

На правах рукописи



СОЛОВЬЕВ Виктор Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМЫ
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ МНОГОЗАДАЧНОЙ
КООРДИНАЦИИ КОМПЛЕКСА
РОБОТИЗИРОВАННЫХ НАЗЕМНЫХ
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2026

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

Научный руководитель: **Евтюков Сергей Аркадьевич**,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Зорин Владимир Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет (МАДИ)», кафедра «Про-
изводство и ремонт автомобилей
и дорожно-строительных машин», профессор;
Загородний Николай Александрович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В. Г. Шухо-
ва», Транспортно-технологический институт
БГТУ им. В.Г. Шухова, директор.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Импера-
тора Александра I».**

Защита диссертации состоится 17 декабря 2026 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, аудитория зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220).

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/solovev-viktor-vladimirovich>.

Автореферат разослан 19 октября 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Репин С. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время стратегические ориентиры развития промышленности и инфраструктуры определяются новыми национальными целями, установленными Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 года № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». В рамках достижения национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни» особое внимание уделяется модернизации строительного сектора и повышению эффективности возведения объектов капитального строительства. Одним из ключевых драйверов этой трансформации выступает широкомасштабная роботизация и интеллектуализация наземных транспортно-технологических машин (НТТМ), применяемых на всех этапах строительного производства. Указанная задача коррелирует с положением Указа Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», а также с целевым показателем вхождения Российской Федерации к 2030 году в число 25 ведущих стран мира по плотности применения робототехнических средств. В этой связи остро встает вопрос не просто об автоматизации отдельных операций, а создания систем управления целыми комплексами роботизированных машин, что напрямую коррелирует с задачами повышения производительности труда и снижения себестоимости строительства, обозначенными в отраслевых стратегиях цифровой трансформации.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки принципиально новых теоретических и методологических средств управления эксплуатацией комплексов роботизированных НТТМ (РНТТМ), ориентированных на решение широкого спектра строительных задач. Современные строительные площадки характеризуются высокой динамикой, стохастичностью внешней среды и жесткими требованиями к энергоэффективности и соблюдению технологических регламентов. В условиях применения гетерогенных групп роботизированных машин традиционные централизованные подходы к планированию операций показывают свою посредственность из-за вычислительной сложности и низкой адаптивности к непредвиденным отклонениям. Следовательно, требуется переход к децентрализованным многозадачным алгоритмам, способным обеспечить синергетический эффект от взаимодействия машин и существенное снижение удельных энергозатрат при выполнении технологических циклов.

Достижение качественно нового уровня эффективности строительного производства требует принципиального пересмотра методологии организации и управления процессами функционирования комплексов РНТТМ при возведении зданий, сооружений и инфраструктурных объектов обще-

го пользования. Ключевую роль в этом играет научное обоснование систем распределенной координации, в которых каждая РНТТМ выступает автономным агентом, способным к локальному планированию и динамическому перераспределению задач в реальном времени. Существующие на сегодняшний день подходы к управлению строительной техникой, как правило, ограничены рамками отдельных машин или жестко детерминированными сетевыми графиками и не учитывают возможности многоагентного взаимодействия для оптимизации глобальных критериев. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 мая 2024 года № 614 «Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства» и Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2021 года № 3883-р «Об утверждении Стратегического направления в области цифровой трансформации строительной отрасли, городского и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 года», цифровизация строительных процессов требует создания новых алгоритмов управления технологическими комплексами. Следовательно, исследование моделей и проектирование алгоритмов децентрализованной многозадачной координации для комплексов РНТТМ является своевременной и востребованной научной задачей, открывающей пути к созданию высокоэффективных, отказоустойчивых и энергосберегающих строительных систем нового поколения.

Таким образом, формулируется проблема применения комплекса РНТТМ, где каждая машина должна функционировать автономно и эффективно выполнять задачи по назначению эксплуатации. Решение указанной проблемы требует разработки методов управления, таких как многозадачная координация комплекса РНТТМ с целью повышения производительности и обеспечения энергоэффективности. Указанные методы для эффективного функционирования комплекса РНТТМ перспективно строить в рамках децентрализованного управления, с возможной минимизацией объема информации, которой машины обмениваются между собой. Это обусловлено рядом ограничений при применении подхода с централизованным управлением РНТТМ: во-первых, повышенные риски к потере управления комплексом машин при выходе из строя центрального управляющего лидера или прерываниях в каналах связи, а во-вторых, время принятия решения комплексом машин экспоненциально увеличивается с повышением числа объектов в комплексе. В децентрализованной системе группового управления РНТТМ нет четкого лидера, а каждый член комплекса РНТТМ автономен в той или иной мере.

Децентрализованная многозадачная координация комплекса РНТТМ относится к системному уровню управления рабочими процессами машин. Группа РНТТМ рассматривается как технологический комплекс, а их координация – как функция системы управления этим комплексом, обеспе-

чивающая распределение и синхронизацию рабочих процессов отдельных машин. Таким образом децентрализованная многозадачная координация комплекса РНТТМ относится к системному уровню управления рабочими процессами технологического комплекса НТТМ.

Различным аспектам проблемы группового управления и его моделирования посвящены работы отечественных ученых Репина С. В., Евтюкова С. А., Воробьева А. А., Зорина В. А., Загороднего Н. А., Грушецкого С. М., Алешина М. В., Гайдука А. Р., Довгала В. А., Журба Я. С., Казаряна Д. Э., Козлова М. Г., Лазарева В. С., Медведева М. Ю., Певзнера Л. Д., Петренко В. И., Пшихопова В. Х., Феофилова А. А., Фильченкова А. А., Чичерина И. В. и зарубежных Aziz H., Braquet M., Choudhury S., Dias M. B., Gerkey B. P., Korsah G. A., Liu W., Mailler R., Nunes E., Rizk Y., Sawadsitang S., Velhal S., Wei Y., Yan Z., Zhang F.

Из анализа этих работ можно сделать вывод, что наиболее перспективными являются групповые системы с децентрализованным типом управления РНТТМ. Такой подход предполагает взаимодействие нескольких машин и является децентрализованным, поскольку в нем предполагается коллективное управление системой машин на основе решений, вырабатываемых всеми членами комплекса машин. Однако такие системы управления требуют интенсивного обмена информацией между машинами, что является проблемой для подсистемы связи, которая должна обеспечивать высокую помехоустойчивость и оперативную реконфигурацию системы машин.

Принципиальное отличие предложенного подхода от современных многоагентных систем, в которых доминируют методы глубокого обучения с подкреплением и централизованно-децентрализованные архитектуры, заключается в использовании аналитической теории игр для децентрализованного выбора задач. Это обеспечивает детерминированность и предсказуемость поведения РНТТМ без необходимости предварительного обучения. При этом, явно учитываются неоднородности навесного оборудования и минимальный объем обмена служебной информацией – передаются только скалярные значения приоритетов, что критически важно для условий строительных работ. Таким образом, принципиально расширяется методология многозадачной координации, смещая фокус с универсальных роботизированных платформ на специализированные комплексы строительных машин и предлагается инженерно-реализуемое решение, не требующее доработки механической части существующих парков роботизированной техники.

Целью диссертационной работы является повышение производительности и эффективности комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин при выполнении разнородных рабочих процессов за счет разработки имитационной модели и алгоритмов многозадачной координации на основе децентрализованного выбора задач.

