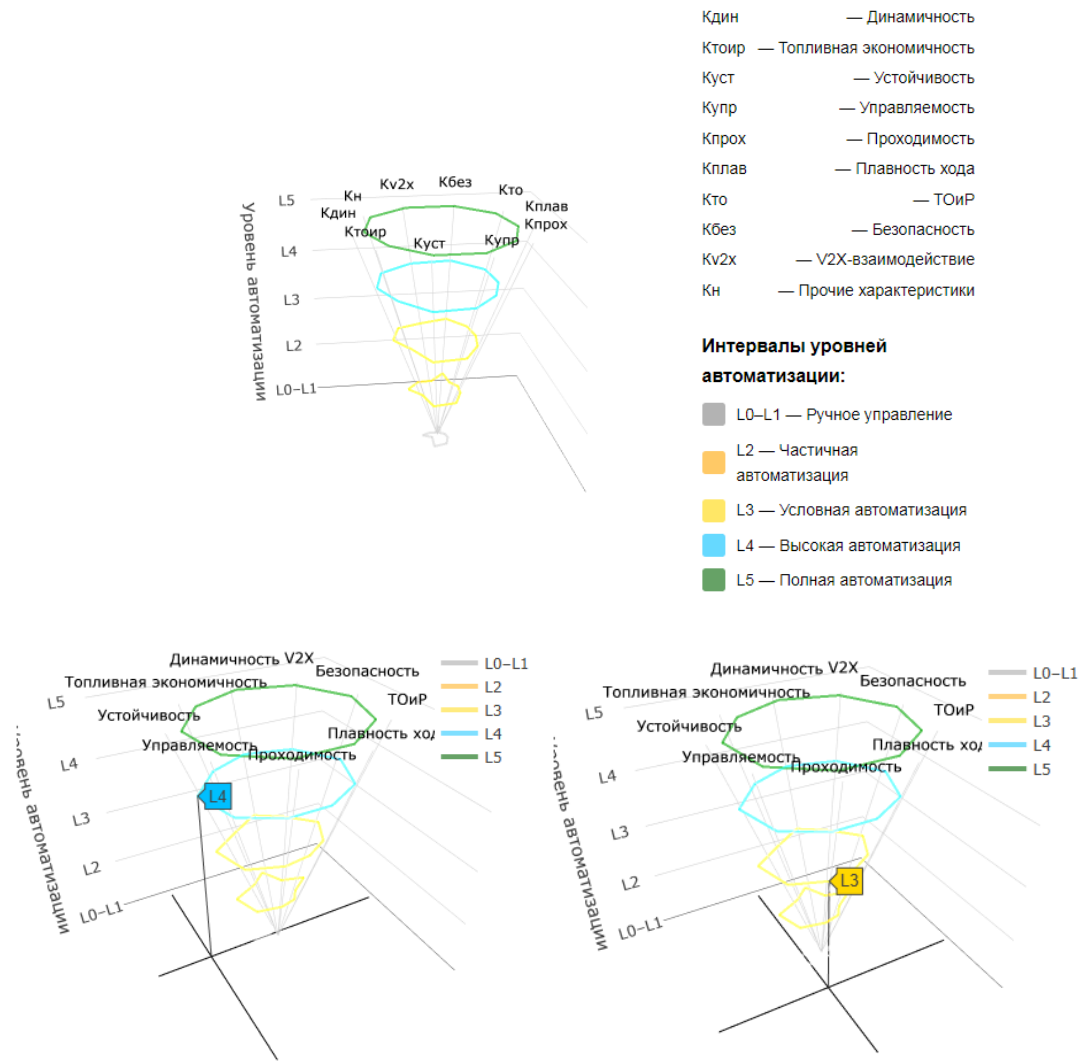


Рисунок 35 – Результаты моделирования поверхности уровней автоматизации при разной степени реализации функциональных возможностей транспортно-технологических машин (составлено автором)

Полученные эмпирические границы практически совпадают с теоретически предложенными. Коэффициент конкордации Кендалла составил $W = 0,613$, что подтверждает статистическую значимость согласованности экспертных мнений и обоснованность выбранных пороговых значений (таблица 29).

Таблица 29 – Определение коэффициента ручного управления ТТМ (по данным автора)

Уровень автоматизации ТТМ	Участие водителя	Средний коэффициент ручного управления
L0-L1 (ручное управление / помощь)	Водитель полностью отвечает за управление	1.0 (базовый)
L2 (частичная автоматизация)	Адаптивный круиз-контроль	0.7-0.8

Продолжение Таблицы 29

Уровень автоматизации ТТМ	Участие водителя	Средний коэффициент ручного управления
L3 (условная автоматизация)	Система управляет в определённых условиях, но требует вмешательства	0.4–0.6
L4–L5 (высокая/полная автоматизация)	Водитель не требуется или находится в пассивной роли	≤ 0.1

* $K_y = 1.0$ соответствует полной нагрузке водителя при ручном управлении; значения ниже – снижение нагрузки.

Однако, в связи со спецификой эксплуатации различного вида транспорта, K_y уточняется для грузового транспорта (таблица 30), легкового (таблица 31), пассажирского (таблица 32) и горного транспорта (таблица 33). Усредненные данные представлены в таблице 34.

1. Грузовой транспорт

Таблица 30 – Показатель коэффициента ручного управления для грузового транспорта (по данным автора)

Уровень автоматизации ТТМ	Участие водителя	Средний коэффициент ручного управления	Обоснование
L0–L1	Полное ручное управление	1.0	Постоянная концентрация, физическая нагрузка, риск «гипноза дороги»
L2	Адаптивный круиз + удержание полосы	0.75	Снижена нагрузка на педали и руль, но требуется постоянный контроль
L3	Автопилот на трассе (водитель в режиме ожидания)	0.45	Водитель может отвлечься, но должен быть готов к вмешательству (повышает стресс)
L4	Полная автоматизация на маршрутах (без водителя в кабине)	0.05	Водитель отсутствует; при наличии оператора — только мониторинг

2. Легковой транспорт

Таблица 31 – Показатель коэффициента ручного управления для легкового транспорта (по данным автора)

Уровень автоматизации ТТМ	Средний коэффициент ручного управления	Обоснование
L0–L1	1.0	Постоянное внимание в потоке, частые манёвры, светофоры

Продолжение Таблицы 31

Уровень автоматизации ТТМ	Средний коэффициент ручного управления	Обоснование
L2	0.70	Снижена нагрузка на удержание скорости и дистанции, но контроль обязателен
L3	0.50	Водитель может читать или смотреть видео на трассе, но не в городе
L4	0.10	Полная автономия в геозоне (например, город-спутник); водитель — пассажир
L5	0.0	Полная автоматизация

3. Пассажирский транспорт

Таблица 32 – Показатель коэффициента ручного управления для пассажирского транспорта (по данным автора)

Уровень автоматизации ТТМ	Средний коэффициент ручного управления	Обоснование
L0–L1	1.0	Постоянное переключение внимания: дорога, пассажиры, остановки
L2	0.80	Помощь в удержании полосы и торможении, но управление — на водителе
L3	0.60	Автоматизация на выделенных участках (например, между остановками), но требуется контроль при манёврах
L4	0.15	Автономный автобус на фиксированном маршруте (например, в аэропорту или новом районе); оператор реагирует только на ЧС
L5	0.0	Полностью автономный общественный транспорт

4. Горный транспорт (самосвалы, карьерная техника)

Таблица 33 – Показатель коэффициента ручного управления для горного транспорта (по данным автора)

Уровень автоматизации ТТМ	Средний коэффициент ручного управления	Обоснование
L0–L1	1.0	Максимальная нагрузка: управление 200+ тонной машиной на уклонах
L2	0.85	Ограниченная помощь (например, автоматическое торможение на спуске)
L3	0.65	Частичная автоматизация маршрута, но водитель контролирует погрузку/разгрузку
L4	0.20	Полная автономия на закрытой территории карьера; диспетчер в центре управления
L5	0.0	Не применим в текущей практике (горная техника всегда работает в ограниченной зоне, следовательно, L4 достаточно)

Обобщённая таблица K_y по типам транспорта:

Таблица 34 – Средний показатель коэффициента ручного управления при варьировании уровней автоматизации ТТМ (по данным автора)

Тип транспорта	L0-L1	L2	L3	L4	L5
Грузовой	1.0	0.75	0.45	0.05	0.0
Легковой	1.0	0.70	0.50	0.10	0.0
Пассажирский	1.0	0.80	0.60	0.15	0.0
Горный	1.0	0.85	0.65	0.20	0.0

Традиционные нормы рабочего времени водителей (например, в ЕС — не более 9 часов в день, с перерывами каждые 4,5 часа) основаны на предположении полной ручной нагрузки ($K_y = 1.0$). Однако с ростом уровня автоматизации участие водителя в процессе вождения снижается, что позволяет пересмотреть эти нормы в сторону увеличения допустимой продолжительности работы в безопасных пределах.

4.3 Разработка модели нормирования ручного управления транспортно-технологической машины

В случае перехода к ТТМ 4-5 уровней автоматизации можно использовать инверсную пропорциональность между K_y и допустимым временем работы (21):

$$T_i = K_i / T_{\max}, \quad (21)$$

где T_{\max} – максимально допустимая продолжительность работы при ручном управлении (например, 9 часов),

K_i – коэффициент ручного управления на уровне автоматизации i ,

T_i – скорректированная допустимая продолжительность работы на уровне автоматизации i .

Однако для обеспечения безопасности и предотвращения чрезмерного увеличения времени работы, целесообразно ввести верхний лимит (например, не более 14–16 часов в сутки даже при высокой автоматизации), а также учитывать минимальные перерывы.

То есть для грузового транспорта (таблица 35).

