2026
Санкт-Петербург

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Сборник трудов Международной научно-практической конференции

ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт машиностроения, материалов и транспорта

Сборник трудов

VI Международной научно-практической конференции

«Транспортные системы»

19 – 22 октября 2026 года

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, 2026

УДК 656+625

ББК 39

Сборник трудов VI международной научно-практической конференции «Транспортные системы». – Под редакцией д-ра техн. наук, профессора Д. В. Ефанова, Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 331 с. – ISBN ???.

Proceedings of the VI international scientific and practical conference “Transport systems”. – Edited by D.Sc. in Engineering, Professor Dmitry V. Efanov, St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 331 p. – ISBN ???.

Рецензенты

Попович А. А. – докт. техн. наук, профессор, директор Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Стажков С. М. – докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Системы приводов, мехатроника и робототехника» Балтийского государственного технического университета им. Д. Ф. Устинова

Хаджимухаметова М. А. – докт. техн. наук, профессор, начальник отдела учебно-методической работы заочного и дистанционного обучения Ташкентского государственного транспортного университета

Сборник материалов конференции включает в себя научные статьи участников VI Международной научно-практической конференции «Транспортные системы», которая ежегодно проводится Высшей школой транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Представленные в издании материалы позволяют отследить некоторые тенденции развития транспортной отрасли в последние годы. Среди тем обсуждения – интеллектуальные транспортные системы, методы синтеза устройств и систем управления на транспорте, наземные транспортно-технологические средства и комплексы, новые материалы и технологии для транспортных систем, цифровые технологии и моделирование транспортных систем, транспортная логистика и управление цепями поставок, цифровая экономика. Представленные материалы отражают позиции авторов в транспортной отрасли и ориентированы на формирование новых подходов в работе с транспортными системами.

Программный комитет конференции

Председатель	
Ефанов Д. В.	д.т.н., проф., и. о. директора Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта и профессор Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Сопредседатели	
Грачев А. А.	к.т.н., доц., директор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Плотников Д. Г.	к.т.н., доцент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Ученый секретарь конференции	
Елина Е. И.	аспирант Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта, ассистент Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, Россия
Технические специалисты	
Астапенкова А. А.	младший научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, Россия
Орешкина А. Д.	младший научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, Россия

Члены программного комитета

Абдуллаев Р. Б.	к.т.н., доц., доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Ташкентского государственного транспортного университета, Узбекистан
Антонов А. А.	к.т.н., доц., заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта, Москва, Россия
Арсеньев Д. Г.	д.т.н., проф., член-корреспондент РАН, директор Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности, проректор по международной деятельности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Баратов Д. Х.	д.т.н., проф., проректор по работе с молодежью Ташкентского государственного транспортного университета, Узбекистан
Барыкин С. Е.	д.э.н., проф., профессор Высшей школы сервиса и торговли Института промышленного менеджмента, экономики и торговли Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Болсуновская М. В.	к.т.н., доц., заведующий лабораторией «Промышленные системы потоковой обработки данных» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Болтаев С. Т.	к.т.н., доц., заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика» Ташкентского государственного транспортного университета, Узбекистан
Брановицкий А. М.	к.т.н., заведующий кафедрой «Автомобильные дороги» Белорусско-Российского университета, Могилев, Беларусь
Ван Циншэн	д.т.н., ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Конструкционные и функциональные материалы» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия; директор NEMTRI/ETRI, Ханчжоу, Китай
Горев А. Э.	д.э.н., проф., профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Добрецов Р. Ю.	д.т.н., доц., профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Досенко В. А.	президент Международной академии транспорта, Москва, Россия
Кашталинский А. С.	к.т.н., доцент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Кудрявцева Т. Ю.	д.э.н., доц., профессор Высшей инженерно-экономической школы Института промышленного менеджмента, экономики и торговли

	Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Лазарев Ю. Г.	д.т.н., проф., директор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Лесковец И. В.	к.т.н., доц., заведующий кафедрой «Транспортные и технологические машины» Белорусско-Российского университета, Могилев, Беларусь
Матросова А. Ю.	д.т.н., проф., профессор кафедры компьютерной безопасности Томского государственного университета, Россия
Никищенков С. А.	д.т.н., проф., профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Приволжского государственного университета путей сообщения, Самара, Россия
Осадчий Г. В.	к.т.н., доцент Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, старший научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, Россия
Пивоваров Д. В.	к.т.н., доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, доцент Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, старший научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, Россия
Попов А. Н.	к.т.н., доц., доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия
Потехин В. В.	к.т.н., доц., доцент Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Соколов С. А.	д.т.н., проф., профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Схведиани А. Е.	к.э.н., доцент Высшей инженерно-экономической школы Института промышленного менеджмента, экономики и торговли Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Россия
Тарасов Е. М.	д.т.н., проф., заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Приволжского государственного университета путей сообщения, Самара, Россия

Предисловие

Транспорт в экономике страны занимает важнейшую позицию, позволяя эффективно организовывать логистические коридоры между ключевыми производственными центрами, точками назначения, населенными пунктами. Сохранение таких свойств транспортных систем, как надежность и безопасность, является принципиальным с точки зрения их развития и совершенствования. Все основные проекты современности направлены на сокращение времени следования при повышении скоростей перемещения грузов и пассажиров, что требует ответной реакции конструкторов, разработчиков, исследователей и специалистов в транспортной сфере. Именно данным аспектам и посвящены основные исследования ученых-транспортников!

Представленная читателю работа – это сборник трудов VI Международной научно-практической конференции «Транспортные системы», проводимой Высшей школой транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого совместно с Белорусско-Российским университетом (Могилев, Республика Беларусь). Конференция традиционно охватывает основные труды специалистов Союзного государства в сфере транспортных систем, а читатель сможет найти на страницах сборника статьи молодых ученых и признанных специалистов на такие важные и актуальные темы, как интеллектуальные транспортные системы, методы синтеза устройств и систем управления на транспорте, наземные транспортно-технологические средства и комплексы, новые материалы и технологии для транспортных систем, цифровые технологии и моделирование транспортных систем, транспортная логистика и управление цепями поставок, цифровая экономика. Тематика конференции поистине охватывает широчайший круг вопросов в транспортной отрасли, что делает ее уникальной среди подобных мероприятий!