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

1. Провести анализ известных подходов к координации комплекса РНТТМ и их методов автоматизации.
2. Определить, формализовать и разработать имитационную модель и алгоритмы децентрализованной многозадачной координации комплекса РНТТМ на ее основе.
3. Реализовать предложенные алгоритмы в виде программного комплекса.
4. Провести эксперименты в сравнении с существующими подходами и выполнить оценку эффективности разработанных алгоритмов децентрализованной многозадачной координации комплекса РНТТМ.

Объектом исследования являются комплексы роботизированных наземных транспортно-технологических машин.

Предметом исследования является многозадачная координация комплекса РНТТМ при выполнении задач по назначению эксплуатации.

Рабочая гипотеза исследования заключается в том, что повышение эффективности эксплуатации комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин при выполнении разнородных рабочих процессов возможно за счет их многозадачной координации в комплексе на основе децентрализованного выбора задач, учитывающего текущее энергетическое состояние машин, неоднородность технического оснащения и стохастическую природу рабочих операций. Предполагается, что разработка и применение алгоритмов децентрализованной многозадачной координации комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин позволит:

- улучшить суммарную производительность комплекса РНТТМ;
- снизить энергетические затраты при выполнении заданного объема работ;
- сократить время выполнения комплекса рабочих операций.

Научная новизна:

1. Разработана имитационная модель многозадачной координации комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин, в которой учтены особенности энергоограниченности и неоднородности оборудования.
2. Впервые разработаны алгоритмы децентрализованной координации (энергосберегающая стратегия и минимизации временных задержек), основанные на адаптации методов теории игр к выбору задач в комплексе РНТТМ в условиях стохастической постановки задач.
3. Установлены закономерности влияния энергетических ограничений и неоднородности оснащения роботизированных наземных транспортно-технологических машин на равномерность распределения нагрузки и эффективность децентрализованной координации.

Теоретическая значимость заключается в формализации многозадачной координации координации комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин в виде байесовской игры на связанном графе взаимодействий; доказательстве существования байесовских равновесий Нэша; получении оценок вычислительной сложности предложенных алгоритмов; развитии методов децентрализованного управления комплексами роботизированных наземных транспортно-технологических машин.

Практическая значимость заключается в подтвержденной практической ценности и реализации в виде алгоритмов децентрализованной многозадачной координации комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин, а также программных комплексов, зарегистрированных как объекты интеллектуальной собственности. Реализация не требует доработки механической части существующих парков машин.

Методология и методы исследования. Основываются на методах системного анализа, математического моделирования, теории вероятностей, теории игр, программирования высокого уровня, статистических и численных методах. При проведении вычислительных экспериментов применены элементы теории эксперимента: контролируемые сценарии ресурсного обеспечения, многократные повторения прогонов, закон больших чисел, коэффициент Джини для оценки равномерности распределения нагрузки, анализ чувствительности экономических показателей.

Область диссертационного исследования соответствует направлениям 3 и 6 исследований паспорта научной специальности 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы.

Соответствие направлений паспорта научной специальности приведены в порядке, соответствующем пунктам научной новизны в части:

- математического моделирования системного рабочего процесса многозадачной координации комплекса РНТТМ, учитывающего взаимодействие машин с рабочими средами (объектами) посредством технологического оборудования через формализацию требований к наземному оборудованию и энергозатрат на выполнение технологических операций;

- синтеза законов децентрализованного управления выбором задач в комплексе наземных транспортно-технологических средств на основе адаптации методов теории игр, направленных на улучшение производительности и обеспечение энергоэффективности комплекса;

- экспериментальных исследований и испытаний комплексов транспортно-технологических средств, включая разработку программной платформы для вычислительных экспериментов и методики проведения натурального эксперимента в условиях, приближенных к эксплуатации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель многозадачной координации комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин.
2. Алгоритмы децентрализованной многозадачной координации комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин.
3. Результаты экспериментальных исследований с комплексной оценкой эффективности разработанных алгоритмов.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- разработаны функции полезности, учитывающие энергетические ограничения при выборе задач в процессе децентрализованной координации комплекса РНТТМ;
- предложены алгоритмы энергосберегающей стратегии и стратегии минимизации временных задержек для распределения задач между РНТТМ;
- создана программная платформа имитационного моделирования, позволяющая проводить сравнительный анализ эффективности стратегий координации;
- организованы и проведены серии вычислительных экспериментов, выполнен статистический анализ полученных результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается проведением серии вычислительных экспериментов с многократными прогонами разработанных алгоритмов децентрализованной многозадачной координации в различных сценариях, моделирующих реальные условия эксплуатации комплекса машин. Статистическая значимость результатов подтверждается применением методов математической статистики для обработки экспериментальных данных, включая вычисление выборочных средних значений и стандартных отклонений ключевых метрик производительности. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных алгоритмов, показывая устойчивое превосходство энергосберегающей стратегии по ключевым показателям (количество выполненных задач, энергоэффективность, время выполнения) по сравнению с аналогами, что находится в соответствии с результатами, полученными в ходе вычислительных экспериментов.

Апробация работы. Результаты исследования доложены, обсуждены и одобрены на:

- 28-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы» («Молодой инженер») (МГТУ им. С.М.Баумана, Москва, 2024 г.),
- XVI Международной конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах», посвященной памяти доктора технических наук, профессора Кравченко П.А. (СПб ГАСУ, 2024 г.),
- XXXVIII Национальной (с международным участием) научно-

технической конференции «Эксплуатация и сервис автомобилей, тракторов и двигателей» (СПб ГАУ, Санкт-Петербург, 2025 г.),

– 29-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы» («Молодой инженер») (МГТУ им. С.М.Баумана, Москва, 2025 г.),

– VII Международной научно-практической конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника» (НИЦ МС, Москва, 2025 г.),

– VII Международной научно-технической конференции «ИНТЕР-СТРОЙМЕХ-2026» (НИУ МГСУ, Москва, 2026 г.),

– научных семинарах и круглых столах кафедры «Наземных транспортно-технологических средств и комплексов» (СПб ГАСУ, Санкт-Петербург, 2022-2026 гг.).

Реализация результатов работы. Значимость результатов диссертационного исследования подтверждается:

1. Актом о внедрении в учебные программы ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» при реализации лекционных, практических и лабораторных занятий кафедрой наземных транспортно-технологических машин по направлениям подготовки:

– 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы»

– 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»

– 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»

2. Актом о внедрении в АО «Петербург-Дорсервис»;

3. Актами о внедрении в парках машин МО РФ.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, и зарегистрированных 2 программ для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и 5 приложений. Визуально структура отображена на рис. 1. Полный объем диссертации содержит 234 страницы текста с 42 рисунками и 29 таблицами. Список литературы содержит 122 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, представлена рабочая гипотеза, научная новизна, практическая значимость, методология и методы исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения об апробации, внедрении и публикациях.