Таблица 35 – Коэффициент ручного управления ТТМ при расчете эквивалентного времени вождения (по данным автора)

Уровень автоматизации ТТМ	K_y	Расчетное $T1=9 / K_y$	Рекомендуемое нормированное время (с ограничением)
L0–L1	1.0	9.0 ч	9 ч
L2	0.75	12.0 ч	12 ч
L3	0.45	20.0 ч	14 ч (с обязательным перерывом ≥ 45 мин каждые 6 ч)
L4	0.05	180 ч	16 ч (водитель в роли оператора/монитора; перерывы каждые 4–5 ч)
L5	0.0	-	Водитель не требуется; работа без ограничений по времени

Обобщенная таблица по видам транспорта примет вид (таблица 36).

Таблица 36 – Коэффициент ручного управления ТТМ по типам транспорта (по данным автора)

Тип транспорта	Max K_y (L0-L1)	Min КУВ (L4-L5)	Возможное увеличение рабочего времени при L3-L4
Грузовой	1.0	0.05	До 2–2.5 раз
Легковой	1.0	0.10	До 1.8–2 раз
Пассажирский	1.0	0.15	До 1.5–1.7 раз (из-за ответственности за пассажиров)
Горный	1.0	0.20	До 1.5 раз (работа в закрытой зоне, но высокие риски)

Формирование методики определения эквивалентного активного времени (ЭАВ) при смене с учетом разных уровней автоматизации, позволит внедрить гибкие режимы работы, складываемые из:

1. Фактическое рабочее время (ФРВ) – общая продолжительность смены, включая все режимы (активные и пассивные).
2. Эквивалентное активное время (ЭАВ) – условное время, эквивалентное по утомляемости ручному управлению в течение ЭАВ часов.

В случае, если водитель в течении смены использовал разные уровни автоматизации на разных участках маршрута, то (22):

$$\text{ЭАВ} = \sum_{i=1}^n (t_i * K_{y_i}), \quad (22)$$

где t_i — время (в часах), проведённое на уровне автоматизации i ;

K_{y_i} — коэффициент ручного управления для уровня i ;

n — количество сегментов с разным уровнем автоматизации.

При котором единица измерения ЭАВ – часы ручного управления ТТМ.

При этом нормативные ограничения максимально допустимого ЭАВ за смену:

1. ≤ 9 часов – для стандартных условий (аналогично норме ЕС и РФ для междугородних перевозок);
2. ≤ 10 часов – допускается не более 2 раз в неделю (согласно ст. 329 ТК РФ).
3. Общее рабочее время (ФРВ) не должно превышать 12 часов (для водителей грузового транспорта при междугородних перевозках).

Внедрения коэффициента ручного управления ТТМ позволит нормировать время работы водителя исходя из установленного уровня автоматизации транспортно-технологической машины (23):

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = k_{\text{ут}} N(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (23)$$

Нереализованный потенциал эксплуатации техники, возникающий в следствии человеческого фактора в процессе вождения, отмечен на графиках зависимости рабочего времени (ч.) от уровня автоматизации (L0-L5) в красной зоне (таблица 37).

Разрозненное применение технических и эргономических подходов к оценке автоматизации ТТМ не позволяет в полной мере учитывать взаимосвязь между возможностями техники и лимитами человека.

Таблица 37 – Зависимость рабочего времени от уровня автоматизации ТТМ (по данным автора)

Тип транспортно-технологической машины	Зависимость рабочего времени от уровня автоматизации																		
Грузовой транспорт	<p>График зависимости рабочего времени от уровня автоматизации для грузового транспорта. Ось X: Уровень автоматизации (L0-L1, L2, L3, L4, L5). Ось Y: Рабочее время, ч (0-25). Легенда: Зона риска (>12 ч) - розовая заливка; Расчётное время (Ф / КУВ) - синяя линия с квадратами; Допустимое по ТК РФ - зелёная пунктирная линия с квадратами; Порог ТК РФ (12 ч) - красная пунктирная линия.</p> <table border="1"> <caption>Данные для графика</caption> <thead> <tr> <th>Уровень автоматизации</th> <th>Расчётное время (Ф / КУВ), ч</th> <th>Допустимое по ТК РФ, ч</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L0-L1</td> <td>~9</td> <td>~12</td> </tr> <tr> <td>L2</td> <td>~12</td> <td>~12</td> </tr> <tr> <td>L3</td> <td>~20</td> <td>~12</td> </tr> <tr> <td>L4</td> <td>~16</td> <td>~16</td> </tr> <tr> <td>L5</td> <td>~16</td> <td>~16</td> </tr> </tbody> </table>	Уровень автоматизации	Расчётное время (Ф / КУВ), ч	Допустимое по ТК РФ, ч	L0-L1	~9	~12	L2	~12	~12	L3	~20	~12	L4	~16	~16	L5	~16	~16
Уровень автоматизации	Расчётное время (Ф / КУВ), ч	Допустимое по ТК РФ, ч																	
L0-L1	~9	~12																	
L2	~12	~12																	
L3	~20	~12																	
L4	~16	~16																	
L5	~16	~16																	

Продолжение Таблицы 37

Тип транспортно-технологической машины	Зависимость рабочего времени от уровня автоматизации																								
Пассажирский транспорт	<p>График зависимости рабочего времени от уровня автоматизации для пассажирского транспорта. Ось X: Уровень автоматизации (L0-L1, L2, L3, L4, L5). Ось Y: Рабочее время, ч (0-25). Легенда: Зона риска (>12 ч) - розовая заливка; Расчётное время (9 / КУВ) - синяя линия с квадратами; Допустимое по ТК РФ - зелёная пунктирная линия с квадратами; Порог ТК РФ (12 ч) - красная пунктирная линия.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Уровень автоматизации</th> <th>Расчётное время (9 / КУВ), ч</th> <th>Допустимое по ТК РФ, ч</th> <th>Порог ТК РФ (12 ч), ч</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L0-L1</td> <td>9</td> <td>9</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L2</td> <td>11</td> <td>11</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L3</td> <td>15</td> <td>12</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L4</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L5</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table>	Уровень автоматизации	Расчётное время (9 / КУВ), ч	Допустимое по ТК РФ, ч	Порог ТК РФ (12 ч), ч	L0-L1	9	9	12	L2	11	11	12	L3	15	12	12	L4	16	16	12	L5	16	16	12
Уровень автоматизации	Расчётное время (9 / КУВ), ч	Допустимое по ТК РФ, ч	Порог ТК РФ (12 ч), ч																						
L0-L1	9	9	12																						
L2	11	11	12																						
L3	15	12	12																						
L4	16	16	12																						
L5	16	16	12																						
Легковой транспорт	<p>График зависимости рабочего времени от уровня автоматизации для легкового транспорта. Ось X: Уровень автоматизации (L0-L1, L2, L3, L4, L5). Ось Y: Рабочее время, ч (0-25). Легенда: Зона риска (>12 ч) - розовая заливка; Расчётное время (9 / КУВ) - синяя линия с квадратами; Допустимое по ТК РФ - зелёная пунктирная линия с квадратами; Порог ТК РФ (12 ч) - красная пунктирная линия.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Уровень автоматизации</th> <th>Расчётное время (9 / КУВ), ч</th> <th>Допустимое по ТК РФ, ч</th> <th>Порог ТК РФ (12 ч), ч</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L0-L1</td> <td>9</td> <td>9</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L2</td> <td>12</td> <td>12</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L3</td> <td>18</td> <td>12</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L4</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L5</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table>	Уровень автоматизации	Расчётное время (9 / КУВ), ч	Допустимое по ТК РФ, ч	Порог ТК РФ (12 ч), ч	L0-L1	9	9	12	L2	12	12	12	L3	18	12	12	L4	16	16	12	L5	16	16	12
Уровень автоматизации	Расчётное время (9 / КУВ), ч	Допустимое по ТК РФ, ч	Порог ТК РФ (12 ч), ч																						
L0-L1	9	9	12																						
L2	12	12	12																						
L3	18	12	12																						
L4	16	16	12																						
L5	16	16	12																						
Горный транспорт	<p>График зависимости рабочего времени от уровня автоматизации для горного транспорта. Ось X: Уровень автоматизации (L0-L1, L2, L3, L4, L5). Ось Y: Рабочее время, ч (0-25). Легенда: Зона риска (>12 ч) - розовая заливка; Расчётное время (9 / КУВ) - синяя линия с квадратами; Допустимое (оператор/диспетчер) - зелёная пунктирная линия с квадратами; Порог ТК РФ (12 ч) - красная пунктирная линия.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Уровень автоматизации</th> <th>Расчётное время (9 / КУВ), ч</th> <th>Допустимое (оператор/диспетчер), ч</th> <th>Порог ТК РФ (12 ч), ч</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L0-L1</td> <td>9</td> <td>9</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L2</td> <td>10</td> <td>11</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L3</td> <td>14</td> <td>12</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L4</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>L5</td> <td>16</td> <td>16</td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table>	Уровень автоматизации	Расчётное время (9 / КУВ), ч	Допустимое (оператор/диспетчер), ч	Порог ТК РФ (12 ч), ч	L0-L1	9	9	12	L2	10	11	12	L3	14	12	12	L4	16	16	12	L5	16	16	12
Уровень автоматизации	Расчётное время (9 / КУВ), ч	Допустимое (оператор/диспетчер), ч	Порог ТК РФ (12 ч), ч																						
L0-L1	9	9	12																						
L2	10	11	12																						
L3	14	12	12																						
L4	16	16	12																						
L5	16	16	12																						

В диссертационном исследовании предложена комплексная методика аналитической оценки транспортных средств, объединяющая:

1. Техноценологический метод аналитической оценки уровня автоматизации ТТМ $K_{авт} \in [0; 0,9]$, отражающий степень реализации функциональных свойств ТТМ.

2. Коэффициент ручного управления ТТМ, характеризующий нагрузку на водителя и определяющий допустимую продолжительность активного вождения ТТМ.