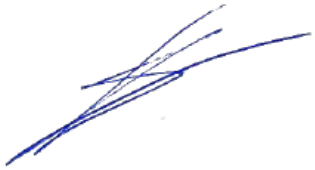
Несомненно, работа конференции оказывает значительное влияние на обмен опытом участников и на формирование основных направлений совершенствования транспортных систем. Это событие приобретает особую значимость ввиду необходимости движения экономики в сторону технологического суверенитета и иммунитета технологий. Участники конференции образуют сообщество опытных и молодых ученых, активно развивающих отрасль. В этом немаловажную роль играет и площадка для обмена знаниями

– Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого – центр науки Северо-Запада Российской Федерации!

Уверен, читатели настоящего сборника по достоинству оценят исследования и работы авторов и не только будут учитывать их при разработке объектов транспортной инфраструктуры, подвижного состава и транспортных средств, но и с удовольствием продолжат исследования в интересующих их областях науки и техники!

С уважением
к участникам, читателям и гостям,

председатель конференции,
д-р техн. наук, профессор, действительный член Международной академии транспорта, член Института инженеров электротехники и электроники,
и. о. директора Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта, профессор Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
Дмитрий Викторович Ефанов



Интеллектуальные транспортные системы

УДК 656.34:681.5
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-687

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НАЕЗДОВ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА

Андрей Евгеньевич Сорокин
СПб ГУП «Горэлектротранс»
Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Сызранская, 15
E-mail: Andrey.Sorokin@spbget.ru

Аннотация. Рассматривается задача количественной оценки безопасности системы автоматического управления трамвайным вагоном для предотвращения наездов на препятствия. Объектом исследования выбрана одна функция системы – обнаружение объекта и недопущение столкновения с ним. Предложен вероятностный подход, в рамках которого безопасность описывается совокупностью критериев: своевременностью обнаружения, устойчивостью сопровождения, достоверностью распознавания, точностью выбора режима торможения и устойчивостью к внешним дестабилизирующим факторам. Введено пространство состояний, учитывающее параметры препятствий, условия внешней среды, режимы движения вагона и воздействующие факторы. Показано, что интегральные оценки целесообразно получать усреднением частных вероятностных характеристик по функции распределения факторов. Предложенная методика ориентирована на применение при испытаниях, сертификации и обосновании требований к системе автоматического управления трамвайным вагоном для предотвращения наездов на препятствия.

Ключевые слова: трамвайный вагон; обнаружение препятствий; предотвращение наезда; вероятностные критерии; безопасность; функциональная безопасность; пространство состояний; дестабилизирующие факторы.

1. Введение

Безопасность городского рельсового транспорта остается одной из ключевых проблем современной транспортной инфраструктуры. Трамвайный вагон движется в условиях плотного транспортного потока, ограниченного обзора, переменной освещенности, атмосферных осадков и электромагнитных помех. В таких условиях возрастает роль автоматических систем, способных обнаруживать препятствия и своевременно инициировать торможение.

Существующие исследования в основном посвящены технической реализации таких систем: сенсорному обеспечению, алгоритмам

распознавания, архитектуре управления. Однако для подтверждения безопасности недостаточно качественных утверждений – необходимы измеримые вероятностные критерии, позволяющие нормировать требования и оценивать достигнутый уровень безопасности. Основой для формирования таких критериев являются стандарты ОСТ 32.17–92[1], ГОСТ Р 27.102-2021[2] и ГОСТ Р МЭК 61508–1–2012[3] в области функциональной безопасности и классические работы по теории надежности [1 – 4]. Фундаментальные вопросы синтеза безопасных систем управления на транспорте рассмотрены в работах [5, 6].

В работе рассматривается только одна целевая функция системы – обнаружение препятствия и предотвращение наезда на него. Вопросы резервирования, отказоустойчивости и перехода в защитное состояние в рамках данной методики не анализируются. Такой подход позволяет сосредоточиться на функциональных вероятностных свойствах системы автоматического управления трамвайным вагоном для предотвращения наездов на препятствия (САУТ ПНП).

2. Объект исследования и основные допущения

Объектом исследования является система обнаружения препятствий и предотвращения наездов, устанавливаемая на трамвайный вагон. Предполагается, что система функционирует в реальных условиях эксплуатации и должна обеспечивать:

– обнаружение препятствия в зоне видимости;

– устойчивое сопровождение объекта;

– достоверное распознавание истинных и ложных препятствий;

– выбор безопасного замедления;

– сохранение работоспособности при воздействии внешних дестабилизирующих факторов.

Требования к таким системам формируются с учетом отечественных и международных стандартов. Практические аспекты применения систем активной безопасности на городском трамвае рассмотрены в работе [7], где показано снижение числа сходов вагонов с рельсов, падений пассажиров и

[1] ОСТ 32.17–92. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1992.

[2] ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021.

[3] ГОСТ Р МЭК 61508–1–2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. – М.: Стандартинформ, 2013.

наездов на пешеходов. Вопросы динамики торможения трамвая при срабатывании автоматической системы предотвращения столкновений исследованы в работе [8].

Зона видимого обнаружения определяется как область пространства, в пределах которой система способна обнаруживать препятствия в заданных условиях. Ошибка первого рода означает пропуск реального препятствия, ошибка второго рода – ложное обнаружение. Под безопасным режимом торможения понимается выбор такого замедления, которое исключает столкновение либо минимизирует тяжесть удара при допустимом для пассажиров ускорении.

3. Пространство факторов и функция распределения

Для формального описания условий функционирования введем пространство факторов θ:

$$\theta = \theta_{пр}\theta_{вн}\theta_{дв}\theta_{дест}, \quad (1)$$

где $\theta_{пр}$ – множество параметров препятствий; $\theta_{вн}$ – множество внешних условий; $\theta_{дв}$ – множество режимов движения трамвайного вагона; $\theta_{дест}$ – множество дестабилизирующих факторов.

