ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента Загороднего Николая Александровича на диссертационную работу Соловьева Виктора Владимировича «Моделирование и алгоритмы децентрализованной многозадачной координации комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Актуальность темы исследования

Тема, выбранная В. В. Соловьевым, сегодня особенно востребована. Строительная отрасль переживает активную фазу роботизации, и на смену автоматизации отдельных машин приходит задача управления их совместной работой. Речь идет о создании систем, которые позволяют группе машин действовать согласованно, без постоянного вмешательства человека. Это напрямую влияет на производительность, себестоимость и сроки строительства.

Строительная площадка - среда сложная: высокая динамика, случайные факторы, ограничения по энергии и жесткие технологические требования. Традиционные централизованные схемы планирования здесь часто пробуксовывают: они медленно адаптируются и требуют больших вычислительных ресурсов. Поэтому переход к децентрализованным многозадачным алгоритмам выглядит не просто модным трендом, а насущной необходимостью.

Автор диссертации справедливо рассматривает группу роботизированных наземных транспортно-технологических машин (РНТТМ) как единый технологический комплекс. Координация в таком комплексе - это функция системы управления, которая распределяет и синхронизирует рабочие процессы. Такой взгляд придает работе и научную, и практическую ценность.

Актуальность подтверждается и на уровне государственных документов: Указ Президента РФ № 309 от 07.05.2024, Указ № 145 от 28.02.2024, Постановление Правительства РФ № 614 от 17.05.2024, Распоряжение Правительства РФ № 3883-р от 27.12.2021. Все они задают ориентиры цифровизации строительства и роботизации производственных процессов, что напрямую перекликается с задачами диссертации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Уровень обоснованности в диссертации высокий. Он опирается на решение поставленных задач и солидный объем исследований.

Работа построена на анализе реальных проектов строительства скоростных дорог М-11 «Москва - Санкт-Петербург» и М-12 «Москва -

Нижний Новгород - Казань». На основе ведомостей потребности в машинах автор выделил типовые технологические комплексы: подготовительные работы, земляные работы, устройство дорожной одежды, строительство искусственных сооружений, переустройство коммуникаций и вспомогательный транспорт. Это дало репрезентативные наборы машин и задач для имитационного моделирования.

Методы исследования выбраны корректно: системный анализ, математическое моделирование, теория вероятностей, теория игр, программирование, статистика и численные методы. В вычислительных экспериментах использованы элементы теории эксперимента - контролируемые сценарии ресурсного обеспечения, многократные прогоны, закон больших чисел, коэффициент Джини для оценки равномерности нагрузки, анализ чувствительности экономических показателей.

Достоверность результатов подтверждается серией экспериментов с многократными прогонами алгоритмов в разных сценариях, моделирующих реальную эксплуатацию. Статистическая значимость обеспечена методами математической статистики. Полученные данные показывают устойчивое преимущество энергосберегающей стратегии по количеству выполненных задач, энергоэффективности и времени выполнения по сравнению с аналогами.

Автор проверил алгоритмы на двух конфигурациях: типовой комплекс для возведения земляного полотна и устройства дорожной одежды, а также парк машин, соответствующий нескольким технологическим потокам при строительстве скоростной дороги. Это говорит о достаточной обоснованности и практической направленности.

Достоверность и научная новизна положений, сформулированных в диссертации

Достоверность положений, выносимых на защиту, подтверждена апробацией на международных и всероссийских конференциях, а также внедрением разработок в практику.

Основные результаты докладывались на 28-й Московской международной межвузовской конференции «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы» (МГТУ им. Баумана, 2024), XVI Международной конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» (СПбГАСУ, 2024), XXXVIII Национальной конференции «Эксплуатация и сервис автомобилей, тракторов и двигателей» (СПбГАУ, 2025), 29-й Московской межвузовской конференции (МГТУ им. Баумана, 2025), VII Международной конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника» (НИЦ МС, 2025), VII Международной конференции «ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2026» (НИУ МГСУ, 2026), а также на семинарах кафедры наземных транспортно-технологических средств и комплексов СПбГАСУ.

По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 3 - в изданиях из перечня ВАК; получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Общий объем - 3,19 п.л. (все авторские). Публикации достаточно полно отражают содержание, а результаты прошли широкую апробацию.

Научная новизна положений, сформулированных в диссертации

Во-первых, разработана имитационная модель многозадачной координации комплекса РНТТМ, которая учитывает энергоограниченность и неоднородность оборудования. От известных моделей ее отличает динамика энергоресурса каждой машины, сложность задач и их временные приоритеты, а также формализация в виде байесовской координационной игры на связном графе взаимодействий.