Оба параметра нормированы и приведены к сопоставимым шкалам, что позволяет формировать многокритериальную целевую функцию эффективности автоматизации (24):

$$F = \alpha * K_{авт} + (1 - \alpha) * (1 - K_y) \quad (24)$$

где $\alpha \in [0;1]$ – весовой коэффициент, отражающий приоритет технической или человеческой составляющей в зависимости от специфики эксплуатации транспортно-технологической машины (например, $\alpha=0,7$ для карьерной техники, $\alpha=0,4$ для городского пассажирского транспорта); $K_{авт} \in [0,15;0,90]$ – обобщённый критерий техноценологической оценки уровня автоматизации, отражающий степень реализации функциональных свойств ТТМ за счёт автоматизированных систем управления; $K_y \in [0;1]$ – коэффициент ручного управления ТТМ.

Уровень автоматизации ТТМ оценивается по реализации функциональных свойств ТТМ и доле участия водителя в процессе эксплуатации ТТМ, посредством оценки снижения нагрузки на водителя, с целью сравнения разных конфигураций АСУ ТТМ для принятия решений при проектировании, выборе комплектаций, нормировании рабочего времени, а также экономической оценки целесообразности перехода на более высокий уровень автоматизации.

4.4 Аналитический аппарат оценки степени автоматизации транспортно-технологических машин

С целью установления зависимости степени автоматизации от технических возможностей транспортно-технологических машин, выражаемых как повышение функциональных свойств конкретного образца, и доли функций по управлению ТТМ в процесс вождения через коэффициент ручного управления ТТМ, получена математическая модель (25):

$$Y_{авт} = \frac{(1 + \sum K_n \left(\frac{A}{r_j^\beta} \right)) * N}{\sum_{i=1}^n (ЭАВ * t_i)} * 100\% \quad (25)$$

где $Y_{авт}$ – коэффициент эффективности автоматизации (в процентах); $K_{авт}$ – обобщённый критерий техноценологической оценки уровня автоматизации ($K_{авт} \in [0,15;0,90]$); N – нормативное значение.

Зависимость представляет собой интегральный показатель степени автоматизации транспортно-технологических машин, позволяющий оценить, насколько эффективно реализованные электронные системы управления снижают нагрузку на водителя.

Границы коэффициента эффективности автоматизации:

1. Верхний порог автоматизации, соответствующий уровню L5:

$K_{авт}=0,90$ и $\Delta АВ=0$ (так как водитель не нужен) $\rightarrow Y_{авт} \rightarrow \infty$, следовательно, необходимо ввести верхний порог, например, ограничить $Y_{авт} \leq 200\%$.

2. Нижний порог автоматизации, соответствующий уровню L0:

$K_{авт}=0,15$ (L0–L1) и $\Delta АВ=9,0$ (полная ручная нагрузка) $\rightarrow Y_{авт} \approx 16,7\%$.

Предлагаемые границы определения степени автоматизации транспортно-технологических машин:

низкая степень автоматизации: $Y_{авт} < 30\%$;

средняя степень автоматизации: $30\% \leq Y_{авт} < 70\%$;

высокая степень автоматизации: $Y_{авт} \geq 70\%$.

Алгоритм определения степени автоматизации ТТМ, учитывающий техноценологический метод аналитической оценки уровня автоматизации транспортного средства и коэффициент ручного управления ТТМ (рисунок 36).



Рисунок 36 – Алгоритм определения степени автоматизации ТТМ

(составлено автором)

4.5 Технико-экономическое обоснование предлагаемых решений

4.5.1 Расчет суммарных затрат на автоматизацию ТТМ

Для определения суммарных затрат при разном уровне автоматизации, необходимо учитывать не только вложения при разработке ТТМ, но и суммарные затраты за их жизненный цикл при разных уровнях автоматизации ТТМ (26):

$$TCO(L) = C_{cap}(L) + \sum_{t=1}^T \frac{C_{oper}^{year}(L) + C_{pers}^{year}(L) - B^{year}(L)}{(1+r)^t} \rightarrow L_{min} \quad (26)$$

где $C_{cap}(L)$ – капитальные затраты на автоматизацию (аппаратное и программное обеспечение), руб., $C_{oper}(L,t)$ – операционные затраты (ТО, ремонт, прочие затраты), руб., $C_{pers}(L,t)$ – затраты на работу водителя, руб., $B(L,t)$ – экономия от роста производительности и снижения аварийности, руб., r – ставка дисконтирования, %, T – срок планирования, лет.

При этом, затраты на работу водителя с учетом методики нормирования их рабочего времени будут меняться в соответствии с трудоемкостью выполняемых работ (27):

$$H(L) = H_0 \cdot \exp\left(-K_u \cdot \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i(L)}{\sum_{i=1}^n \omega_i}\right), \quad (27)$$

где H_0 – базовые трудозатраты водителя на уровне $L=0$, руб., $S_i(L)$ – степень автоматической поддержки i -го функционального свойства на уровне L , w_i – вес i -го свойства в общей трудоемкости, K_u – коэффициент ручного управления.

Капитальные затраты при переходе с одного уровня на другой, рассчитываемый как стоимость внедрения автоматизированных систем управления, их программного обеспечения и интеграция в общую систему (28) и (29):

$$C_{cap}(L) = C_{base} + \sum_{k=1}^L \Delta C_k, \quad (28)$$

где ΔC_k – прирост стоимости при переходе на следующий уровень автоматизации ТТМ, руб.

$$C_{cap}(L) = C_{base} + a \cdot L + b \cdot 1_{L \geq 3} + c \cdot 1_{L \geq 3} + d \cdot 1_{L \geq 3}, \quad (29)$$

где C_{base} – стоимость ТТМ без автоматизированных систем управления, руб., a – прирост стоимости за счет датчиков и базового программного обеспечения, руб., b, c, d – прирост стоимости при каждом последующем уровне автоматизации, руб.

Операционные затраты при повышенном уровне автоматизации (30):

$$C_{op}(L) = C_{maint}(L) + C_{energy}(L) + C_{soft}(L) \quad (30)$$

Каждая из составляющих операционных затрат изменяется с повышением уровня автоматизации ТТМ согласно зависимости (31):

$$\begin{aligned} C_{maint}(L) &= C_{maint}^0 \cdot (1 + \delta_m \cdot L) \\ C_{energy}(L) &= C_{energy}^0 \cdot (1 + \delta_n \cdot L) \end{aligned} \quad (31)$$

$$C_{soft}(L) = C_{soft} \cdot L$$

Изменение затрат на зарплату водителя изменится, в зависимости от уровня автоматизации и перерасчета эквивалентного активного времени вождения водителя (32):

$$C_{pers}(L) = \begin{cases} C_{driver} \\ C_{operator} + K_y \cdot C_{driver} \\ C_{operator} \end{cases} \quad (32)$$

Таким образом, общие затраты за жизненный цикл ТТМ при разном уровне автоматизации (33):

$$TCO(L) = C_{cap}(L) + \sum_{t=1}^T \frac{C_{oper}^{year}(L) + C_{pers}^{year}(L) - B^{year}(L)}{(1+r)^t}, \quad (33)$$

где T – срок планирования, лет, r – ставка дисконтирования, %, $B^{year}(L)$ – годовая экономия от автоматизации (за счет снижения аварийности и роста производительности), руб.

Для нахождения оптимального уровня автоматизации ТТМ необходимо определить конфигурацию ТТМ, при которой вложенные и последующие суммарные приведенные затраты будут окупаться за счет достигнутого выполнения автоматизированных операций и повышения производительности ТТМ (34):

$$L^* = \arg_{L \in (0;5)} \min TCO(L) \quad (34)$$

Переход с уровня L на $L+1$ обоснован, если (35):

$$\Delta TCO = TCO(L + 1) - TCO(L) < 0 \quad (35)$$

4.5.2 Определение затрат на автоматизацию транспортно-технологических машин минерально-сырьевого комплекса

Расчет производительности ТТМ при исходных данных (таблица 38).

Таблица 38 – Исходные данные для расчета стоимости автоматизации ТТМ (по данным автора)

Показатель			Комментарий
Количество машин	20	шт	КамАЗ
Грузоподъемность	20	т	
Длина маршрута (в одну сторону)	5	км	
Скорость с грузом	30	км/ч	
Скорость порожняком	40	км/ч	
Время погрузки/разгрузки	10	мин	на операцию
Рабочих дней в году	300	дн	
Часов работы с водителем (факт)	21	ч/сут	с перерывами; 3 смены по 8 часов
Часов работы автономного КАМАЗа	24	ч/сут	
Стоимость топлива	60	руб/л	
Расход топлива	40	л/ч	(КАМАЗ-6520)
Зарплата водителя	150 000	руб/мес	
Страховые взносы	0	доля	30%
Зарплата оператора ЦУП	120 000	руб/мес	
Кол-во операторов ЦУП	5	чел	на 20 машин
Стоимость ТО на машину (год)	500 000	руб	
Снижение ТО при автономии	0	доля	15%
Экономия топлива при автономии	0	доля	10%
Стоимость перевозки (референс)	50	руб/т	для оценки эффекта
Стоимость комплекта автопилота на 1 машину	8 000 000	руб	
Инфраструктура (связь, ЦУП, ПО)	350000000	руб	на весь парк
Срок проекта	10	лет	
Ставка дисконтирования	0,12	доля	12%

Время полного цикла рейса:

Погрузка + разгрузка: 20 мин

Движение с грузом: $5 \text{ км} / 30 \text{ км/ч} \times 60 = 10 \text{ мин}$

Движение порожняком: $5 \text{ км} / 40 \text{ км/ч} \times 60 = 7,5 \text{ мин}$

Итого цикл: 37,5 мин

Количество рейсов в сутки:

С водителем: $1\ 230 \text{ мин} / 37,5 = 32,8 \text{ рейса/сут}$

Автономно: $1\ 410 \text{ мин} / 37,5 = 37,6 \text{ рейса/сут}$

Перевозка груза на 1 машину в сутки:

С водителем: $32,8 \times 20 \text{ т} = 656 \text{ т}$

Автономно: $37,6 \times 20 \text{ т} = 752 \text{ т} (+12,7\%)$

Дополнительный объем перевозок по парку в год:

$(752 - 656) \text{ т} \times 20 \text{ машин} \times 300 \text{ дней} = 576\ 000 \text{ т/год}$

Экономический эффект (по ставке 50 руб/т): 28,8 млн руб/год (таблица 39).