На пространстве θ задана функция распределения $F(\theta)$, описывающая частоту встречаемости различных сочетаний условий в реальной эксплуатации. Это позволяет перейти от частных оценок, полученных для фиксированных условий, к интегральным показателям безопасности. Формальные методы моделирования и верификации функциональности электронных систем управления городским рельсовым транспортом рассмотрены в работе [9].

Множество параметров препятствий описывается вектором $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, где x_1 – габаритный размер препятствия, x_2 – расстояние до препятствия, x_3 – скорость движения препятствия, x_4 – траектория движения (угол, направление) препятствия. Внешние условия задаются вектором $y = (y_1, y_2)$, где y_1 – уровень освещенности, y_2 – погодные условия. Режимы движения вагона описываются вектором $z = (z_1, z_2)$, где z_1 – скорость вагона, z_2 – геометрия пути. Дестабилизирующие факторы образуют вектор $q = (q_1, q_2, q_3, q_4)$, включающий напряженность электромагнитного поля, температуру, вибрацию и влажность.

4. Вероятностные критерии безопасности

4.1. Своевременность обнаружения

Под своевременностью понимается способность системы обнаружить препятствие за время, не превышающее нормативное. Введем случайную величину $\tau_{захв}$ – время от появления препятствия в зоне видимости до выдачи управляющего сигнала. Критерий имеет вид:

$$P_{захв} = P\left\{\tau_{захв} \le \tau_{норм}\right\} = \int_0^{\tau_{норм}} f_\tau(\tau)d\tau, \quad (2)$$

где $f_\tau(\tau)$ – плотность распределения времени захвата; $\tau_{норм}$ – максимально допустимое время захвата, определяемое из условий безопасности. При испытаниях оценка вычисляется как:

$$P_{захв} = \frac{m}{N}, \quad (3)$$

где m – число случаев, когда время захвата не превысило норму; N – общее число испытаний. Методы оценки вероятностных характеристик изложены в работах [1, 2].

4.2. Устойчивость сопровождения

Устойчивость сопровождения характеризует способность системы удерживать обнаруженный объект в течение времени, необходимого для безопасного торможения. Введем $\tau_{потери}$ – случайная величина, определяющая продолжительность удержания (сопровождения) препятствия после захвата. Критерий:

$$P_{уд} = P\left\{\tau_{потери} > \tau_{тр}\right\}, \quad (4)$$

где $\tau_{тр}$ – требуемое время сопровождения препятствия. Статистическая оценка $P_{уд}$ вычисляется аналогично формуле (3).

Методы статистического анализа последовательностей событий приведены в работе [3]. Практические аспекты устойчивости сопровождения препятствий с использованием мультисенсорных алгоритмов рассмотрены в исследовании [10].

4.3. Достоверность обнаружения

Достоверность оценивается через вероятности исключения ошибок первого и второго рода. Под ошибкой первого рода понимается пропуск САУТ

ПНП реального препятствия (ложное спокойствие). А под ошибкой второго рода – ложное обнаружение САУТ ПНП препятствия (ложная тревога, ложное препятствие).

Для ошибки первого рода:

$$P_{ош1} = P\left\{N_{ош1}(T) = 0\right\}, \tag{5}$$

где $P_{ош1}$ – вероятность исключения ошибки первого рода; T – интервал времени (или пробега), за который оцениваются показатели; $N_{ош1}$ – случайное число возникновений ошибки первого рода за наработку T.

При пуассоновском потоке ошибок с интенсивностью $\lambda_{ош1}$ вероятность исключения ошибки первого рода:

$$P_{ош1} = e^{-\lambda_{ош1}T}. \tag{6}$$

Аналогично для ошибки второго рода:

$$P_{ош2} = P\left\{N_{ош2}(T) = 0\right\} = e^{-\lambda_{ош2}T}. \tag{7}$$

При испытаниях используются оценки вероятностей ошибки первого и второго рода, вычисляемые аналогично (3):

Теоретические основы надежности изложены в [4]. Современные подходы к минимизации ложных срабатываний и пропусков на основе данных от нескольких типов датчиков описаны в работах [10, 11].

4.4. Безопасность торможения

Критерий безопасности торможения отражает вероятность того, что ускорение торможения не превысит допустимого значения $\alpha_{доп}$. Введем событие «не превышение допустимого ускорения». Тогда вероятность не превышения допустимой величины ускорения торможения:

$$\begin{cases} P_{уск} = P\left\{N_{уск}(T) = 0\right\} = e^{-\lambda_{уск}T}, \\ P_{уск} = \dfrac{m}{N}, \end{cases} \tag{8}$$

где $P_{уск}$ – вероятность не превышения допустимой величины ускорения торможения; m – число испытаний без превышения $\alpha_{доп}$.

Исследования показывают, что для рельсовых транспортных средств безопасная дистанция торможения существенно зависит от сцепления колес с рельсами и динамических характеристик вагона [12].

4.5. Вероятность исключения столкновения

Этот показатель является итоговым и включает своевременность и достоверность. Вероятность исключения столкновения определяется как вероятность отсутствия столкновений на всем протяжении временного интервала T. В прикладных расчетах эта величина, как правило, выводится из более детальных показателей, однако допускается ее непосредственная оценка на основе статистических данных о реальных инцидентах либо по результатам имитационного моделирования.

Данный критерий вычисляется по формуле:

$$P_{ст} = P\left\{N_{ст}\left(T\right) = 0\right\} = e^{-\lambda_{ст}T}. \quad (9)$$

5. Интегральные оценки и уровни полноты безопасности

Интегральные показатели учитывают вариативность внешних условий. Общая формула уровня полноты безопасности:

$$P_{полн}^{(X)} = \int_{\theta} P(\theta)\, dF(\theta), \quad (10)$$

где X – критерий события; θ – пространство факторов; $F(\theta)$ – функция распределения факторов. Такой подход согласуется с положениями стандартов по функциональной безопасности [3] и методологией оценки безопасности, изложенной в работе [9].