Во-вторых, впервые предложены алгоритмы децентрализованной координации - энергосберегающая стратегия и стратегия минимизации временных задержек. Они основаны на адаптации методов теории игр к выбору задач в комплексе РНТТМ в условиях стохастической постановки. В энергосберегающей стратегии функция полезности учитывает отношение сложности задачи к текущему запасу энергии машины, что позволяет каждой машине автономно снижать энергозатраты. В стратегии минимизации задержек введена динамика времени ожидания задачи, описываемая экспоненциальной зависимостью.

В-третьих, установлены закономерности влияния энергетических ограничений и неоднородности оснащения РНТТМ на равномерность распределения нагрузки и эффективность децентрализованной координации. Показано, что предложенные алгоритмы обеспечивают статистически справедливое распределение нагрузки, что подтверждается анализом коэффициента Джини.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертации

Научная значимость работы состоит в развитии методологии децентрализованного управления комплексами РНТТМ. Впервые она ориентирована на строительные машины с учетом их энергетических и технологических ограничений. Предложенный подход расширяет методологию многозадачной координации, перенося акцент с универсальных роботизированных платформ на специализированные комплексы строительных машин.

Практическая значимость подтверждена актами внедрения. Применение алгоритмов дало:

- 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 %.

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. Анализ чувствительности к стоимости машино-часа подтвердил инвестиционную привлекательность разработки во всем диапазоне, характерном для дорожно-строительной и специальной техники.

Результаты апробированы в АО «Петербург-Дорсервис» и парках машин Министерства обороны РФ, что подтверждено актами. Кроме того, они внедрены в учебные программы СПбГАСУ по направлениям 23.04.02, 23.04.03, 23.05.01.

Общая оценка структуры и содержания диссертации

Структура диссертации соответствует нормативным требованиям и паспорту специальности 2.5.11. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений. Объем - 234 страницы, включая 42 рисунка и 29 таблиц. Список литературы содержит 122 наименования.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет, рабочая гипотеза, научная новизна, практическая значимость, методология, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и публикациях.

В первой главе проанализированы известные подходы к координации комплекса РНТТМ и методы автоматизации рабочих процессов. РНТТМ рассматриваются как высокоавтоматизированные дорожно-строительные машины по ГОСТ Р 71615-2024, функционирующие на уровнях УА2-УА5. Рассмотрены технические предпосылки децентрализованной координации, включая подсистемы сбора данных, позиционирования, локализации, исполнительную подсистему, а также подсистему планирования и управления. Выполнены обзор и классификация исследований в области группового управления и распределения задач, на основе чего сформулированы цели и задачи работы.

Во второй главе на основе данных реальных проектов М-11 и М-12 проведена систематизация комплексов НТТМ по технологическому назначению. Сформированы репрезентативные множества машин и задач. Разработана имитационная модель многозадачной координации, учитывающая энергетические ограничения, неоднородность оборудования и стохастическую природу потока задач. Предложены две новые стратегии децентрализованного выбора задач, формализованные на основе теории игр. Приведено математическое обоснование, доказано существование байесовских равновесий Нэша, оценена вычислительная сложность.

В третьей главе описана программная реализация алгоритмов на языке Go, создан программный комплекс для вычислительных экспериментов. Разработана методика экспериментов с тремя сценариями ресурсного обеспечения: дефицитным, равновесным и избыточным. Проведен сравнительный анализ предложенных стратегий с известными подходами (прямой перебор, рыночные методы, обучение с подкреплением) на типовом

комплексе и парке РНТТМ. Индивидуальные характеристики машин и требования задач формализованы и влияют на функцию полезности. Для оценки справедливости распределения задач использован коэффициент Джини. Предложена методика натурного эксперимента для верификации алгоритмов.

В четвертой главе выполнен анализ технико-экономических показателей внедрения на основе синтеза результатов имитационного моделирования и данных актов внедрения. Рассчитан ожидаемый годовой экономический эффект и срок окупаемости, оценена инвестиционная привлекательность. Проведен анализ чувствительности к стоимости машино-часа, рассмотрены риски внедрения и меры по их минимизации.

В приложениях приведены сводные данные экспериментов, исходный код программ, копии свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и актов внедрения.

Соответствие диссертации и автореферата установленным требованиям

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ВАК РФ и паспорту специальности 2.5.11:

- пункт 3 «Экспериментальные исследования и испытания транспортно-технологических средств и их комплексов, а также отдельных систем, агрегатов, узлов, деталей и технологического оборудования»;
- пункт 6 «Оптимизация конструкций и синтез законов управления движением наземных транспортно-технологических средств и их комплексов, а также их отдельных функциональных узлов, механизмов и систем, направленные на улучшение экономичности, надежности, производительности, экологичности и эргономичности, технологической производительности, обеспечение энергоэффективности и безопасности».