Таблица 39 – Расчет экономии от производительности (по данным автора)

Время погрузки/разгрузки, мин	20	10 мин × 2 операции
Время движения с грузом, мин	10	$5 / 30 \times 60 = 10$
Время движения порожняком, мин	7,5	$5 / 40 \times 60 = 7.5$
Полный цикл рейса, мин	37,5	37.5
Чистое время работы (водитель), мин/сут	1230	$20.5 \times 60 = 1230$
Чистое время работы (автономия), мин/сут	1410	$23.5 \times 60 = 1410$
Рейсов/сут (водитель)	32,8	$1230 / 37.5 = 32.8$
Рейсов/сут (автономия)	37,6	$1410 / 37.5 = 37.6$
Груз/сут на машину (водитель), т	656	$32.8 \times 20 = 656$
Груз/сут на машину (автономия), т	752	$37.6 \times 20 = 752$
Доп. Груз на парк в сутки, т	1920	$(752 - 656) \times 20 = 1920$
Доп. Груз в год, т	576000	$1920 \times 300 = 576\ 000$
Экономия от производительности, руб/год	28 800 000,00	$576\ 000 \times 50 = 28\ 800\ 000$

При этом затраты до внедрения складываются из затрат на зарплату водителей, топливо, техническое обслуживание и ремонт ТТМ, прочие затраты (страховые взносы, аварии и прочее) (таблица 40).

Таблица 40 – Затраты до внедрения (по данным автора)

Показатель	Сумма
ФОТ водителей	46800000
Топливо	84600000
ТО и ремонт	10000000
Прочие (страховка, ДТП)	20000000
Итого ОРЕХ до	161400000

Затраты после внедрения автоматизированных систем управления (таблица 41).

Таблица 41 – Затраты после внедрения автоматизации (по данным автора)

Показатель	Расчет
ФОТ ЦУП	561 600,00
Топливо	71 910 000,00
ТО и ремонт	8 500 000,00
Прочие расходы	10 000 000,00
Итого ОПЕХ после	90 971 600,00
Годовая экономия (без эффекта 24/7)	70 428 400,00
+ Экономия от 24/7 работы	28 800 000,00
Итого годовая экономия	99 228 400,00

Повышение эффективности перевозочного процесса при внедрении автоматизированных систем управления и использования методики нормирования ручного управления ТТМ на предприятии минерально-сырьевого комплекса сокращают срок окупаемости до 5,5 лет (рисунок 37, таблица 42).



Рисунок 37 – График накопленной экономии при внедрении автоматизированных систем управления на предприятии минерально-сырьевого комплекса (составлено автором)

Таблица 42 – Накопленная экономия предприятия на период 10 лет (по данным автора)

Год	CAPEX	Экономия	Дисконтированный поток	Накопленная экономия
0	-510 000 000,00	-	- 510 000 000,00	-
1	-	99 228 400,00	88 596 785,71	99 228 400,00
2	-	99 228 400,00	79 104 272,96	198 456 800,00
3	-	99 228 400,00	70 628 815,14	297 685 200,00
4	-	99 228 400,00	63 061 442,09	396 913 600,00
5	-	99 228 400,00	56 304 859,01	496 142 000,00

Продолжение Таблицы 42

Год	CAPEX	Экономия	Дисконтированный поток	Накопленная экономия
6	-	99 228 400,00	50 272 195,54	595 370 400,00
7	-	99 228 400,00	44 885 888,88	694 598 800,00
8	-	99 228 400,00	40 076 686,50	793 827 200,00
9	-	99 228 400,00	35 782 755,80	893 055 600,00
10	-	99 228 400,00	31 948 889,11	992 284 000,00

Сравнение затрат до автоматизации и после на зарплату водителей, топливо, техническое обслуживание и ремонт ТТМ, прочие расходы (таблица 43, рисунок 38).

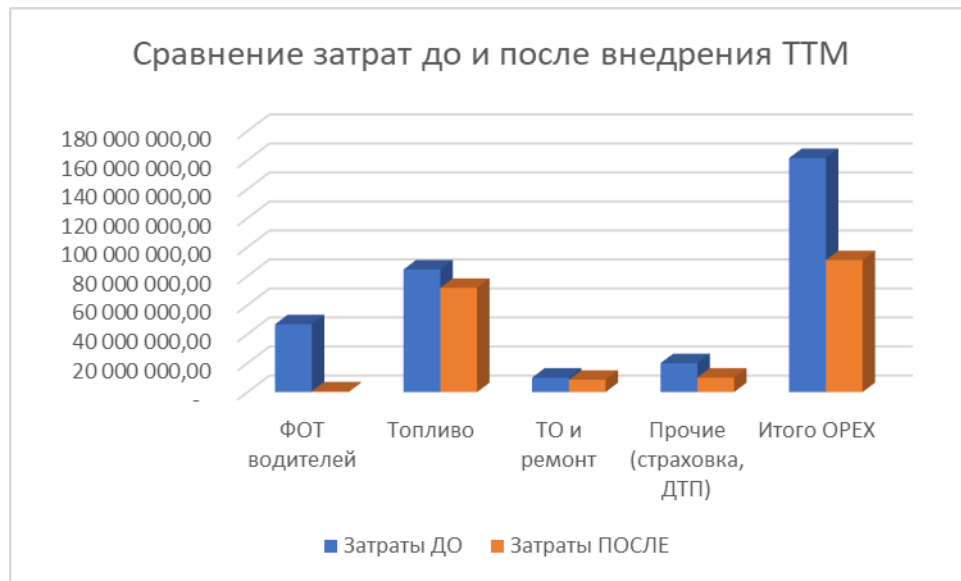


Рисунок 38 – Сравнение затрат до и после внедрения автоматизированных систем управления ТТМ (составлено автором)

Таблица 43 – Сравнительная таблица затрат до и после внедрения автоматизации (по данным автора)

Показатель	Затраты ДО	Затраты ПОСЛЕ
ФОТ водителей	46 800 000,00	561 600,00
Топливо	84 600 000,00	71 910 000,00
ТО и ремонт	10 000 000,00	8 500 000,00
Прочие (страховка, ДТП)	20 000 000,00	10 000 000,00
Итого ОРЕХ	161 400 000,00	90 971 600,00

4.6 Выводы по Главе 4

1. Разработка предложений и практических рекомендаций по внедрению аналитического аппарата количественной и качественной оценки уровня автоматизации ТТМ, позволяет на этапе проектировки транспортно-

технологической машины определить необходимый состав автоматизированных систем управления ТТМ исходя из специфики ее эксплуатации и расширить ее функциональные возможности. Представленные решения позволят специалистам научно-исследовательских и опытно-конструкторских организаций, совместно с представителями предприятий минерально-сырьевого комплекса сформировать необходимый перечень АСУ ТТМ.

2. Предложенный аналитический аппарат количественной и качественной оценки уровня автоматизации ТТМ, позволяет сформировать методику нормирования ручного управления ТТМ для определения доли участия водителя в управлении ТТМ на выполнение объема работ при движении и планирования рабочего времени водителя с целью повышения эффективности эксплуатации ТТМ.

3. Установлено, что перевод предприятия минерально-сырьевого комплекса на 4 уровень автоматизации ТТМ позволит повысить эффективность перевозочного процесса доставки грузов при среднем сроке окупаемости 5-6 лет и снижении ОПЕХ в 1,5-2 раза за счет снижения операционных расходов на эксплуатацию ТТМ.

4. На основании предложенной методики расчета суммарных затрат при разном уровне автоматизации ТТМ, включающей капитальные затраты при переходе с одного уровня автоматизации на другой и операционные затраты при повышении уровня автоматизации ТТМ, определена методика нахождения оптимального уровня автоматизации ТТМ за счет установления конфигурации АСУ ТТМ, при которой вложенные и последующие суммарные приведенные затраты будут окупаться за счет достигнутого выполнения автоматизированных операций и повышения эффективности перевозочного процесса доставки грузов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования разработан и обоснован научно-методический аналитический аппарат количественной и качественной оценки уровней автоматизации транспортно-технологических машин, учитывающий специфику эксплуатации ТТМ и степени реализации их функциональных свойств, позволяющий повысить эффективность перевозочного процесса доставки грузов, что вносит существенный вклад в систему управления перевозочным процессом.

К наиболее существенным результатам работы можно отнести следующее:

1. Проанализировано состояние вопроса исследования, существующие теоретические и практические аспекты определения границ уровней автоматизации ТТМ за счет внедрения автоматизированных систем их управления и повышения ФС. Результаты анализа свидетельствуют о необходимости разработки аналитического аппарата количественной и качественной оценки уровня автоматизации ТТМ.

2. Разработан техноценологический метод определения уровней автоматизации ТТМ, с учетом весовых коэффициентов значимости отдельных автоматизированных систем управления транспортно-технологической машины для установления качественного уровня реализации ее функциональных свойств, позволяющего сформировать требования и осуществлять рациональный выбор АСУ ТТМ на основе обобщенного критерия аналитической оценки уровня автоматизации $K_{авт} \in [0,15; 0,90]$.

3. Предложен метод нормирования ручного управления ТТМ, на основе уточненного коэффициента ручного управления ТТМ – $K_{ру}$, который позволит установить взаимосвязь повышения степени автоматизации ТТМ и производительности, которая варьируется в пределах 15-25%.

4. Предложен аналитический аппарат количественной и качественной оценки уровня автоматизации ТТМ, объединяющий техноценологический критерий определения уровня автоматизации ТТМ и коэффициента ручного управления ТТМ. Внедрение ТТМ разных уровней автоматизации обеспечивает рост эффективности перевозочного процесса до 40%.