В первой главе проведен анализ известных подходов к координации комплекса РНТТМ и методов автоматизации рабочих процессов. РНТТМ рассматриваются как высокоавтоматизированные дорожно-строительные



Рисунок 1 — Общая структура диссертационной работы

машины (ВАЗДСМ) по ГОСТ Р 71615-2024, функционирующие на уровнях автоматизации УА2-УА5. Рассмотрены технические предпосылки реализации децентрализованной координации, включая подсистемы сбора данных, позиционирования и локализации, исполнительную подсистему, а также подсистему планирования и управления. Выполнен обзор и классификация исследований в области группового управления и распределения задач, на основе чего сформулированы цели и задачи настоящей работы.

Во второй главе на основе данных реальных проектов строительства современных скоростных автомобильных дорог М-11 и М-12 проведена систематизация комплексов НТТМ по технологическому назначению. Это позволило сформировать репрезентативные множества машин и задач, отражающие реальные технологические комплексы и операции. Разработана имитационная модель многозадачной координации комплекса РНТТМ, учитывающая энергетические ограничения машин, неоднородность их оборудования и стохастическую природу потока задач. Предложены две новые стратегии децентрализованного выбора задач: энергосберегающая стратегия и стратегия минимизации временных задержек, формализованные на основе адаптации методов теории игр. Представлено математическое обоснование модели и алгоритмов, доказано существование байесовских равновесий Нэша и проведена оценка вычислительной сложности.

В третьей главе осуществлена программная реализация разработанных алгоритмов на языке программирования Go, создан программный комплекс для проведения вычислительных экспериментов. Разработана методика экспериментальных исследований, включающая три сценария ресурсного обеспечения (дефицит, равновесие, избыток). Проведен сравнительный анализ предложенных стратегий с существующими подходами (прямой перебор, рыночные методы и обучение с подкреплением) на типовом комплексе и парке РНТТМ на идентичных наборах исходных данных (машин и задач). Индивидуальные характеристики каждой машины и требования каждой задачи формализованы в модели и непосредственно влияют на функцию полезности при выборе задачи, что обеспечивает объективность оценки эффективности каждой стратегии. Для количественной оценки справедливости распределения задач использован коэффициент Джини. Предложена методика проведения натурального эксперимента для верификации алгоритмов в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

В четвертой главе выполнен анализ технико-экономических показателей внедрения разработанных алгоритмов децентрализованной многозадачной координации на основе синтеза результатов имитационного моделирования и данных актов внедрения. Произведен расчет ожидаемого годового экономического эффекта и срока окупаемости капитальных затрат, проведена оценка инвестиционной привлекательности. Выполнен анализ чувствительности к стоимости машино-часа и рассмотрены возможные риски внедрения, предложены меры по их минимизации.

В приложениях приведены сводные данные по экспериментальным исследованиям, исходный код программных средств и алгоритмов, а также копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и актов внедрения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Имитационная модель многозадачной координации комплекса РНТТМ. Исходными данными для формализации и параметризации модели послужили утвержденные проекты организации строительства (ПОС) современных скоростных автомобильных дорог М-11 «Москва – Санкт-Петербург» и М-12 «Москва – Нижний Новгород – Казань». На основе анализа ведомостей потребности в машинах и механизмах выделены типовые технологические комплексы НТТМ: подготовительных работ, земляных работ, устройства дорожной одежды, строительства искусственных сооружений, переустройства инженерных коммуникаций и вспомогательный транспортно-технологический. Пример составов комплексов при транспортном строительстве автодорог приведен в таблицах в тексте диссертации. Каждый комплекс включает конкретные модели машин (экскаваторы ЭО-4321, ЕК-270; бульдозеры Б10ПМ, ДЗ-101А; автогрейде-

ры ДЗ-98; катки Hamm, Bomag; асфальтоукладчики Voegelé, Titan и др.) и наборы технологических операций с нормативными показателями энергозатрат, что позволило сформировать репрезентативные множества машин и задач для имитационного моделирования.

На рис. 2 представлена принципиальная схема РНТТМ как элемента множества. Схема отражает архитектуру бортовой системы управления, включающую сенсорные подсистемы, вычислительный блок с реализованными алгоритмами принятия решений, каналы связи с другими машинами, диспетчерским центром и исполнительными механизмами.

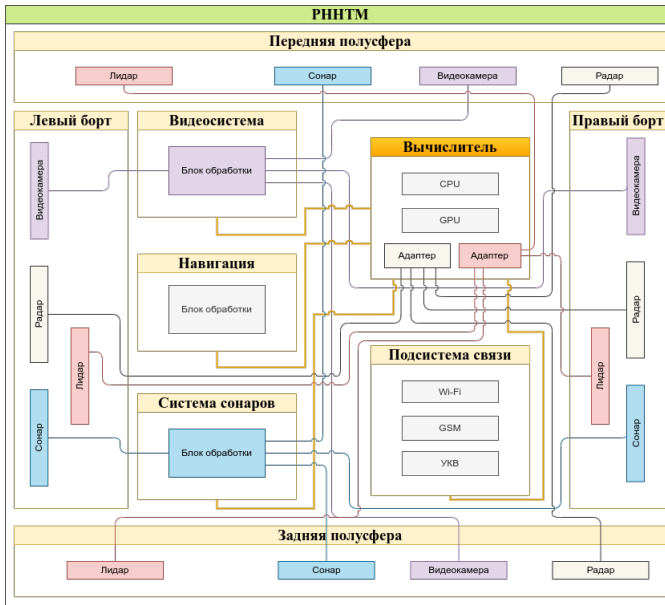


Рисунок 2 — Принципиальная схема РНТТМ

В основу модели (рис. 3) положено представление комплекса РНТТМ как множества машин R_i ($i = 1, \dots, N$), каждая из которых характеризуется набором технологического оборудования E_{q_i} (ковш, отвал, вибровалец и т.д.) и запасом энергии $E_i \in [0, E_{\max}]$. Динамика энергии описывается соотношением

$$E_i(t + \Delta t) = \min \left\{ \max \left\{ E_i(t) - e_{T_j} \cdot \mathbf{1}(A_i = T_j) + r_i \Delta t, 0 \right\}, E_{\max} \right\}, \quad (1)$$

где $E_i(t)$ и $E_i(t + \Delta t)$ – запас энергии i -й РНТТМ в момент времени t и $t + \Delta t$ соответственно; Δt – шаг дискретизации; e_{T_j} – энергозатраты на выполнение j -й задачи; A_i – действие i -й РНТТМ (выбор задачи T_j);

$1(A_i = T_j)$ – индикаторная функция, принимающая значение 1, если i -я РНТТМ выбрала задачу T_j , и 0 в противном случае; r_i – скорость восстановления ресурса i -й РНТТМ; $E_{\max}$ – максимальный запас энергии. Поток задач $\mathcal{T}(t) = \{T_1, \dots, T_{M(t)}\}$ формируется двумя независимыми пуассоновскими процессами (внешним и внутренним) с суммарной интенсивностью $\lambda = \lambda_s + \lambda_l$. Каждая задача T_j характеризуется сложностью Θ_{T_j} , распределенной по усеченному нормальному закону $\mathcal{N}_{[0,+\infty)}(\mu_T, \sigma_T^2)$, и требуемым типом оборудования Req_{T_j} .