Например, уровень полноты захвата:

$$P_{полн}^{захв} = \int_{\theta} P\left\{\tau_{захв}\left(\theta\right) \le \tau_{норм}\right\} dF\left(\theta\right). \quad (11)$$

Уровень полноты устойчивого ведения:

$$P_{полн}^{вед} = \int_{\theta} P\left\{\tau_{потери}\left(\theta\right) > \tau_{тр}\right\} dF\left(\theta\right). \quad (12)$$

Аналогично определяются уровни полноты отсутствия ошибок первого и второго рода, отсутствия столкновений и отсутствия превышения допустимого ускорения. Такие показатели позволяют получить обобщенную оценку системы, усредненную по всем возможным условиям эксплуатации. Архитектура системы принятия решений для автономного трамвая предложена в работе [11].

6. Устойчивость к дестабилизирующим факторам

Внешние дестабилизирующие факторы могут существенно снижать эффективность САУТ ПНП. К ним относятся электромагнитные помехи,

экстремальные температуры, вибрации, влажность, запыленность и обледенение. Для оценки устойчивости введем вектор $q \in \theta_{дест}$. Тогда показатель устойчивости:

$$P_{уст} = \int_{\theta_{дест}} P(q) dF_q(q), \tag{13}$$

где $F_q(q)$ – распределение дестабилизирующих факторов.

Данный показатель является частным случаем уровня полноты безопасности, в котором усреднение ведется только по дестабилизирующим факторам. Практические аспекты обеспечения устойчивости систем управления трамваем к внешним воздействиям рассмотрены в работах [7, 8].

7. Оценка параметров и статистическая интерпретация

Для редких событий целесообразно использовать экспоненциальное приближение с параметром λ (для невосстанавливаемых систем) или ω (для восстанавливаемых). Интенсивность опасного события $\lambda_X(t)$ определяется как условная плотность вероятности:

$$\lambda_X(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P\left\{t < \tau_X \le t + \Delta t \middle| \tau_X > t\right\}}{\Delta t} = \frac{f_X(t)}{S_X(t)}, \tag{14}$$

где $f_X(t)$ – плотность распределения времени до события; $S_X(t)$ – функция надежности. Методы оценки интенсивностей описаны в [1, 3].

Параметр потока для восстанавливаемых систем – предел отношения математического ожидания числа событий на малом интервале к длине этого интервала:

$$\omega_X(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{M\left[N_X(t, t+\Delta t)\right]}{\Delta t}. \tag{15}$$

Для стационарного пуассоновского потока ω = const, а среднее число событий за время T равно ωT.

Статистические оценки вероятностей получаются по результатам испытаний или имитационного моделирования. Для невосстанавливаемых систем используется средняя наработка до события:

$$T_{ср}^{(X)} = M[\tau_X] = \int_0^\infty S_X(t)\, dt. \tag{16}$$

Для восстанавливаемых систем – средняя наработка на событие:

$$T_{на}^{(X)} = \frac{T_{сумм}}{M\left[N_X(T)\right]}, \quad (17)$$

где $T_{сумм}$ – суммарная наработка на наступление события.

Указанные соотношения базируются на классических результатах теории надежности [4].

8. Практическое применение методики

Предложенная совокупность критериев может применяться на различных этапах жизненного цикла САУТ ПНП. На этапе проектирования она позволяет формировать требования к быстродействию, достоверности и точности торможения. На этапе испытаний – обосновывать объем и состав экспериментов, включая имитационное моделирование и натурные испытания. На этапе эксплуатации – накапливать статистику опасных событий и уточнять значения интенсивностей и параметров потока.

Методика также может использоваться при сертификации для формирования доказательной базы безопасности. Важно, что интегральные уровни полноты безопасности учитывают частоту встречаемости различных условий эксплуатации, что делает оценку более объективной. Примеры практической реализации систем адаптивного круиз-контроля для автономного трамвая приведены в работе [11].

9. Заключение

В работе предложена вероятностная методика оценки безопасности системы обнаружения препятствий и предотвращения наездов трамвайного вагона. Сформулированы частные критерии: своевременность обнаружения ($P_{захв}$), устойчивость сопровождения ($P_{уд}$), достоверность распознавания ($P_{ош1}$, $P_{ош2}$), безопасность торможения ($P_{уск}$) и устойчивость к дестабилизирующим факторам ($P_{уст}$). Введено пространство факторов θ, учитывающее параметры препятствий, внешние условия, режимы движения и воздействующие факторы. Показано, что интегральные оценки целесообразно строить на основе уровней полноты безопасности с усреднением по функции распределения факторов $F(\theta)$.

Дальнейшее развитие методики связано с получением экспериментальных оценок, уточнением функций распределения, разработкой

имитационных моделей и формированием нормативных значений $\tau_{норм}$, $\tau_{тр}$ и $\alpha_{доп}$ применительно к конкретным условиям эксплуатации трамвайных вагонов.