5. Предложены практические рекомендации и технические решения по формированию научно-методического аппарата количественной и качественной оценки уровня автоматизации ТТМ, на основании анализа реализации ФС и суммы инвестиций за период эксплуатации, включая горнодобывающую технику. Результаты апробированы в деятельности ПАО «КамАЗ» и НПП «ЭЛВО», а также защищены двумя патентами РФ.

Диссертационное исследование ложится в основу дальнейшего развития интеллектуальной транспортной системы, позволяющей добиться максимальной эффективности перевозочного процесса при решении управленческих задач, на основе научно-обоснованных принципов по повышению уровня автоматизации транспортно-технологических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ададунов, С. Е. Повышение надежности и производительности систем хранения больших данных / С. Е. Ададунов, В. А. Гончаренко, А. Д. Хомоненко, А. П. Глухов // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 7. – С. 30–33. – DOI: 10.62994/AT.2025.7.7.006.
2. Аземша, С. А. Интеллектуальная система мультимаршрутного планирования работы пассажирских транспортных средств // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2026. – № 1 (47).
3. Апенько, С. Н. Модель компетенций специалиста в области информационной безопасности на транспорте / С. Н. Апенько, А. И. Давыдов, Д. А. Елизаров, А. В. Лукаш // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 4. – С. 35–37. – DOI: 10.62994/AT.2025.4.4.007.
4. Баранов, Л. А. Развитие интеллектуальных систем управления электрическим транспортом / Л. А. Баранов, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 10. – С. 30–32. – DOI: 10.62994/AT.2025.10.10.007.
5. Белов, А. В. Анализ возможности и перспектив достижения системно-оптимального распределения транспортных потоков с появлением подключенных и высокоавтоматизированных транспортных средств / А. В. Белов, Ю. В. Бутенко // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-3(88). – С. 120-129. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-120-129. – EDN SPVBEA.
6. Белокуров, В. П. Влияние мероприятий по совершенствованию организации городских пассажирских перевозок на экономическую эффективность / В. П. Белокуров, Е. А. Панявина, Р. А. Кораблев, Э. Н. Бусарин // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-1(89). – С. 35-44. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-1(89)-35-44. – EDN IARPCQ.
7. Ван, Ц. Определение современных подходов к управлению транспортной инфраструктурой на примере опыта Китая / Ц. Ван, О. Ю. Булатова, Х. Цзянг // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-1(88). – С. 21-28. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-1(88)-21-28. – EDN LQDGDE.

8. Верительник, Е. А. Применение нейронных сетей при диагностировании неисправностей автомобилей / Е. А. Верительник, А. В. Калинин // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-3(89). – С. 105-112. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-3(89)-105-112. – EDN LWBAQA.

9. Гасанов, Р. М. Современное состояние и перспективы развития инфраструктурной готовности к внедрению беспилотных транспортных средств: систематический обзор отечественных и зарубежных исследований // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2026. – № 1 (47).

10. Гринякин, Р. В. Эксплуатация автомобилей при использовании технологий больших данных / Р. В. Гринякин, С. В. Дорохин, Н. А. Загородний, А. С. Семькина // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-3(89). – С. 120-127. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-3(89)-120-127. – EDN STFKLC.

11. Давыдов, Р. Д. Методология анализа технических и программных элементов как основы эффективного управления национальной сетью интеллектуальных транспортных систем / Р. Д. Давыдов, Г. Д. Ахмадов, М. Ю. Белов, А. И. Панкратов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – Выпуск 4 (83), декабрь.

12. Демьянчук, С. В. Исследование проблем и перспектив развития автоматизированных систем управления и мониторинга карьерного транспорта / С. В. Демьянчук, А. Э. Горев, О. В. Попова // Автоматика на транспорте. – 2026. – № 1. – С. 26-40. – DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-01-26-40.

13. Долгий, А. И. О выборе рациональной стратегии восстановления полигонных автоматизированных систем управления / А. И. Долгий, Е. Н. Розенберг, А. М. Олышанский, А. В. Озеров // Автоматика на транспорте. – 2025. – № 4. – С. 303-312. – DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-303-312.

14. Дубовский, В. А. Подход к обеспечению безопасности дорожного движения при эксплуатации автоматизированных транспортных средств / В. А. Дубовский, В. В. Савченко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2020. – Т. 9. – С. 121-123.

15. Евтюков, С. С. Модель прогнозирования аварийности на основе адаптивного нейро-нечеткого вывода / С. С. Евтюков, Я. В. Васильев, Д. С. Голубев // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-2(89). – С. 126-133. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-126-133. – EDN GOUBGK.

16. Енокаев, В. К. Применение метода сценариев при интеграции интеллектуальных транспортных систем / В. К. Енокаев // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-4(88). – С. 108-117. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-4(88)-108-117. – EDN MKWHKN.

17. Елифанов, В. В. Обоснование показателей качества в системе функционирования беспилотного автомобиля / В. В. Елифанов, С. Е. Визгалин, А. О. Статенин // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-2(88). – С. 114-118. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-2(88)-114-118. – EDN EAINIX.

18. Ефимов, А. Д. Анализ перспектив развития технологий интеллектуальных систем в автомобильной маршрутной навигации / А. Д. Ефимов, А. О. Алибагандов, Ю. И. Савченко // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-3(90). – С. 118-125. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-3(90)-118-125. – EDN OSVDZC.

19. Жанказиев, С. В. Категоризация участков скоростных автомобильных дорог для моделирования конфликтности / С. В. Жанказиев, В. В. Дронсейко, Н. А. Донец // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – № 2 (44).

20. Жанказиев, С. В. О применении технологий предиктивного управления в интеллектуальных транспортных системах / С. В. Жанказиев, Д. А. Анохин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2026. – № 1 (47).

21. Жбанова, С. А. Анализ основных мероприятий по организации и обеспечению безопасности дорожного движения на современном этапе / С. А. Жбанова // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-3(88). – С. 10-17. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-10-17. – EDN EAHVWW.

22. Жесткова, С. А. Повышение эффективности сетевой доставки грузов на основе цифровой трансформации транспортно-логистических процессов / С. А.

Жесткова // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-4(88). – С. 18-24. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-4(88)-18-24. – EDN VOEIGE.

23. Журавлев, А. Д. Концептуальные подходы к оценке эффективности функционирования интеллектуальных транспортных систем / А. Д. Журавлев, Н. Ю. Торопов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2026. – Выпуск 1 (84).

24. Залюбовский, А. Ф. Структурный анализ транспортной системы горных предприятий / А. Ф. Залюбовский, Р. Р. Сафиуллин, **В. А. Ефремова** // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-3(88). – С. 129-136. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-129-136. – EDN FGYIFW.

25. Иванов, А. М. Интеллектуальное транспортное средство. Адаптация подсистемы определения взаимного положения движущихся транспортных средств / А. М. Иванов, С. С. Шадрин, К. Е. Карпухин // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т. 1, № 2(16). – С. 57-62.

26. Иванов, А. М. Интеллектуальные системы помощи водителю. Технические требования и методы испытаний / А. М. Иванов, С. Р. Кристальный, Н. В. Попов, С. С. Шадрин. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2019. – 100 с. – ISBN 978-5-7962-0260-9.

27. Иванов, А. М. Разработка дополнительных сервисов с использованием интерфейса Vehicle-to-Person (V2P) / А. М. Иванов, С. С. Шадрин // Автотранспортное предприятие. – 2014. – № 9. – С. 16-18.

28. Иванов, А. М. Разработка системы межобъектного взаимодействия интеллектуальных транспортных средств / А. М. Иванов, С. С. Шадрин // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. – 2013. – Т. 7, № 21(124). – С. 74-77.

29. Иванов, А. М. Разработка системы тестирования беспилотных автомобилей / А. М. Иванов, С. С. Шадрин // Интеллектуальные транспортные системы: Сборник трудов Международного автомобильного научного форума

МАНФ-2017, Москва, 18–19 октября 2017 года. – Москва: Государственный научный центр Российской Федерации «НАМИ», 2017. – С. 80-88.

30. Игнатов, А. В. Оценка влияния подсистемы «Водитель-среда» на безопасность дорожного движения / А. В. Игнатов, В. Н. Басков // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-3(89). – С. 95-104. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-3(89)-95-104. – EDN IAESFM.

31. Капский, Д. В. Анализ ошибок водителей как основной причины ДТП / Д. В. Капский, С. В. Богданович, А. Н. Чернюк // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-1(88). – С. 100-110. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-1(88)-100-110. – EDN OHWULT.

32. Карагодин, В. И. Комплексное планирование производственной и технической эксплуатации парка наземных транспортных и транспортно-технологических средств / В. И. Карагодин, И. В. Лещанов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – Выпуск 1 (80), март.

33. Киссуленко, Б. В. Оценка безопасности высокоавтоматизированных и беспилотных автомобилей / Б. В. Киссуленко // Труды НАМИ. – 2020. – №2(281). – С. 6-13. – DOI: 10.51187/0135-3152-2020-2-6-13.

34. Киссуленко, Б. В. Перспективы и проблемы внедрения автомобилей с автоматическим управлением / Б. В. Киссуленко, А. В. Бочаров // Автомобильная промышленность. – 2017. – № 5. – С. 4-8.

35. Князькина, О. В. «Умный городской транспорт» как эффективный инструмент управления транспортными потоками / О. В. Князькина, Р. М. Хамитов, Г. В. Дмитриев, Т. Р. Хамитов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – №4 (46).

36. Комаров, Ю. Я. Повышение безопасности дорожного движения за счет оптимизации скоростного режима / Ю. Я. Комаров, Д. Ю. Комаров, С. В. Ганзин, Д. Д. Сильченков // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – Выпуск 1 (80), март.

37. Конев, А. А. Применение автономных автомобилей в логистике: эффективность, проблемы и перспективы / А. А. Конев, И. А. Новиков, Н. А. Загородний // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-4(89). – С. 136-141. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-4(89)-136-141. – EDN ZYSFUT.