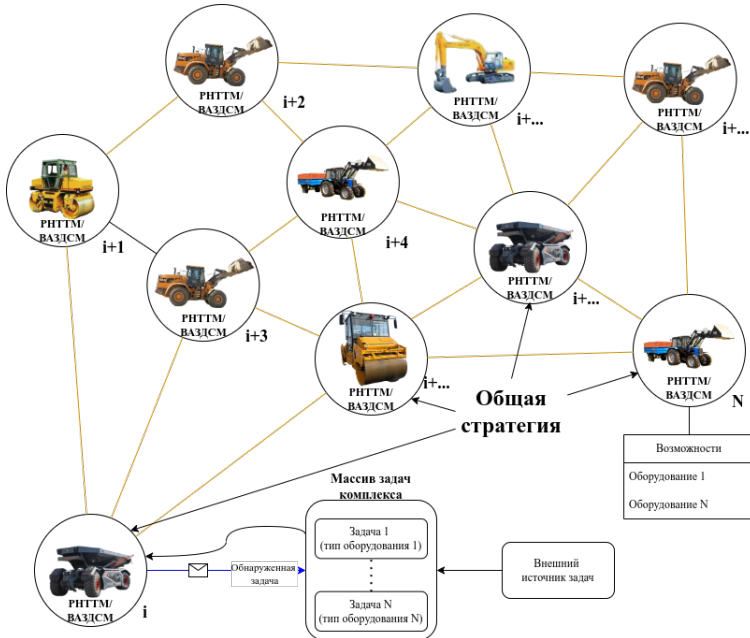


Рисунок 3 — Граф взаимодействия системы многозадачной координации комплекса РНТТМ

Предлагаемая имитационная модель построена на следующих основных допущениях:

- поток задач является пуассоновским, а сложность каждой задачи распределена по усеченному нормальному закону;
- энергопотребление при выполнении задачи детерминировано и линейно зависит от ее сложности, время выполнения пропорционально этой сложности;
- каждая машина может выполнять только те задачи, для которых ее

навесное оборудование удовлетворяет требованиям задачи;

- взаимодействие между машинами осуществляется по фиксированному связному неориентированному графу, решения принимаются дискретно во времени синхронно;

- влияние рабочей среды на эффективность работы машин в явном виде не учитываются. Предполагается, что эти факторы уже отражены в детерминированных и статистически заданных параметрах сложности задач;

- вся необходимая для выбора задачи информация (сложность, требуемое оборудование, уровень энергии) считается достоверной и доступной локально.

Так как объектом исследования является **системный уровень координации** комплекса машин, а именно распределение задач и децентрализованное принятие решений, то взаимодействие с рабочей средой считается заданным на нижнем уровне автоматизации (штатные системы управления рабочим органом) и не влияет напрямую на предлагаемые далее алгоритмы координации, за исключением энергозатрат Θ_{T_j} , которые являются входным параметром модели. Математические модели физического взаимодействия РНТТМ с рабочей средой (грунтом, дорожным покрытием) не рассматриваются в работе. Управление рабочими органами, стабилизация движения и другие задачи нижнего уровня автоматизации считаются штатно решенными и не являются предметом моделирования. На уровне принятия решений о распределении задач влияние среды считается постоянным в пределах одного эксперимента.

Задача доступна машине при одновременном выполнении условий совместимости оборудования и достаточности энергии:

$$\mathcal{T}_i(t) = \{T_j \in \mathcal{T}(t) \mid \text{Eq}_i \succeq \text{Req}_j, E_i \geq \Theta_{T_j}\}, \quad (2)$$

где $\mathcal{T}_i(t)$ – локальный массив задач, доступных i -й РНТТМ в момент времени t ; $\mathcal{T}(t)$ – общий групповой массив задач; T_j – j -я задача; Eq_i – набор оборудования i -й РНТТМ; Req_j – требуемый тип оборудования для выполнения задачи T_j ; запись $\text{Eq}_i \succeq \text{Req}_j$ означает, что набор оборудования машины Eq_i удовлетворяет или превосходит требования задачи Req_j ; E_i – текущий запас энергии i -й РНТТМ; Θ_{T_j} – требуемый объем энергозатрат (сложность) на выполнение задачи T_j .

Взаимодействие машин моделируется связным неориентированным графом $G = ([N], \mathcal{E})$; множество соседей машины R_i обозначается $\mathcal{R}_i$. Каждая РНТТМ выбирает задачу в соответствии со стратегией γ_i , а профиль стратегий всего комплекса есть $\Gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_N)$. Поведение комплекса описывается координационной игрой с локальной функцией полезности вида:

$$V_i(\mathbf{A}, \Theta) \equiv \sum_{j \in \mathcal{R}_i} \alpha \cdot \mathbf{1}(A_i = A_j) - \beta \Theta(A_i), \quad (3)$$

где $V_i(\mathbf{A}, \Theta)$ – функция полезности i -й РНТТМ; $\mathbf{A} = (A_1, \dots, A_N)$ – вектор действий всех РНТТМ комплекса; Θ – вектор сложностей задач; A_i и A_j – действия i -й и j -й РНТТМ соответственно; $\mathcal{R}_i$ – множество соседей i -й РНТТМ в графе взаимодействий; $\mathbf{1}(A_i = A_j)$ – индикаторная функция, равная 1, если соседи выбрали одну задачу, и 0 в противном случае; $\alpha > 0$ – коэффициент поощрения (выигрыш) за координацию; $\beta > 0$ – штрафной коэффициент за сложность; $\Theta(A_i)$ – сложность задачи, выбранной i -й РНТТМ. Стратегия $\gamma^* = (\gamma_1^*, \dots, \gamma_N^*)$ является байесовским равновесием Нэша, если для каждой i -й РНТТМ выполняется условие:

$$J_i(\gamma_i^*, \gamma_{-i}^*) \geq J_i(\gamma_i, \gamma_{-i}^*), \quad \gamma_i \in \Gamma_i, \forall i \in [N], \quad (4)$$

где J_i – ожидаемый выигрыш i -й РНТТМ; γ_i^* – оптимальная стратегия i -й РНТТМ; γ_{-i}^* – профиль стратегий всех остальных РНТТМ комплекса; γ_i – любая альтернативная стратегия i -й РНТТМ; Γ_i – множество допустимых стратегий i -й РНТТМ; $[N]$ – множество всех РНТТМ в комплексе. Доказано существование таких равновесий, зависящих от структуры графа и соотношения сложностей задач.

Выполнено сопоставление предложенной модели с классической системой массового обслуживания; показано, что в отличие от стандартных подходов, разработанная модель учитывает неоднородность машин, стохастическую сложность задач и децентрализованный характер принятия решений, что обеспечивает ее адекватность реальным условиям эксплуатации.

2. Алгоритмы децентрализованной многозадачной координации комплекса РНТТМ. С использованием предложенной модели формализованы две новые стратегии децентрализованного выбора задач:

– *Энергосберегающая стратегия* $\Gamma_{\min \Theta}$ (рис. 4), в которой функция полезности i -й машины имеет вид

$$\mathcal{V}_i^{\min \Theta}(\mathbf{A}, \Theta, E_i) = \alpha \sum_{j \in \mathcal{R}_i} \mathbf{1}(A_i = A_j) - \beta \frac{\Theta_{A_i}}{E_i}, \quad (5)$$

где $\mathcal{V}_i^{\min \Theta}$ – функция полезности энергосберегающей стратегии для i -й РНТТМ; $\mathbf{A}$ – вектор действий всех машин комплекса; Θ – вектор сложностей задач; E_i – текущий запас энергии i -й РНТТМ; $\mathcal{R}_i$ – множество соседей машины R_i в графе взаимодействий; $\mathbf{1}(A_i = A_j)$ – индикаторная функция совпадения действий соседей; $\alpha > 0$ – коэффициент поощрения за скоординированный выбор одной и той же задачи с соседями; $\beta > 0$ – штрафной коэффициент; Θ_{A_i} – сложность задачи, выбранной i -й машиной. Второе слагаемое $\beta \Theta_{A_i} / E_i$ представляет собой энергоэффективность задачи, что

позволяет каждой машине автономно минимизировать отношение затрат к оставшемуся ресурсу.