Список использованных источников

1. *Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.* Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
2. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
3. *Кокс Д. Р., Льюис П. А.* Статистический анализ последовательностей событий. – М.: Мир, 1969. – 312 с.
4. *Барлоу Р., Прошан Ф.* Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
5. *Ефанов Д. В., Хорошев В. В., Осадчий Г. В*. Концептуальные основы синтеза безопасных систем управления движением поездов // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20, № 3 (100). – С. 50–57. – DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-6.
6. *Shubinsky I. B., Schabe H., Rozenberg E. N.* On the safety assessment of an automatic train operation system // Dependability. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – P. 3–14. – DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-4-3-14.
7. *Воробьев А. А., Перепеченов А. М., Кондратенко В. Г., Мигулин Н. К.* Повышение безопасности движения трамваев за счет применения системы обеспечения активной безопасности и помощи водителю // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2026. – Т. 23, № 2. – С. 53–64. – DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-53-64
8. *Майстренко В. Д., Таяновский Г. А.* Динамика торможения трамвая с системой предотвращения столкновения // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сб. науч. тр.: в 2 т. – Минск : БНТУ, 2022. – Т. 1. – С. 184–187.
9. *Lukacs G., Bartha T.* Formal modeling and verification of the functionality of electronic urban railway control systems through a case study // Urban Rail Transit. – 2022. – Vol. 8. – P. 217–245. – DOI: 10.1007/s40864-022-00177-8.
10. *Jiang L., Pan W., Huang R.* An obstacle perception algorithm based on multi-sensor fusion for autonomous-rail rapid transit // Control and Information Technology. – 2024. – No. 4. – P. 102–107. – DOI: 10.13889/j.issn.2096-5427.2024.04.014.
11. *Baek J., Kwak J., Hwang H., Park S.-W., Choi K. J., Lee H., Kuc T.-Y., Jeon H.* Adaptive cruise control systems for autonomous tram vehicle // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 181787–181798.
12. *Popa G., Gheți M.-A., Tudor E., Vasile I., Sburlan I.-C.* Experimental study regarding long range LiDAR capabilities in sensing safety distance for vehicle application // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 15. – P. 5731. – DOI: 10.3390/s22155731.

PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT OF THE OBSTACLE DETECTION AND COLLISION AVOIDANCE SYSTEM OF A TRAM CAR

Andrey E. Sorokin
SPb SUE «Gorelectrotrans»
Russia, 196105, St. Petersburg, Syzranskaya Street, 15
E-mail: Andrey.Sorokin@spbget.ru

Abstract. The problem of quantitative safety assessment is considered for an automatic control system of a tramcar designed to prevent collisions with obstacles. The object of study is one function of the system: detecting an object and preventing a collision with it. A probabilistic approach is proposed, within which safety is described by a set of criteria: timeliness of detection, tracking stability, recognition reliability, accuracy of braking mode selection, and robustness to external destabilizing factors. A state space is introduced that takes into account obstacle parameters, environmental conditions, tramcar motion modes, and influencing factors. It is shown that integral estimates should be obtained by averaging particular probabilistic characteristics over the distribution function of the factors. The proposed methodology is intended for use in testing, certification, and substantiation of requirements for an automatic control system of a tramcar for preventing collisions with obstacles.

Keywords: tram car; obstacle detection; collision avoidance; probabilistic criteria; safety; functional safety; state space; destabilizing factors.

УДК 656.259.12
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-688

САМООРГАНИЗАЦИЯ РЕШАЮЩИХ ФУНКЦИЙ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Евгений Михайлович Тарасов, д-р техн. наук,
Анна Евгеньевна Тарасова, канд. техн. наук,
Наталья Станиславовна Степнова
Приволжский государственный университет путей сообщения
Россия, 443066, Самара, ул. Свободы, 2В
E-mail: tarasov53em@yandex.ru, a.tarasova@samgups.ru, stepnovanataliy@gmail.com

Константин Афанасьевич Бочков, д-р техн. наук
Белорусский государственный университет транспорта
246653, Республика Беларусь, Гомель, ул. Кирова, д. 34
E-mail: bochkov1999@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена классификация распознавания состояний устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (генетика, диагностика, прогнозирование) и роль систем технической диагностики в управлении движением поездов. Описаны требования к функциональным компонентам систем диагностики, а также однорядные и многорядные алгоритмы самоорганизации решающих функций оптимальной сложности на основе метода группового учета аргументов.

Ключевые слова: техническая диагностика; техническое прогнозирование; распознавание состояний; решающие функции; самоорганизация моделей; киберфизические системы.

1. Введение

Распознавание состояний устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) классифицируется на три подкласса [1 – 6]:

– техническая генетика – состояния объекта диагностирования (компоненты ЖАТ) в прошлом времени;

– техническая диагностика – состояния объекта диагностики в настоящем (текущем) времени;

– техническое прогнозирование – предсказание состояния объекта диагностики в будущем времени.

Первая задача позволяет формировать базу знаний для обучения решающих (диагностических) $d(x)$ функций, техническое прогнозирование

позволяет определять остаточный ресурс или границу предотказного состояния в жизненном цикле объекта диагностики. Следовательно, техническая диагностика, полагаясь на базу знаний технической генетики, решая задачу текущего состояния объекта диагностики, предсказывает поведение объекта в будущем.

Теория, методики, способы и принципы технической диагностики – научное направление в области распознавания состояний объектов диагностики на основе оптимальных процедур формирования пространства принципов, решающих функций и решающих процедур принятия решения о состоянии объекта ЖАТ [7, 8].

Современная система управления на железнодорожном транспорте представляет собой киберфизическую систему взаимодействия систем технического диагностирования и мониторинга (СТДМ), автоматизированное рабочее место дежурного по станции (АРМ ДСП) и автоматизированное рабочее место поездного диспетчера (АРМ ДНЦ) [9, 10]. Интеграция систем диагностики и управления движением поездов позволяет избежать непредвиденных задержек поездов, уменьшить простои и исключить неопределенности в управлении движением поездов при нештатной ситуации устройств ЖАТ.

Критерием исключения неопределенности действий ДНЦ и ДСП является качественная, безошибочная информация СТДМ, позволяющая принимать решения, адекватные ситуации.

В контексте функционирования киберфизических систем (CPS) представляется множеством функциональных компонент CPS $-f$, отраженных через логические, физические компоненты, а также различные модели, в частности, представленные как диагностические или решающие функции во взаимодействии, формирующие базовые единицы функциональности:

$$f = \left\{ (P_{hi}; L_{gj}) \middle| P_{hi} \in P_h, L_j \in L_g, i = \overline{1,n},\ j = \overline{1,m} \right\}. \quad (1)$$

где P_{hi} – множество физических элементов;

L_{gj} – множество логических компонентов;

m,n – размерности пространства компонентов.

Каждый функциональный компонент (1) должен обладать достаточностью:

– наличием вычислительных компонентов;

– наличием ансамбля моделей диагностики;

– достаточным объемом памяти для хранения обученных решающих функций;

– автоматизированным сбором первичной информации о состоянии объекта диагностики;

– способностью к самодиагностике;

– способностью самоорганизации моделей с целью усложнения и достижения безошибочности диагностики.