38. Конорев, А. С. Вопросы учета интенсивности движения при определении остаточного ресурса в процессе эксплуатации автомобильных дорог / А. С. Конорев, С. А. Мирончук, Е. А. Еременко, В. А. Думенко, И. С. Новиков // Дороги и мосты. – 2025. – № 53/1. – С. 9-26. – DOI: 10.70991/1815-896X-2025-1-53-09-26.

39. Косцов, А. В. Технологии информационного моделирования в дорожной отрасли: отечественный опыт и вызовы цифровой трансформации / А. В. Косцов, С. М. Дмитриев, А.М. Голам // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – Выпуск 1 (80), март.

40. Куверин, И. Ю. Совершенствование автоматизированных систем динамического контроля осевых нагрузок автотранспортных средств с учетом действующих сил при движении / И. Ю. Куверин, Ю. А. Хилюк, С. А. Гусев // Автоматика на транспорте. – 2025. – № 2. – С. 144-163. – DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-144-163.

41. Кулев, А. В. Повышение безопасности дорожного движения в городе Орле с применением средств имитационного моделирования / А. В. Кулев, М. В. Кулев, Д. О. Ломакин // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-4(89). – С. 28-34. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-4(89)-28-34. – EDN IWASNJ.

42. Лин, Ю. Оценка эффективности ИТС с помощью имитационного моделирования / Ю. Лин, А. В. Домбалян, Е. Е. Шаталова, А. А. Мирончук // Мир транспорта и технологических машин. – 2026. – № 1(92). – С. 115-123. – DOI: 10.33979/2073-7432-2026-1(92)-115-123. – EDN DNLOX.

43. Лобачёва, Л. П. Высокоавтоматизированные транспортные средства и безопасность дорожного движения: отдельные вопросы интеграции / Л. П.

Лобачёва, С. П. Сальников // Безопасность дорожного движения. – 2023. – №4. – С. 53-58.

44. Логин, Э. В. Прогноз данных в системе мониторинга / Э. В. Логин // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 1. – С. 13–16. – DOI: 10.62994/AT.2025.1.1.003.

45. Лю, Ю. Повышение безопасности движения маршрутного пассажирского транспорта с использованием адаптивного управления светофорными объектами / Ю. Лю, Д. В. Капский, С. А. Ляпин, Д. С. Саражинский // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-1(89). – С. 52-59. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-1(89)-52-59. – EDN ALMLFK.

46. Макарова, Д. А. Подход к обеспечению и комплексной оценке уровня безопасности автоматизированных транспортных средств в процессе эксплуатации на дорогах общего пользования / Д. А. Макарова, А. М. Иванов, С. С. Шадрин, Ю. М. Фурлетов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 2(36).

47. Макарова, Д. А. Подход к разработке механизмов обеспечения безопасности автоматизированных систем вождения / Д. А. Макарова, А. М. Иванов, Ю. М. Фурлетов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2023. – № 3(74). – С. 40-48.

48. Малышев, М. И. Формирование комплексной интеллектуальной транспортной системы региона на основе опорной сети с определением центров притяжения грузопотока и распределением средств телематики / М. И. Малышев // Мир транспорта и технологических машин. – 2026. – № 1(92). – С. 106-114. – DOI: 10.33979/2073-7432-2026-1(92)-106-114. – EDN LUEIMV.

49. Мельникова, Т. Е. Оценка степени безопасности легковых автомобилей на российском рынке / Т. Е. Мельникова, В. М. Власов, С. Е. Мельников, Д. В. Селезнев // Мир транспорта и технологических машин. – 2026. – № 1(92). – С. 57-63. – DOI: 10.33979/2073-7432-2026-1(92)-57-63. – EDN VXCJVJK.

50. Михеев, Д. А. Организация беспроводных каналов связи для информационно-управляющих систем / Д. А. Михеев, А. В. Трофимов, К. В. Иванов // Автоматика, связь, информатика. – 2026. – № 1. – С. 20–22. – DOI: 10.62994/АТ.2026.1.1.004.

51. Мыльников, П. Д. Цифровой испытательный полигон для беспилотных транспортных систем / П. Д. Мыльников, А. В. Озеров // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 11. – С. 27–29. – DOI: 10.62994/АТ.2025.11.11.006.

52. Мыськив, И. И. Подходы к доказательству функциональной безопасности технических систем / И. И. Мыськив, И. Ю. Попов, Д. А. Заколдаев // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 6. – С. 23–27. – DOI: 10.62994/АТ.2025.6.6.007.

53. Нестеренко, Г. А. Устройство мониторинга состояния автомобиля / Г. А. Нестеренко, Н. А. Олейник // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – №1 (43).

54. Новиков, А. Н. Цифровизация управления транспортно-логистическими процессами сетевой доставки груза автомобильным транспортом / А. Н. Новиков, С. А. Жесткова // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-3(88). – С. 18-23. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-3(88)-18-23. – EDN TRRDDDS.

55. Новиков, И. А. Оценка влияния критерия «Психологический типаж личности водителя» на безопасность дорожного движения / И. А. Новиков, Д. А. Лазарев // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-3(90). – С. 94-101. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-3(90)-94-101. – EDN ZQNPYA.

56. Охотников, А. Л. Информационная система технического зрения / А. Л. Охотников, В. Я. Цветков // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 1. – С. 23–26. – DOI: 10.62994/АТ.2025.1.1.005.

57. Патент №2798641 Российская Федерация, МПК F02D 19/12 (2023.02), F02D 41/0025 (2023.02), F02M 25/10 (2023.02), F02M 37/0047 (2023.02), F02M 37/0082 (2023.02). Адаптивно-управляемая система приготовления и подачи

топлива транспортного средства. Заявка №2022131859: заявл.07.12.2022: опубл. 23.06.2023 / Р.Н. Сафиуллин, Р.Р. Сафиуллин, К.В. Сорокин, **В.А. Ефремова**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 10 с.

58. Патент №2849087 Российская Федерация, МПК G05D 1/86 (2025.08), G01M 15/00 (2025.08). Автоматизированный комплекс контроля технического состояния бортовой информационно-управляющей системы беспилотного транспортного средства. Заявка №2025107267: заявл. 07.12.2022: опубл. 26.03.2025 / Р.Н. Сафиуллин, Р.Р. Сафиуллин, А.Ф. Залюбовский, **В.А. Ефремова**, С.Д. Ефимовский; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 14 с.

59. Подопригора, Н. В. Концепция развития жизненного цикла транспортных средств по мере повышения уровня их автоматизации / Н. В. Подопригора, Д. Ю. Зингер, А. В. Терентьев, М. В. Кулев // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-4(89). – С. 75-81. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-4(89)-75-81. – EDN ZSVYDS.

60. Приходько, В. М. Методики тестирования автоматизированных систем управления автомобилем / В. М. Приходько, А. М. Иванов, В. Б. Борисевич, С. С. Шадрин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – № 4(51). – С. 10-15.

61. Пугачев, И. Н. Использование прогноза травматизма при ДТП, с целью совершенствования архитектуры интеллектуальных транспортных систем городских агломераций / И. Н. Пугачев, Н. Г. Шешера // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-3(90). – С. 20-26. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-3(90)-20-26. – EDN SBISRO.

62. Ризаева, Ю. Н. Методические подходы к испытаниям интеллектуальных транспортных систем / Ю. Н. Ризаева, Н. Ю. Торопов // Мир

транспорта и технологических машин. – 2026. – № 1(92). – С. 90-97. – DOI: 10.33979/2073-7432-2026-1(92)-90-97. – EDN BPRIYB.

63. Розенберг, И. Н. Интеграция данных при управлении транспортом / И. Н. Розенберг, В. Я. Цветков // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 11. – С. 30–32. – DOI: 10.62994/AT.2025.11.11.007.

64. Розенберг, И. Н. Цифровая трансформация на транспорте / И. Н. Розенберг, В. Я. Цветков // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 5. – С. 20–22. – DOI: 10.62994/AT.2025.5.5.005.

65. Сафиуллин, Р. Н. Адаптивно-управляемый метод мониторинга экологических параметров беспилотных транспортных средств / Р. Н. Сафиуллин, **В. А. Ефремова**, В. Д. Чмутов // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2024. – № 2(68). – С. 28-32. – EDN EJLUUE.

66. Сафиуллин, Р. Н. Комплексный подход к обеспечению технической безопасности высокоавтоматизированных транспортных средств на основе внедрения методов функционального контроля / Р. Н. Сафиуллин, И. А. Шаммазов, А. А. Велесевич, А. В. Хохлов // Вестник НЦБЖД. – 2026. – № 1 (67). – С. 162–172.

67. Сафиуллин, Р. Н. Концептуальные подходы рационального выбора состава бортовых информационно-управляющих систем при перевозке грузов / Р. Н. Сафиуллин, Р. Р. Сафиуллин, **В. А. Ефремова**, А. Э. Пеплер // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2023. – № 5. – С. 45-52. – DOI: 10.36535/0236-1914-2023-05-7. – EDN GSJGAQ.

68. Сафиуллин, Р. Н. Метод комплексной оценки бортовых информационно-управляющих систем на горных машинах / Р. Н. Сафиуллин, Р. Р. Сафиуллин, **В. А. Ефремова** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 9-1. – С. 49-63. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_49. – EDN VYRGKU.

69. Сафиуллин, Р. Н. Метод многоуровневой оценки функциональной безопасности карьерных самосвалов в процессе их эксплуатации / Р. Н. Сафиуллин, Р. Р. Сафиуллин, А. В. Хохлов // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2026. – № 2. – С. 28-46. – DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_28. – EDN YVTYVZ.

70. Сафиуллин, Р. Н. Метод формирования базы больших данных системы поддержки принятия решений по обеспечению перевозочного процесса транспортных средств / Р. Н. Сафиуллин, Р. Р. Сафиуллин, А. В. Хохлов, М. Р. Баширов, Э. Л. Хисамутдинова // Вестник НЦБЖД. – 2025. – № 2 (64). – С. 152–161.