– *Стратегия минимизации временных задержек* $\Gamma_{\min B3}$ (рис. 5), вводящая динамику времени ожидания задачи W_j , которая описывается соотношением:

$$W_j(t + \Delta t) = \begin{cases} 0 & \text{при выполнении,} \\ W_j(t) \cdot e^{\lambda \Delta t} & \text{иначе,} \end{cases} \quad (6)$$

где $W_j(t)$ и $W_j(t + \Delta t)$ – время ожидания j -й задачи в очереди в момент времени t и $t + \Delta t$ соответственно; Δt – шаг дискретизации; $\lambda > 0$ – коэффициент роста задержки во времени. Целевая функция i -й РНТТМ имеет вид:

$$\mathcal{V}_i^{\min B3}(\mathbf{A}, \Theta) = -\beta W_{A_i}(t) \Theta_{A_i} + \alpha \sum_{j \in \mathcal{R}_i} \mathbf{1}(A_i = A_j), \quad (7)$$

где $\mathcal{V}_i^{\min B3}$ – функция полезности стратегии минимизации временных задержек; $\mathbf{A}$ – вектор действий; Θ – вектор сложностей задач; β – штрафной коэффициент; $W_{A_i}(t)$ – время нахождения задачи, выбранной i -й РНТТМ, в очереди; Θ_{A_i} – сложность выбранной задачи; α – коэффициент поощрения; $\mathcal{R}_i$ – множество соседей; $\mathbf{1}(A_i = A_j)$ – индикаторная функция совпадения действий. Первое слагаемое $-\beta W_{A_i}(t) \Theta_{A_i}$ формирует штраф, пропорциональный как сложности задачи, так и длительности ее ожидания, что заставляет комплекс отдавать приоритет «стареющим» задачам и предотвращать неограниченный рост задержек.

Для разработанных стратегий выполнено математическое обоснование: доказано существование по крайней мере одного байесовского равновесия Нэша. Например, для энергосберегающей стратегии равновесие достигается при:

$$A_i^* = \min_{k \in \mathcal{T}_i(t)} \left(\frac{\Theta_k}{E_i} - \frac{\alpha}{\beta} \cdot \mathbb{E}[|\{j \in \mathcal{R}_i : A_j = k\}|] \right), \quad (8)$$

где A_i^* – оптимальное действие (выбор задачи) i -й РНТТМ при достижении равновесия; k – индекс рассматриваемой задачи из локального массива $\mathcal{T}_i(t)$; Θ_k – сложность k -й задачи; E_i – текущий запас энергии i -й РНТТМ; α и β – весовые коэффициенты поощрения и штрафа; $\mathbb{E}[\cdot]$ – математическое ожидание; $|\{j \in \mathcal{R}_i : A_j = k\}|$ – мощность множества соседей i -й РНТТМ, выбравших ту же задачу k .

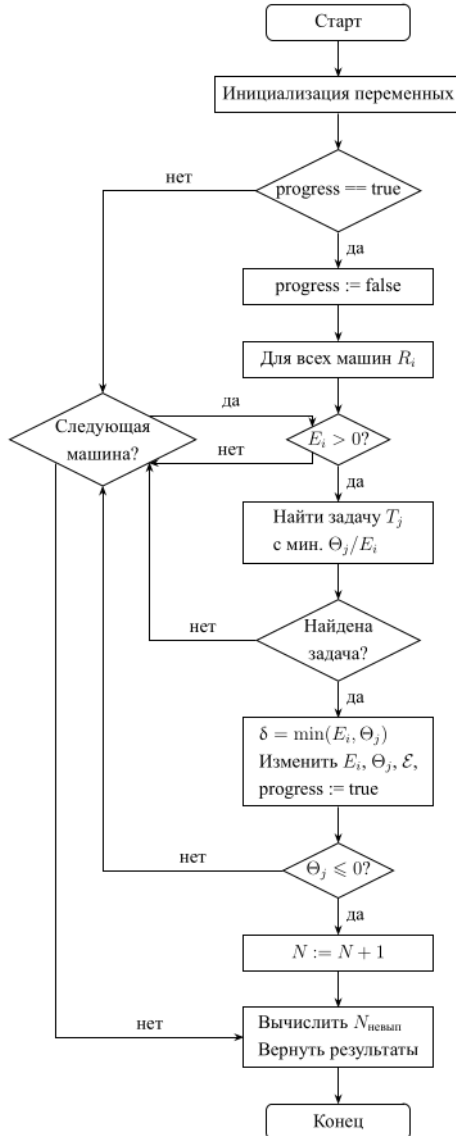
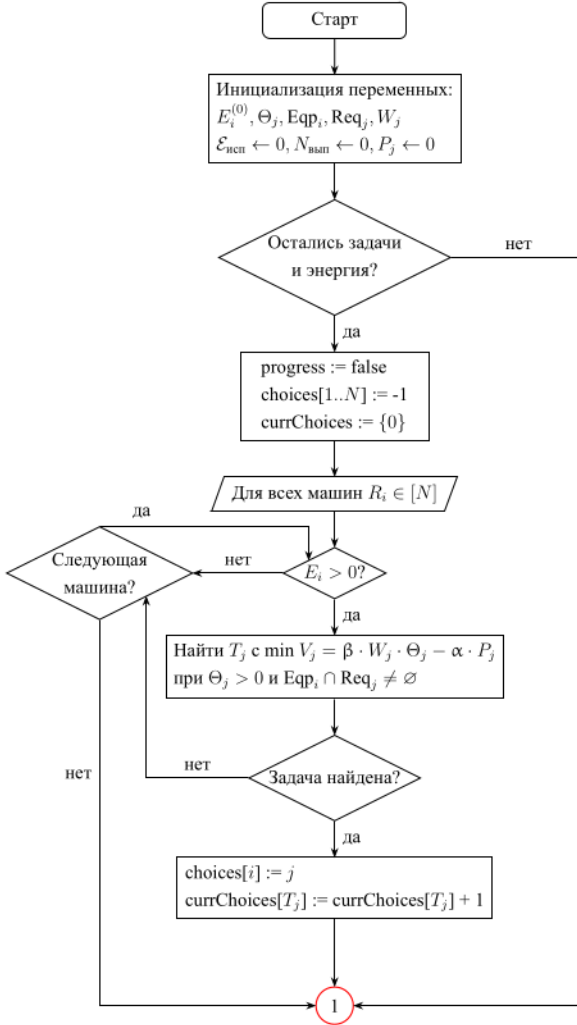
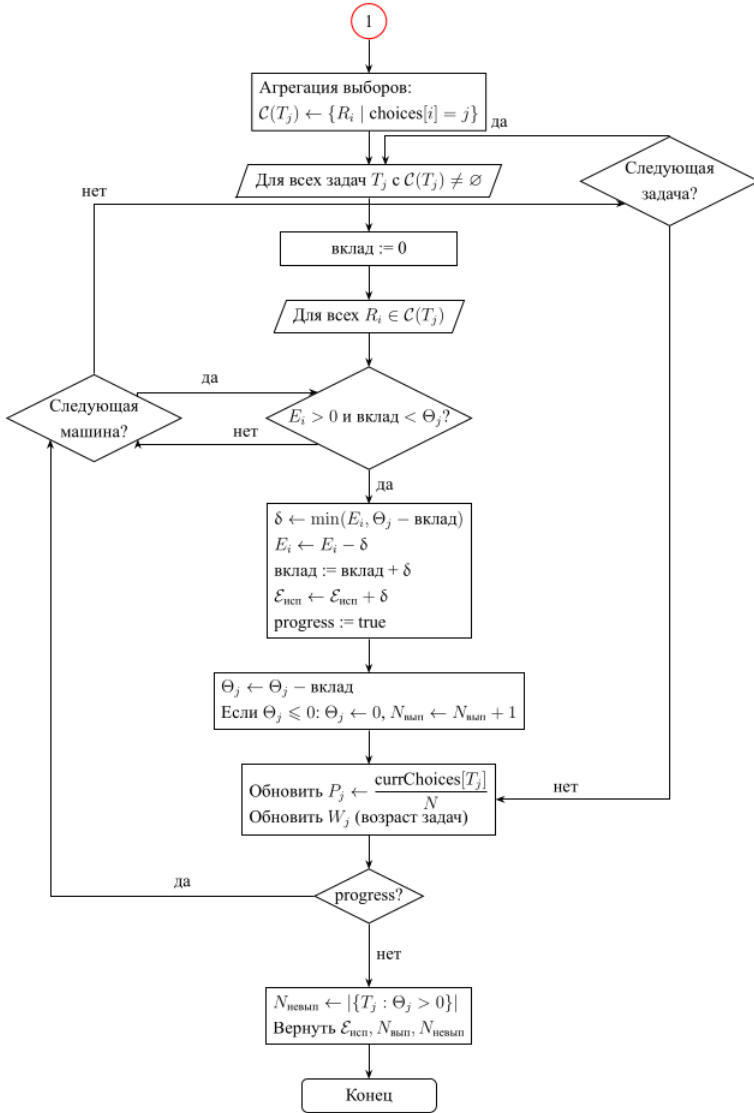