Основной задачей при создании системы распознавания в составе киберфизической системы является формирование модели (решающей функции) оптимальной сложности.

Удобным математическим аппаратом при формировании решающих функций является теория самоорганизации моделей, применительно к распознаванию образов – решающих функций [11, 12]. Теория самоорганизации моделей не преследует решение задачи формирования решающей функции путем усложнения моделей и повышения размерности исходного пространства первичных информативных признаков, но постулирует существование оптимального, с ограниченным размером единственной решающей функции оптимальной сложности, определяемой перебором элементарных решающих функций – претендентов по внешним критериям селекции.

При самоорганизации решающей функции основное внимание уделяется структурной схеме организации решающей функции относительной сложности. В соответствии с принципом самоорганизации, постепенное усложнение решающей функции через увеличение членов номинальных функций, используемых в качестве функции значения внешних критериев качества, сначала уменьшается, а затем возрастает, т.е. имеется экстремум функции, позволяющий фиксировать оптимальность решающей функции.

Алгоритмы самоорганизации моделей (решающей функции) могут быть однорядными или многорядными [13 – 16], реализуемые методом группового учета аргументов (МГУА). Полная математическая индукция реализуется при переборе всех вариантов решающей функции, осуществляемое в однорядном (комбинаторном) алгоритме.

2. Однорядный полиноминальный алгоритм

В комбинаторных алгоритмах осуществляется сортировка полного набора частных решающих функций из определенного задания базы (при распознавании – полиномиального) с селекцией лучшей решающей функции по заданному критерию селекции и ранжирования согласно

определенного критерия. Рассмотрим полиноминальный алгоритм однорядной селекции решающей функции.

Априорным набором аргументов является *n*-членов произвольного полинома максимальной степени при выбранном числа аргументов информативных признаков. Для примера рассмотрим квадратичный полином при трех аргументах $m=(x_1,x_2,x_3)$:

$$d(x)=C_0+C_1x_1+C_2x_2+C_3x_3+C_4x_1^2+C_5x_2^2+ \\ +C_6x_3^2+C_7x_1x_2+C_8x_1x_3+C_9x_2x_3. \quad (2)$$

В полиноме (2) 10 членов и $n=10$.

Алгоритм формирования рядов полиномов следующий. На первом этапе используем все решающие функции при числе членов степенного ряда $S=1$ (S – порядковый номер ряда), т. е. состоящий из $1-й$ переменной. Количество решающих функций, участвующих в селекции-10.

Рассмотрим при $S=2$, т.е. при двух аргументах:

$$d_{11}=C_0+C_1x_1,\ \ d_{12}=C_0+C_2x_2,\ ...,$$
$$d_i=C_0+C_9x_2x_3...,\ d_j=C_1x_1+C_2x_2,\ ...,$$
$$d_k=C_1x_1+C_9x_2x_3...,\ \ d_{45}=C_8x_1x_3+C_9x_2x_3.$$

Во втором ряду количество решающих функций: $n=C_{10}^2=45.$ (3)

Аналогично возможно построение $n=C_{10}^3$ частных решающих функций, при $S=3$, $n=C_{10}^4$, при $S=4$ и т. д., до $C_{10}^{10}=1$ модели, до $S=n$, т. е. полинома вида (2).

Таким образом, P_n возможных комбинаций решающих функций из n аргументов определяется согласно выражению

$$P_n=\sum_{S=1}^{n}C_n^S=2^n-1. \quad (4)$$

Коэффициент частных решающих функций при сложности $S=1,\ S=2,\ ...,S=n$ для каждого полинома определяется методом наименьших квадратов (МНК) [17].

В соответствии с (4) при увеличении n, P_n достаточно быстро увеличивается, например, при $P_{10}=1024$, а при $P_{15}=32768.$ Поэтому возможности алгоритма комбинаторного перебора ограничены.

Поэтому при формировании решающих функций с большим количеством переменных удобно воспользоваться многорядным алгоритмом.

3. Многорядный алгоритм формирования моделей

При использовании в качестве решающей функции претендента полинома Колмогорова – Габора от k переменных вида:

$$d(x) = C_0 + \sum_{i=1}^{k} C_i x_i + \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k} C_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k}\sum_{l=1}^{k} C_{ijl} x_i x_j x_l + ..., \quad (5)$$

представляющего как сумму линейных, квадратичных, кубических и т. д. членов. Если преобразовать слагаемые в (5) получим линейный полином:

$$d(x) = C_0 + C_1 x_1 + C_2 x_2 + ... + C_n x_n. \quad (6)$$

Члены полинома (6) формируют исходный набор переменных аргументов в нулевом ряду многорядного алгоритма.

На рис. 1 представлена схема многорядного формирования решающей функции методом группового учета аргументов.

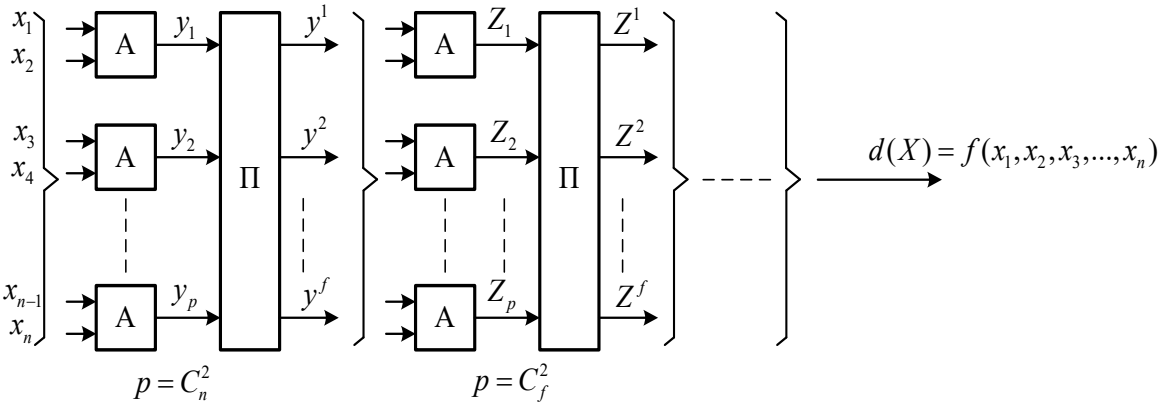


Рис. 1. Структурная организация многорядного алгоритма формирования решающей функции методом группового учета аргументов