71. Сафиуллин, Р. Н. Методика аналитической оценки уровня автоматизации транспортных средств / Р. Н. Сафиуллин, Ю. Л. Жуковский, Р. Р. Сафиуллин, **В.А. Ефремова** [и др.] // Вестник НЦБЖД. – 2025. – № 4(66). – С. 173-181. – EDN YKTXOR.

72. Сафиуллин, Р. Н. Методика обоснования состава бортовой информационно-управляющей системы транспортных средств / Р. Н. Сафиуллин, Р. Р. Сафиуллин, **В. А. Ефремова**, М. Р. Баширов // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 4-2(83). – С. 95-103. – DOI: 10.33979/2073-7432-2023-4-2(83)-95-103. – EDN CBVHNT.

73. Сафиуллин, Р. Н. Методика обоснования требований к внедрению интегрированных технологий на высокоавтоматизированных горных машинах / Р. Н. Сафиуллин, Л. А. Симонова, Б. С. Иванов, **В. А. Ефремова** // Транспорт. Взгляд в будущее – TFV-24: Сборник научных статей международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 07–08 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. – С. 168-170. – EDN GPDALV.

74. Сафиуллин, Р. Н. Многокритериальный подход рационального внедрения бортовой информационно-управляющей системы в высокоавтоматизированное транспортное средство / Р. Н. Сафиуллин, **В. А. Ефремова**, Н. А. Караваев // Транспорт России: проблемы и перспективы-2023: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Соломенко, ИПТ РАН, 2023. – С. 148-152. – EDN STFGHN.

75. Сафиуллин, Р. Н. Модели и алгоритмы прогнозирования технического состояния транспортных средств на основе методов нечеткой логики / Р. Н. Сафиуллин, Р. Р. Сафиуллин, К. В. Сорокин, А. В. Попов // Вестник НЦБЖД. – 2025. – № 2 (64). – С. 138–152.

76. Сафиуллин, Р. Н. Модели и алгоритмы формирования интегрированной телематической автоматизированной системы управления автомобильными перевозками опасных грузов / Р. Н. Сафиуллин, Х. Тянь, Ю. Н. Кацуба, М. В. Богданов // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-4(88). – С. 10-17. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-4(88)-10-17. – EDN SFELVR.

77. Сафиуллин, Р. Н. Системно-матричный подход определения параметров интеллектуализации транспортных средств / Р. Н. Сафиуллин, **В. А. Ефремова**, Р. Р. Сафиуллин, П. А. Жильцов // Известия Международной академии аграрного образования. – 2024. – № 72. – С. 33-36. – EDN SOCGSG.

78. Сафиуллин, Р. Н. Техноценологический метод аналитической оценки уровня автоматизации горно-транспортных машин / Р. Н. Сафиуллин, А. Ф. Клебанов, М. С. Присяжнюк, Б. С. Иванов, **В. А. Ефремова** // Горная промышленность. – 2025. – № S1. – С. 34-40. – DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1S-34-40. – EDN VCWVYA.

79. Сафронов, Э. А. Цифровое управление программами повышения безопасности дорожного движения / Э. А. Сафронов, Е. С. Семенова, А. Э. Семенов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – №4 (46).

80. Сацюк, А. В. Мониторинг инфраструктуры на основе искусственного интеллекта // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 9. – С. 32–34. – DOI: 10.62994/AT.2025.9.9.005.

81. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666496 Российская Федерация. Программа расчета транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог при применении телематических автоматизированных систем управления контролем движения

транспортных средств : № 2022663896 : заявл. 19.07.2022 : опубл. 05.09.2022 / Р. Р. Сафиуллин, Р. Н. Сафиуллин, Н. С. Пантелеева [и др.]. – EDN UHYMBH.

82. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614592 Российская Федерация. Методика построения автоматизированной системы контроля технического состояния транспортного средства при применении матричного QR кода : № 2023612586 : заявл. 09.02.2023 : опубл. 02.03.2023 / Р. Р. Сафиуллин, Р. Н. Сафиуллин, И. Р. Шамсутдинов [и др.]. – EDN RSCAIN.

83. Семькина, А. С. Критерии оценки рационального периода эксплуатации транспортных средств / А. С. Семькина, Н. А. Загородний, Д. О. Ломакин // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-2(89). – С. 55-61. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-55-61. – EDN JUNUQR.

84. Семькина, А. С. Повышение и улучшение безопасности дорожного движения / А. С. Семькина, Н. А. Загородний, М. В. Петрук, М. А. Лозовая // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-1(90). – С. 109-115. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-1(90)-109-115. – EDN EEBEXO.

85. Смолин, И. Ю. Нормирование труда с применением искусственного интеллекта / И. Ю. Смолин, А. А. Любченко, А. В. Стадник // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 10. – С. 27–29. – DOI: 10.62994/AT.2025.10.10.006.

86. Спинов, А. Р. Разработка системы автоматизированного движения в «пробках» городского транспортного средства / А. Р. Спинов, С. С. Шадрин, А. М. Иванов, А. Н. Солнцев // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2014. – № 3(38). – С. 106-112.

87. Тебекин, М. Д. Анализ развития интеллектуальных транспортных систем в России в период с 2012 по 2024 годы / М. Д. Тебекин, Л. О. Савин, И. В. Гусяков // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 2-2(89). – С. 113-119. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-2(89)-113-119. – EDN JCGNEG.

88. Ткачева, Т. М. Искусственный интеллект и дорожный трафик / Т. М. Ткачева, К. С. Остапенко // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – No 2 (44).

89. Трегубов, В. Н. Использование генеративного искусственного интеллекта для визуализации синхронизации в логистических процессах / В. Н. Трегубов // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – No 2-1(89). – С. 129-136. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-1(89)-129-136. – EDN ULQROK.

90. Тыняный, А. Г. Актуальные вопросы совершенствования технического зрения при использовании на автомобилях / А. Г. Тыняный, С. Р. Кристальный, П. А. Красавин, М. А. Топорков, А. Н. Андреев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2026. – No 1 (47).

91. Тыняный, А. Г. Анализ существующих систем, повышающих активную безопасность автомобиля / А. Г. Тыняный, Ф. К. Дьяков, Е. Д. Андреева, В. А. Кравцева, П. А. Красавин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – No 4 (46).

92. Фадин, А. М. Методика оценки алгоритмов управления автомобилем в автоматическом режиме / А. М. Фадин, А. М. Иванов, С. С. Шадрин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2013. – No 3(34). – С. 3-7.

93. Фомичева, Н. С. Логистические платформы для перевозчиков: современные подходы к цифровизации грузоперевозок / Н. С. Фомичева, А. К. Снитко // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2026. – No 1 (47).

94. Чесалов, А. Ю. Цифровая трансформация промышленности и железнодорожного транспорта // Автоматика, связь, информатика. – 2026. – No 4. – С. 21–25. – DOI: 10.62994/AT.2026.4.4.005.

95. Шадрин, С. С. Влияние свойств программных компонентов системы технического зрения на безопасность движения беспилотного транспорта / С. С. Шадрин, П. А. Васин // Технологии и компоненты наземных интеллектуальных транспортных систем., Москва, 16–18 октября 2019 года. – Москва: НАМИ, 2019. – С. 251-258.

96. Шевцова, А. Г. Концепция вероятностно-статистического анализа дорожно-транспортных происшествий в интеллектуальных транспортных системах / А. Г. Шевцова, А. В. Подкопаев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2026. – No 1 (47).
97. Arefnezhad, S. Applying Deep Neural Networks for Multi-Level Classification of Driver Drowsiness Using Vehicle-Based Measures / S. Arefnezhad, S. Samiee, A. Eichberger, M. Frühwirth, C. Kaufmann, E. Klotz // Expert Systems with Applications. – 2020. – Vol. 162. – p. 113778. – DOI 10.1016/j.eswa.2020.113778.
98. Becker, S. Driver-Initiated Takeovers during Critical Evasion Maneuvers in Automated Driving / S. Becker, S. Brandenburg, M. Thüring // Accident Analysis and Prevention. – 2024. – Vol. 194. – p. 107362. – DOI 10.1016/j.aap.2023.107362.
99. Bhatti, G. Towards the Future of Smart Electric Vehicles: Digital Twin Technology / G. Bhatti, H. Mohan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – pp. 1-18. – DOI 10.1016/j.rser.2021.110801.
100. Devi, M. R. Intelligent Vehicular Communication Using Vulnerability Scoring Based Routing Protocol / M. R. Devi, J. S. J. I. // Intelligent Automation and Soft Computing. – 2022. – Vol. 35, No. 1. – pp. 31-45. – DOI 10.32604/iasc.2023.026152.
101. Duan, M. Reforming Mixed Operation Schedule for Electric Buses and Traditional Fuel Buses by an Optimal Framework / M. Duan, G. Qi, W. Guan, C. Lu, D. Xie // IET Intelligent Transport Systems. – 2020. – pp. 1287-1303. – DOI 10.1049/itr2.12098.
102. Fries, A. Modeling Driver Behavior in Critical Traffic Scenarios for the Safety Assessment of Automated Driving / A. Fries, L. Lemberg, F. Fahrenkrog, M. Mai, A. Das // Traffic Injury Prevention. – 2023. – Vol. 24, Supplement 1. – pp. S105-S110. – DOI 10.1080/15389588.2023.2211187.
103. Gonzalez Clarembaux, L. Perception and Control Strategies for Autonomous Docking for Electric Freight Vehicles / L. Gonzalez Clarembaux, J. Pérez, D. Gonzalez, F. Nashashibi // Transportation Research Procedia. – 2016. – pp. 1516-1522. – DOI 10.1016/j.trpro.2016.05.116.

104. Hu, L. A Review on Key Challenges in Intelligent Vehicles: Safety and Driver-Oriented Features / L. Hu, X. Zhou // IET Intelligent Transport Systems. – 2021. – pp. 1-13. – DOI 10.1049/itr2.12088.