Работа отвечает критериям актуальности, научной новизны, теоретической и практической значимости, достоверности результатов. Значимость подтверждена актами внедрения. Автореферат в полной мере отражает структуру и содержание диссертации, основные положения изложены достаточно полно. Соответствие установленным требованиям подтверждает общую высокую оценку исследования.

Замечания и недостатки

Оценивая диссертацию в целом как завершенное исследование высокого уровня, следует сделать несколько уточняющих замечаний, которые носят дискуссионный характер и не влияют на защищаемые положения.

1. Обоснование вида распределений. В модели принято, что поток задач описывается пуассоновским процессом, а сложность каждой задачи - усеченным нормальным распределением (с. 13 автореферата). При этом не поясняется, на основании каких статистических данных о реальных строительных процессах выбраны именно эти законы и как оценивались их

параметры. Было бы полезно привести хотя бы краткое обоснование или сослаться на источники.

2. Скорость восстановления энергоресурса. В формуле (1) фигурирует величина r, описывающая восстановление запаса энергии i-й машины. Не уточнено, как эта величина задается (постоянной, зависящей от типа машины, от режима работы) и учитывает ли она реальные сценарии дозаправки или подзарядки на площадке.

3. Выбор параметров ресурсных сценариев. Три сценария - дефицитный, равновесный и избыточный - заданы соотношениями (с. 20 автореферата). Коэффициенты 0,5 и 2 выглядят достаточно условными; хотелось бы увидеть их привязку к реальным условиям эксплуатации комплексов РНТТМ.

4. Вид зависимости времени ожидания задачи. В выражении (6) время ожидания задачи нарастает экспоненциально. Не пояснено, чем обусловлен именно экспоненциальный, а не линейный или иной характер роста, и как выбирается коэффициент λ.

5. Весовые коэффициенты интегральной оценки. В интегральном показателе Q(Г) (формула 11) используются веса $\alpha_1 \ldots \alpha_5$. Из автореферата не ясно, как эти веса назначались - экспертно, по результатам предварительных экспериментов или иным способом; не показано также, насколько результат итогового рейтинга стратегий чувствителен к их выбору.

6. Обозначение совместимости оборудования. В условии доступности задачи (формула 2) используется запись $Eq \succeq Req$, означающая, что набор оборудования машины удовлетворяет требованиям задачи. Хотелось бы более строгого пояснения, что именно понимается под отношением $\succeq$ для наборов навесного оборудования (покрытие по типам, по мощности, по совокупности характеристик).

7. Параметры обучения сравнительной стратегии. Среди стратегий сравнения упоминается Q-обучение (RL, Q-learning). В автореферате не приведены ключевые гиперпараметры этого метода (скорость обучения, коэффициент дисконтирования, стратегия исследования), что затрудняет воспроизводимость сравнения.

8. Число независимых прогонов. Для обеспечения статистической достоверности каждая стратегия прогонялась $R = 30$ раз в каждом сценарии (с. 21 автореферата). Обоснование именно такого количества прогонов (например, по достижению требуемой ширины доверительного интервала) в тексте не приводится.

9. Сопряжение с существующими системами диспетчеризации. В автореферате не отражено, каким образом предлагаемые децентрализованные алгоритмы встраиваются в уже действующие на строительных объектах системы диспетчеризации и мониторинга техники (например, ГЛОНАСС/GPS-платформы, телематические сервисы подрядчиков).

Приведенные замечания касаются частных вопросов изложения и параметризации модели, не затрагивают научной новизны и практической

ценности диссертации и не снижают ее общей высокой оценки. Они могут быть учтены автором в дальнейшей научной работе.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа «Моделирование и алгоритмы децентрализованной многозадачной координации комплекса роботизированных наземных транспортно-технологических машин», выполненная Соловьевым Виктором Владимировичем и представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы, является завершенным научным трудом, содержащим решение научной задачи, имеющей важное значение для развития строительной и дорожной отраслей.

Диссертация отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Соловьев Виктор Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы.

Официальный оппонент:
Доктор технических наук, доцент, директор транспортно-технологического института ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород

_____ Загородний Николай Александрович

диссертация защищена по специальности 2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта, 2025 г. 29. 10. 2026

Адрес организации: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова».
тел.: +7(4722) 54-20-87,
e-mail: rector@intbel.ru

Подпись Загороднего Н.А. заверяю.
Проректор по цифровой трансформации и образовательной деятельности, д.т.н., профессор БГТУ им. В.Г. Шухова

_____ И.А. Новиков 29. 10. 2026