Схема формирования многорядного алгоритма формирования решающей функции на основе метода группового учета аргумента содержит следующие шаги:

– на основе измеренных результатов, занесенных в базу данных, строятся частные решающие функции на основе попарных комбинаций переходных аргументов согласия МНК в частные решающие функции, вида:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2),\ y_2 = f_2(x_1, x_3), ..., y_k = f_k(x_{k-1}, x_k),\ k = C_n^2, \quad (7)$$

из которых, согласно внешнему критерию, отбирается лучшее (в частном случае внешним критерием может быть MAPE оценка);

– переменные, полученные в первом ряду, используются в качестве аргументов решающих функций второго ряда, и снова формируются частные решающие функции от двух аргументов:

$$z_1 = \varphi_1(y_1, y_2),\ z_2 = \varphi_2(y_1, y_3), ..., z_l = \varphi_l(z_{f1-e}, z_{fe}),\ l = C_{fe}^2. \quad (8)$$

Так же, как и в первом ряду из смежных полиномов (8) отбираются лучшие модели, применяемые в качестве аргументов третьего, четвертого и т.д. рядов. При этом частные решающие функции могут быть как линейными:

$$d = C_0 + C_1 x_i + C_2 x_k,$$

так и нелинейными:

$$d = C_0 + C_1 x_i + C_2 x_k + C_3 x_i x_k,$$

$$d = C_0 + C_1 x_i + C_2 x_k + C_3 x : C_4 x_i^2 + C_5 x_k^2.$$

Таким образом, в алгоритме многорядности реализуется принцип массовой селекции при переходе из ряда в ряд.

С использованием вышеизложенной методики синтезирована диагностическая степенная функция изолирующих стыков 3-й степени сложности вида: $R_{is} = 73{,}8 - 206{,}4 I_{11} + 210 I_{11}^2 - 68{,}4 I_{11}^3$. В качестве граничных условий принято, что величина сопротивления предотказного состояния изолирующего стыка составляет – 50 Ом, неисправное < 30 Ом, а исправное > 50 Ом.

Поэтому участок исследования выбран $55\ Ом \geq R_{ИЗ} \geq 25\ Ом$, и результаты исследований представлены в виде функции $R_{is} = f(I_1, I_2)$ (рис. 2), где I_1, I_2 сигнальные токи, протекающие через изолирующие стыки с уменьшенным сопротивлением.

На графике показаны 9 экспериментальных точек, соответствующих реальным сопротивлениям изолирующего стыка. Анализ погрешности показал следующие свойства диагностики:

$$MAPE : 2{,}51\%;$$

$$R^2 : 0{,}965.$$

Таким образом, сравнительный анализ результатов, представленных на рис. 2, подтвердил правильность методики формирования диагностической функции и возможность диагностирования изолирующих стыков диагностическими функциями с множеством аргументов.