105. Liu, H. Resource Allocation Schemes in Multi-Vehicle Cooperation Systems / H. Liu, H. Yang, K. Zheng, L. Lei // Journal of Communications and Information Networks. – 2017. – Vol. 2, No. 2. – pp. 113-125. – DOI 10.1007/s41650-017-0020-z.

106. Ma, L. Human-Like Car-Following Modeling Based on Online Driving Style Recognition / L. Ma, S. Qu, L. Song, J. Zhang, J. Ren // Electronic Research Archive. – 2023. – Vol. 31, No. 6. – pp. 3264-3290. – DOI 10.3934/era.2023165.

107. Mandal, R. Framework of Intelligent Transportation System: A Survey / R. Mandal, A. Mandal, S. Dutta, A. Yusuf, S. Munshi, S. Saha, S. Nandi // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 404. – pp. 93-108. – DOI 10.1007/978-981-19-0105-8_10.

108. Manzolli, J. A. Scenario-Based Multi-Criteria Decision Analysis for Rapid Transit Systems Implementation in an Urban Context / J. A. Manzolli, J. P. Trovão, C. H. Antunes // eTransportation. – 2021. – Vol. 7. – pp. 1-12. – DOI 10.1016/j.etrans.2020.100101.

109. Naudts, D. Vehicular Communication Management Framework: A Flexible Hybrid Connectivity Platform for CCAM Services / D. Naudts, V. Maglogiannis, S. Hadiwardoyo // Future Internet. – 2021. – Vol. 13, No. 3. – p. 81. – DOI 10.3390/fi13030081.

110. Praticò, F. G. Impact of Pavement Friction Decay on Speed Limits and Autonomous Vehicles: A Theoretical and Experimental Study / F. G. Praticò // Journal of Road Engineering. – 2025. – Vol. 5, No. 1. – pp. 35-47. – DOI 10.1016/j.jreng.2024.09.001.

111. Raju, N. Car-Following Properties of a Commercial Adaptive Cruise Control System: A Pilot Field Test / N. Raju, W. Schakel, N. Reddy, Y. Dong, H. Farah // Transportation Research Record. – 2022. – Vol. 2676, No. 7. – pp. 128-143. – DOI 10.1177/03611981221077085.

112. Rezaei, A. Simulating a Transition to Autonomous Mobility / A. Rezaei, B. Caulfield // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2021. – Vol. 106. – p. 102175. – DOI 10.1016/j.simpat.2020.102175.

113. Safiullin, R. The Method of Multi-criteria Evaluation of the Effectiveness of the Integrated Control System of a Highly Automated Vehicle / R. Safiullin, V. Efremova, B. Ivanov // *Open Transportation Journal*. – 2024. – Vol. 18, Issue 1. – 12 p. – DOI: 10.2174/0118744478309909240807051315. – EDN TEKZRB.

114. Saljoqi, M. Comparative Analysis of Fixed and Dynamic Adaptive Cruise Control Settings for Automated Vehicles using Microsimulation / M. Saljoqi, R. Ceccato, G. Gecchele, R. Rossi, M. Gastaldi // *Open Transportation Journal*. – 2026. – Vol. 20. – e26671212453946. – DOI 10.2174/0126671212453946260129104511.

115. Sekar, N. K. Micro-Simulation Insights into the Safety and Operational Benefits of Autonomous Vehicles / N. K. Sekar, V. Malaghan, D. S. Pawar // *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*. – 2023. – Vol. 6, No. 4. – pp. 202-210. – DOI 10.26599/JICV.2023.9210007.

116. Trovão, J. P. Digital Transformation, Systemic Design, and Automotive Electronics / J. P. Trovão // *IEEE Vehicular Technology Magazine*. – 2020. – pp. 149-159. – DOI 10.1109/MVT.2020.2980097.

117. Vasile, L. Influences of Personal Driving Styles and Experienced System Characteristics on Driving Style Preferences in Automated Driving / L. Vasile, B. Seitz, V. Staab, M. Liebherr, C. Däsch, D. Schramm // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 15. – p. 8855. – DOI 10.3390/app13158855.

118. Wang, C. Safety Assessment for Autonomous Vehicles: A Reference Driver Model for Highway Merging Scenarios / C. Wang, F. Guo, S. Zhao, Z. Zhu, Y. Zhang // *Accident Analysis and Prevention*. – 2024. – Vol. 206. – p. 107710. – DOI 10.1016/j.aap.2024.107710.

119. Wang, D. An Intelligent Self-Driving Truck System for Highway Transportation / D. Wang, L. Gao, Z. Lan // *Frontiers in Neurorobotics*. – 2022. – Vol. 16. – pp. 1-15. – DOI 10.3389/fnbot.2022.843026.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Патенты на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2849087

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВОЙ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Сафиуллин Равилл Нуруллович (RU), Сафиуллин Руслан Равиллович (RU), Залюбовский Андрей Фадеевич (RU), Ефремова Виктория Александровна (RU), Ефимовский Сергей Дмитриевич (RU)*

Заявка № 2025107267

Приоритет изобретения 26 марта 2025 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 22 октября 2025 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 26 марта 2045 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2798641

**АДАПТИВНО-УПРАВЛЯЕМАЯ СИСТЕМА
ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПОДАЧИ ТОПЛИВА
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Сафиуллин Равиль Нуруллович (RU), Сафиуллин Руслан Равильевич (RU), Сорокин Кирилл Владиславович (RU), Ефремова Виктория Александровна (RU)*

Заявка № 2022131859

Приоритет изобретения 07 декабря 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 23 июня 2023 г.


Срок действия исключительного права на изобретение истекает 07 декабря 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Акт внедрения ПАО «КАМАЗ»**

Утверждаю
 Директор Научно-технического центра-
 Главный конструктор ПАО «КАМАЗ»
 /Е.Г. Макаров/
 « 10 » 08 2025 г.
 М.П.

АКТ
 о внедрении результатов
 кандидатской диссертации
Ефремовой Виктории Александровны
 по научной специальности 2.9.8 «Интеллектуальные транспортные системы»

Комиссия (НТС, рабочая, специальная) в составе:

Председатель: Назаренко С.В. - Главный конструктор по инновационным автомобилям - руководитель службы;

Члены комиссии: Шагиев Р.А. - Руководитель группы карьерных и внедорожных автомобилей; Шамаров Р.Ф. - Главный специалист группы инновационных автомобилей; Мурзин Д.Р. - Начальник отдела разработки бортовых информационных систем, Салтыков А.В. - Главный специалист цифровой платформы бортовых информационных систем.

составила настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Комплексная методика аналитической оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в процессе проектирования высокоавтоматизированных транспортных средств в деятельности ПАО «КАМАЗ» в виде:

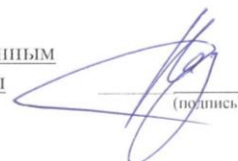
- метода формирования функциональной архитектуры тормозной системы высокоавтоматизированного транспортного средства;
- техноценнологического метода аналитической оценки уровня автоматизации транспортных средств.

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить качество проектирования тормозных систем и систем автоматического управления высокоавтоматизированными транспортными средствами за счет применения структурированного подхода к формированию архитектуры и объективной оценки уровня автоматизации инновационных транспортных средств;
- оптимизировать процесс разработки автоматизированных систем путем объективной сравнительной оценки уровня автоматизации различных концепций и компонентов с использованием техноценнологического метода;
- обеспечить соответствие разрабатываемых систем современным требованиям и стандартам в области автономного транспорта и функциональной безопасности.

Председатель комиссии


Главный конструктор по инновационным
автомобилям - руководитель службы
 (должность)


 (подпись)


/ С.В. Назаренко/
 (Ф.И.О.)

Члены комиссии:

Руководитель группы карьерных и
внедорожных автомобилей
(должность)


(подпись) /Р.А. Шагиев/
(Ф.И.О.)


Главный специалист группы
инновационных автомобилей
(должность)


(подпись) /Р.Ф. Шамаров/
(Ф.И.О.)

Начальник отдела разработки
бортовых информационных систем
(должность)


(подпись) /Д.Р. Мурзин/
(Ф.И.О.)

Главный специалист цифровой платформы
бортовых информационных систем
(должность)


(подпись) /А.В. Салтыков/
(Ф.И.О.)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт внедрения НПП «ЭВЛО»

Утверждаю

Исполнительный директор
ООО «НПП «ЭВЛО»

/В.А. Петров/



2026 г.

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Ефремовой Виктории Александровны

по научной специальности 2.9.8 «Интеллектуальные транспортные системы»

Комиссия (НТС, рабочая, специальная) в составе:

Председатель: Петров В.А. – Генеральный директор;

Члены комиссии: Тараканов С.А. – Директор по развитию; Барабина М.А. – Начальник отдела автоматике; Андреевская В.В. – Инженер-аналитик; Мельников В.Р. – Ведущий инженер

составила настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Комплексная методика аналитической оценки уровня автоматизации транспортно-технологических машин», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в процессе эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств в деятельности ООО «НПП «ЭВЛО» в виде:

- аналитического аппарата оценки степени автоматизации транспортных средств;
- модели расчета эквивалентного активного времени управления при разном уровне автоматизации и типе транспортного средства.

Использование указанных результатов позволяет:

- обеспечить соответствие разрабатываемых систем современным требованиям и стандартам в области автоматизированного транспорта и функциональной безопасности;
- оптимизировать процесс разработки функциональной архитектуры автоматизированных систем путем сравнительной оценки различных концепций и компонентов с использованием техноценологического метода.


Председатель комиссии

Генеральный директор

 /Петров В.А.
(подпись) (Ф.И.О.)

Члены комиссии:

Директор по развитию

 /Тараканов С.А.
(подпись) (Ф.И.О.)


Начальник отдела автоматике

 /Барабина М.А.
(подпись) (Ф.И.О.)

Инженер-аналитик

 /Андреевская В.В.
(подпись) (Ф.И.О.)

Ведущий инженер

 /Мельников В.Р.
(подпись) (Ф.И.О.)