Рисунок 4 — Алгоритм энергосберегающей стратегии децентрализованной многозадачной координации комплекса РНТТМ



а) Начало

Рисунок 5 — Алгоритм стратегии минимизации временных задержек децентрализованной многозадачной координации комплекса РНТТМ



б) Окончание

Рисунок 5 — Алгоритм стратегии минимизации временных задержек децентрализованной многозадачной координации комплекса РНТТМ

Установлена сходимость алгоритмов за конечное число итераций и получена оценка вычислительной сложности:

$$\mathcal{O}(N \cdot M \cdot \Delta), \text{ где } \Delta = \max_i |\mathcal{R}_i|, \quad (9)$$

где $\mathcal{O}(\cdot)$ – асимптотическая оценка вычислительной сложности; N – количество РНТТМ в комплексе; M – количество доступных задач в системе; Δ – максимальная степень вершины в графе взаимодействий (максимальное число соседей у одной РНТТМ). Полученная оценка существенно эффективнее полного перебора ($\mathcal{O}(M^N)$). Проведен анализ устойчивости решений к малым возмущениям параметров, показывающий, что формализация выбора задач в терминах байесовского равновесия обеспечивает устойчивость распределения при неполной информации о состоянии частей комплекса РНТТМ.

3. Результаты экспериментальных исследований с комплексной оценкой эффективности разработанных алгоритмов. Программная реализация разработанных алгоритмов выполнена на языке Go. Создана платформа моделирования, обеспечивающая проведение вычислительных экспериментов для комплексов различной численности в контролируемых условиях. Разработаны методики проведения вычислительных экспериментов с использованием программной платформы и проведения натурного эксперимента.

Архитектура программного комплекса построена по модульному принципу (рис. 6) и включает: модуль конфигураций, модуль моделей и модуль стратегий, в который подгружаются наборы стратегий координации, реализующих общий интерфейс. Главный исполняемый файл импортирует эти модули, осуществляет прогон симуляций по стратегиям на единых исходных данных конфигураций и моделях машин и задач с формированием отчетов и последующим их анализом. Такой подход обеспечивает гибкость и расширяемость системы, позволяя добавлять новые алгоритмы и сравнивать их в единой среде. Ключевые компоненты реализованы с использованием встроенных механизмов конкурентности Go (горутины, каналы), что адекватно отражает децентрализованный характер взаимодействия РНТТМ.

В платформе реализованы пять стратегий распределения задач: две разработанные автором (энергосберегающая $\Gamma_{\min \exists}$ и минимизации временных задержек $\Gamma_{\min \text{B3}}$) и три сравнительных (прямой перебор, рыночный метод, Q-обучение). На программные средства получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Методика экспериментов включает три сценария, моделирующих различное соотношение суммарной энергии машин и энергоемкости задач: дефицитный ($\sum E_i = 0,5 \sum \Theta_j$), равновесный ($\sum E_i = \sum \Theta_j$) и избыточный ($\sum E_i = 2 \sum \Theta_j$). Для обеспечения статистической достоверности

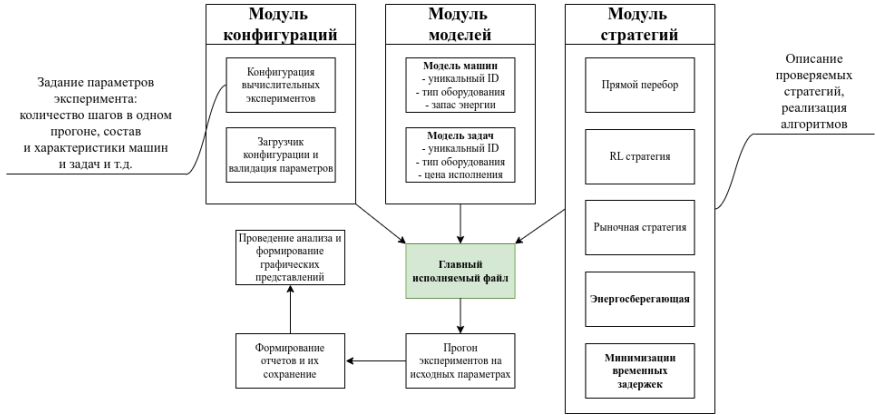


Рисунок 6 — Модульная структура программного средства СМК-НТТС

каждый эксперимент проводился с N независимыми прогонами на идентичных исходных данных. В качестве ключевых метрик использовались: количество выполненных задач, суммарные энергозатраты, общее время выполнения, средние и медианные значения, а также коэффициент Джини $G(x)$ для количественной оценки справедливости распределения нагрузки:

$$G(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |x_i - x_j|}{2N \sum_{i=1}^N x_i}. \quad (10)$$

где $G(x)$ – коэффициент Джини; $x = (x_1, \dots, x_N)$ – вектор распределения ресурса (нагрузки) между N машинами; x_i и x_j – значения нагрузки (например, количества выполненных задач или затраченной энергии) i -й и j -й РНТТМ соответственно; N – количество РНТТМ в комплексе.

Таким образом, разработанная имитационная модель многозадачной децентрализованной координации комплекса РНТТМ позволила провести вычислительные эксперименты, используя следующие принципы теории:

- **контролируемые сценарии** – три уровня ресурсного обеспечения (дефицит, равновесие, избыток);
- **многократные повторения** – каждая стратегия прогоняется $R = 30$ раз в каждом сценарии;
- **закон больших чисел** – выборочные средние метрик сходятся к истинному математическому ожиданию при увеличении числа прогонов;
- **коэффициент Джини $G(x)$** – для количественной оценки справедливости распределения нагрузки между машинами;
- **анализ чувствительности** – варьирование стоимости машино-часа $C_{мч}$ в диапазоне 500-5000 руб./ч для оценки устойчивости экономических

показателей.

Вычислительные эксперименты проведены для двух конфигураций, сформированных на основе данных проектов организации строительства современных автодорог М-11 и М-12:

- *типовой комплекс* – 15 РНТТМ (экскаваторы, бульдозеры, автогрейдеры, катки, асфальтоукладчик, фреза, автогудронатор, буровая машина, автокран), соответствующий специализированному комплексу по возведению земляного полотна и устройству дорожной одежды;

- *парк машин* – 100 РНТТМ, отражающий суммарный парк техники для нескольких технологических потоков при строительстве скоростной автомобильной дороги (перечень приведен в тексте работы).

Основные результаты:

- в сценарии дефицита ресурсов (рис. 7 и 8) энергосберегающая стратегия $\Gamma_{\min \exists}$ выполнила 51,6 % задач (типовой комплекс) и 50,5 % (парк машин), что в 1,4–1,5 раза превышает показатели сравнительных методов (36,2 % и 37,7 % соответственно);

- в равновесном и избыточном сценариях $\Gamma_{\min \exists}$ также демонстрирует наилучшие или сопоставимые с лучшими результаты, обеспечивая при этом максимальную энергоэффективность (минимальные затраты на задачу);

- стратегия $\Gamma_{\min \exists}$ обладает наилучшим балансом между эффективностью и скоростью выполнения: ее время работы значительно ниже, чем у Q-обучения, и сопоставимо с рыночными методами;

- анализ коэффициента $G(x)$ подтвердил, что энергосберегающая стратегия обеспечивает не только высокую производительность, но и статистически справедливое распределение нагрузки между машинами. Интегральная оценка эффективности, рассчитанная как:

$$Q(\Gamma) = \alpha_1 \tilde{P}(\Gamma) + \alpha_2 \tilde{\eta}(\Gamma) + \alpha_3 (1 - \tilde{T}(\Gamma)) + \alpha_4 (1 - G^{\text{задачи}}) + \alpha_5 (1 - G^{\text{энергии}}), \quad (11)$$

где $Q(\Gamma)$ – интегральная оценка эффективности стратегии Γ ; $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ – весовые коэффициенты, удовлетворяющие условию $\sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1$; $\tilde{P}(\Gamma)$ – нормализованное значение процента выполнения задач; $\tilde{\eta}(\Gamma)$ – нормализованный коэффициент энергоэффективности; $\tilde{T}(\Gamma)$ – нормализованное общее время выполнения; $G^{\text{задачи}}$ и $G^{\text{энергии}}$ – коэффициенты Джини для распределения количества задач и энергозатрат соответственно. Интегральная оценка составила $Q = 0,84$ для $\Gamma_{\min \exists}$ против 0,52–0,79 у других методов.

Практическое внедрение стратегии $\Gamma_{\min \exists}$ подтвердило основные тенденции, предсказанные теоретической моделью. Согласно актам внедрения,

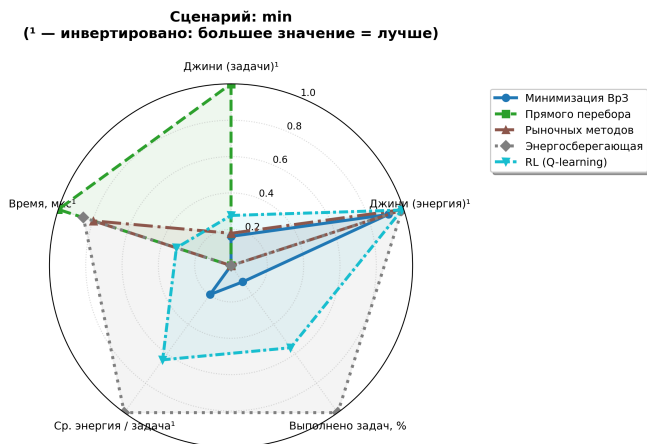


Рисунок 7 — Круговая диаграмма значений дефицитного сценария эксперимента для типового комплекса РНТТМ

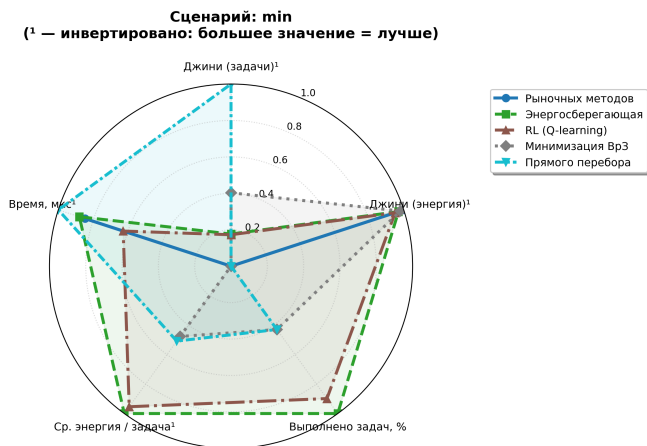


Рисунок 8 — Круговая диаграмма значений дефицитного сценария эксперимента для парка РНТТМ

применение разработанных алгоритмов обеспечило:

- рост производительности комплекса РНТТМ на 11,2-13,1 %;
- сокращение общего времени выполнения операций на 8,7-9,1 %;
- повышение энергоэффективности (снижение удельных энергозатрат) на 11,8-12,3 %;
- уменьшение времени простоев оборудования на 8,2-9,1 %.

Ожидаемый экономический эффект формируется преимущественно за счет экономии машино-часов. При годовом фонде времени эксплуатации комплекса из 10 машин $T_{\text{год}} = 20\,000$ машино-часов и подтвержденной экономии времени 8,9% годовая экономия составляет $\Delta T_{\text{год}} = 1\,780$ машино-часов. При консервативной оценке стоимости машино-часа $C_{\text{мч}} = 1\,500$ руб./ч годовая экономический эффект равен:

$$E_{\text{год}} = \Delta T_{\text{год}} \cdot C_{\text{мч}} = 1\,780 \cdot 1\,500 = 2,67 \text{ млн руб.} \quad (12)$$

где $E_{\text{год}}$ – годовой экономический эффект, млн руб.; $\Delta T_{\text{год}}$ – годовая экономия времени эксплуатации, машино-ч; $C_{\text{мч}}$ – стоимость одного машино-часа, руб./ч.

Капитальные затраты на внедрение (адаптация программного обеспечения, обучение персонала) оценены в $K = 4,5$ млн руб. Срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E_{\text{год}}} = \frac{4,5}{2,67} \approx 1,7 \text{ года.} \quad (13)$$

где $T_{\text{ок}}$ – срок окупаемости капитальных вложений, лет; K – капитальные затраты на внедрение, млн руб.; $E_{\text{год}}$ – годовой экономический эффект, млн руб.

Проведен анализ чувствительности для различных значений $C_{\text{мч}}$ (от 500 до 5 000 руб./ч), подтвердивший инвестиционную привлекательность разработки во всем диапазоне, характерном для дорожно-строительной и специальной техники.

Качественные преимущества внедрения стратегии Γ_{min} включают: повышение отказоустойчивости системы за счет децентрализованной архитектуры, снижение влияния человеческого фактора, адаптивность к изменению состава задач и внешних условий.

Рассмотрены и систематизированы потенциальные риски (технические, организационные, эксплуатационные, экономические) и предложены меры их минимизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Проведен системный анализ методов автоматизации рабочих процессов наземных транспортно-технологических машин, на основе которого сформулирована формальная постановка задачи многозадачной координации комплекса роботизированных НТТМ. Обоснована целесообразность применения децентрализованного подхода на основе теории игр, позволяющего каждой машине автономно принимать решения и минимизировать объем обмена служебной информацией.

2. Разработана оригинальная имитационная модель многозадачной координации, отличающаяся от известных учетом динамики изменения

энергетического ресурса каждой машины E_i , сложности задач Θ_{T_j} и их временных приоритетов. Модель формализована как байесовская координационная игра на связном графе взаимодействий $G = ([N], \mathcal{E})$, для которой доказано существование равновесий Нэша, зависящих от структуры взаимодействия и соотношения сложностей задач.

3. Впервые предложены две новые стратегии децентрализованного выбора задач (*энергосберегающая стратегия* $\Gamma_{\min \Theta}$ и *стратегия минимизации временных задержек* $\Gamma_{\min B3}$) и по ним разработаны соответствующие алгоритмы.

4. Создан программный комплекс на языке Go, реализующий предложенные стратегии, позволяющий проводить многовариантное моделирование работы комплекса РНТТМ в контролируемых условиях. В ходе вычислительных экспериментов на двух конфигурациях в трех сценариях ресурсного обеспечения установлено:

- энергосберегающая стратегия $\Gamma_{\min \Theta}$ обеспечивает наилучшее соотношение «выполненные задачи / потраченная энергия» во всех сценариях;
- в условиях жесткого дефицита энергии $\Gamma_{\min \Theta}$ выполняет больше задач для разнородных комплексов, чем лучший из аналогов;
- анализ коэффициента Джини подтвердил, что стратегия $\Gamma_{\min \Theta}$ обеспечивает не только высокую производительность, но и статистически справедливое распределение нагрузки между машинами.

Согласно актам внедрения, применение разработанных алгоритмов обеспечило:

- рост производительности комплекса РНТТМ на 11,2-13,1 %;
- сокращение общего времени выполнения операций на 8,7-9,1 %;
- повышение энергоэффективности (снижение удельных энергозатрат) на 11,8-12,3 %;
- уменьшение времени простоев оборудования на 8,2-9,1 %.

5. Выполнена комплексная оценка технико-экономической эффективности внедрения разработанных алгоритмов. Для типового комплекса из 10 машин годовой экономический эффект за счет сокращения времени выполнения операций составляет 2,67 млн руб. при сроке окупаемости капитальных затрат 1,7 года. Результаты работы апробированы в АО «Петербург-Дорсервис» и парках машин Министерства обороны Российской Федерации, что подтверждено соответствующими актами.

Таким образом, решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин за счет разработки имитационной модели и алгоритмов децентрализованной многозадачной координации, что полностью соответствует поставленной цели и подтверждает выдвинутую гипотезу исследования.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. *Соловьев, В. В.* Модель системы многозадачной координации автоматизированных транспортно-технологических средств [Текст] / В. В. Соловьев, С. А. Евтюков // Грузовик. — 2023. — № 7. — С. 36—39. — (0,39 п. л.; ВАК).
2. *Соловьев, В. В.* Общие стратегии выбора задач в группе роботизированных наземных транспортно-технологических средств (машин) [Текст] / В. В. Соловьев, С. А. Евтюков // Грузовик. — 2025. — № 10. — С. 33—37. — (0,42 п. л.; ВАК).
3. *Соловьев, В. В.* Методика оценки равномерности нагрузки в комплексе роботизированных наземных транспортно-технологических машин [Текст] / В. В. Соловьев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2026. — № 38. — С. 58—64. — (0,52 п. л.; ВАК).

Программы для ЭВМ, имеющие государственную регистрацию

4. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Симулятор многозадачной координации групп роботизированных наземных транспортно-технологических средств (СМК-НТТС) / В. В. Соловьев ; Роспатент. — № 2025690320 ; заявл. 06.10.2025 ; опубл. 06.11.2025, 2025686591 (Рос. Федерация).
5. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Анализатор эффективности стратегий координации для групп роботизированных наземных транспортно-технологических машин (АЭСК-НТТМ) / В. В. Соловьев, С. А. Евтюков, С. М. Грушецкий ; Роспатент. — № 2026612518 ; заявл. 28.01.2026 ; опубл. 23.01.2026, 2026611281 (Рос. Федерация).

В прочих изданиях

6. *Соловьев, В. В.* Подсистема связи как техническая основа автоматизированной системы управления наземным транспортно-технологическим средством [Текст] / В. В. Соловьев, С. А. Евтюков // АгроЭкоИнженерия. — 2026. — № 1. — С. 46—58. — (0,48 п. л.; ВАК).
7. *Соловьев, В. В.* Анализ средств машинного видения окружающего мира [Текст] / В. В. Соловьев // Сборник материалов 28-ой Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Москва, 2024. — С. 505—508.
8. *Соловьев, В. В.* Координация распределения задач на основе гиперграфов для автоматизированных наземных транспортно-технологических средств [Текст] / В. В. Соловьев // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: Материалы XVI Международной конференции, посвященной памяти доктора технических наук,

профессора Кравченко Павла Александровича. — Санкт-Петербург, 2024. — С. 115—119.

9. *Соловьев, В. В.* Программное обеспечение автоматизированного наземного транспортно-технологического средства [Текст] / В. В. Соловьев // «Мехатроника, автоматика и робототехника». — 2025. — Т. 15. — С. 25—29.
10. *Соловьев, В. В.* Исполнительная подсистема автоматизированного наземного транспортно-технологического средства [Текст] / В. В. Соловьев // Сборник материалов 29-ой Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Москва, 2025. — С. 59—62.
11. *Соловьев, В. В.* Методика оценки равномерности нагрузки в комплексе роботизированных наземных транспортно-технологических машин [Текст] / В. В. Соловьев // «ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2026»: сборник докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию НИУ МГСУ. — Москва, 2026. — С. 207—209.
12. *Соловьев, В. В.* Идентификация нарушителей безопасности информации в инфокоммуникационных системах на основе искусственных нейронных сетей [Текст] / В. В. Соловьев, В. С. Авраменко, Д. И. Бобрешов-Шишов // Региональная информатика «РИ-2016». — Санкт-Петербург, 2016. — С. 54.

Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 08.10.2026. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз.

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

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