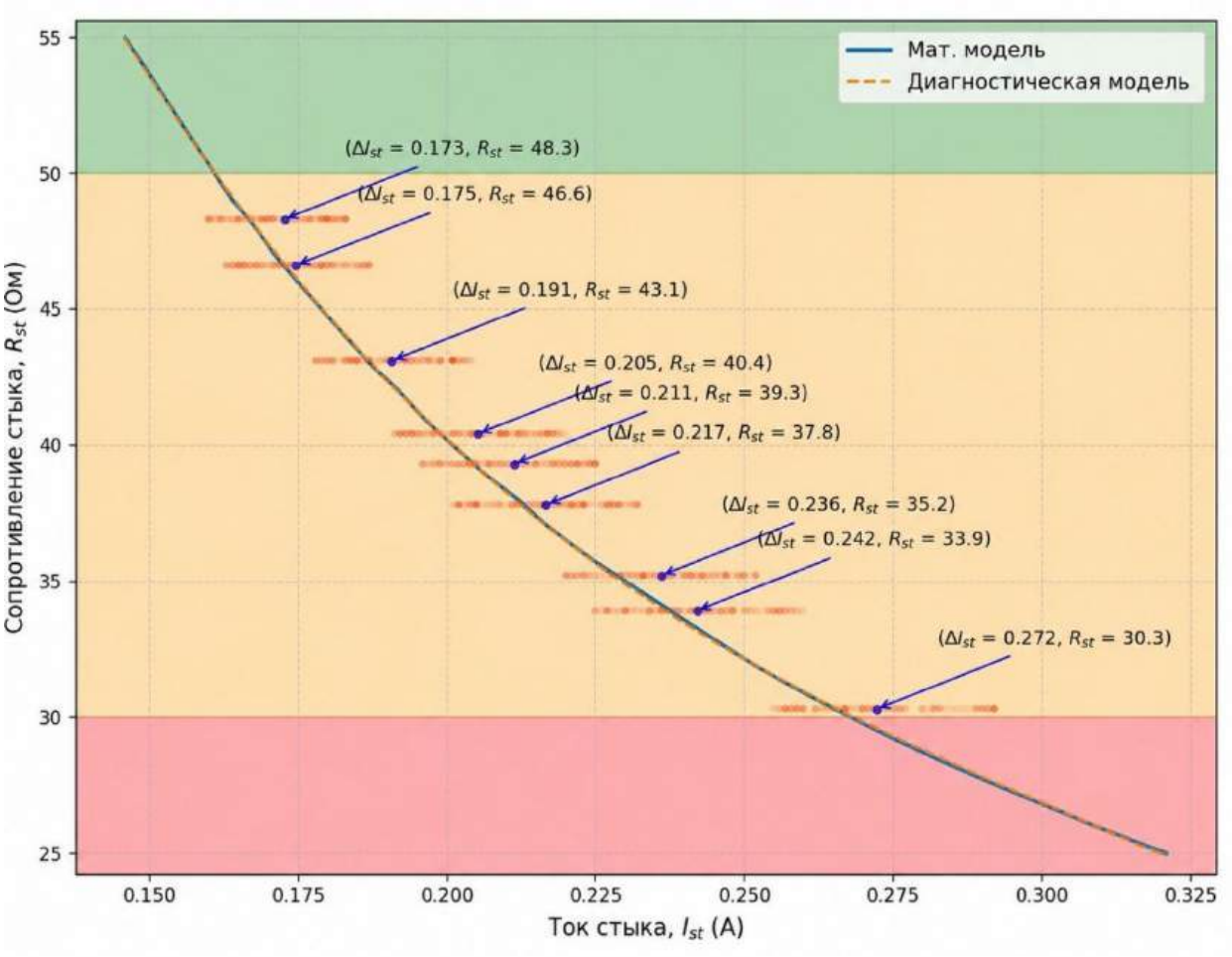


Рис. 2. Результаты диагностики изолирующих стыков диагностической функцией

4. Заключение

Техническая диагностика устройств железнодорожной автоматики и телемеханики является неотъемлемым элементом киберфизических систем управления движением поездов. Эффективность таких систем напрямую зависит от качества распознавания текущего, прошлого и будущего состояний объектов диагностики, что определяет необходимость построения адаптивных и самоорганизующихся решающих функций.

В работе показано, что применение методов самоорганизации моделей, в частности метода группового учета аргументов, позволяет формировать решающие функции оптимальной сложности без априорного задания структуры модели. Рассмотренные однорядные (комбинаторные) алгоритмы обеспечивают полный перебор частных моделей, однако их вычислительная эффективность резко снижается с ростом числа аргументов. Многорядные алгоритмы, реализующие принцип массовой селекции, являются более предпочтительными для практического применения при большом

количестве диагностических признаков, так как обеспечивают поэтапное усложнение модели с контролем качества на каждом ряду селекции.

Предложенный подход к самоорганизации решающих функций создает основу для построения интеллектуальных систем диагностики, способных адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации, повышать достоверность распознавания состояний устройств ЖАТ и минимизировать риски принятия ошибочных управленческих решений. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку гибридных алгоритмов, сочетающих комбинаторный и многорядный принципы, а также на внедрение разработанных методик в реальные киберфизические системы управления на железнодорожном транспорте.

Экспериментальная проверка алгоритма формирования моделей, на примере формирования самоорганизации решающей функции изолирующих стыков показал, что модель третей степени сложности обеспечивающий приемлемую относительную ошибку диагностики ($MAPE$: 2,51%), принимаемую в качестве критерия селекции решающих функций сопротивления изолирующих стыков, создается с использованием принципа неокончательных решений во втором ряду. Следовательно, методика селекции моделей, предложенная в работе, может быть успешно применена при мониторинге и диагностике элементов ЖАТ.

Данный материал создан (разработан) в рамках выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 23.04.2026 г. №109-03-2026-006/3 на выполнение научно-исследовательской работы на тему «Разработка методики киберфизической системы технической диагностики и мониторинга изолирующих стыков электрифицированных железных дорог» в 2026 году (номер государственного учета НИОКТР №126052521269-3, код (шифр) научной темы PNML-2026-0005).

Список использованных источников

1. *Ивахненко А. Г.* Самоорганизация прогнозирующих моделей – Киев ; Берлин : Техніка, 1985, 223 с.
2. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Шаманов В. И.* Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. – М.: Маршрут, 2003, 263 с.
3. *Ходкевич А. Г.* Специальные измерения и техническая диагностика: учебное пособие. – Омск: ОмГУПС, 2024, 122 с.
4. *Xiao, Shuai; Feng, Qingsheng; Hu, Xiaoxi; Song, Yakun; Cong, Guanglin; Yao, Zeyuan; Li Hong.* A novel fault diagnosis model based on deep feature fusion network under

imbalanced data: towards railway dual-switch machines traction occasion. Measurement Science and Technology, 2024, 12 с.

5. *Бочкарев С. В., Бубнов В. П., Зуев Д. В.* Применение метода риск-ориентированной диагностики для технических средств ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. – 2026. – № 3. – С. 23-26. – DOI: 10.62994/AT.2026.3.3.004.
6. *Тарасов Е. М., Надежкин В. А.* Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2024. – № 2. – С. 45-50. – DOI 10.36535/0236-1914-2024-02-6. – EDN DSUOVB.
7. *Тарасов Е. М.*, *Тарасова А. Е., Васин Н. Н.* Принцип построения самонастраивающейся системы диагностики устройств ЖАТ / Перспективные информационные технологии (ПИТ 2021) : Труды Международной научно-технической конференции, Самара, 24–27 мая 2021 года / под ред. С. А. Прохорова. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2021. – С. 528-531. – EDN AMYKEZ.
8. *Пархоменко П. П., Согомонян Е. С.* Основы технической диагностики. Кн. 2. Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства – М.: Энергия, 1981, 319 с.
9. *Lee J., Davari H., Singh J., Pandhare V.* Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. – 2018. – Vol. 18. – P. 20-23.
10. *Тарасова А. Е., Васин Н. Н.* Формирование обобщенных решающих функций при распознавании и классификации состояний ЖАТ // Наука и образование транспорту. – 2022. – №1. – С. 360-362.
11. *Безродный А. А.* Технологии проектирования информационных систем: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Прикладная информатика». – Минск: РИВШ, 2024, 415 с.
12. *Татур М. М.* Теория распознавания образов и Нейрокомпьютеры // Доклады БГУИР. – 2014. – №2 (80) – С. 186-193.
13. *Ивахненко, А. Г., Степашко В. С.* Помехоустойчивость моделирования. – Киев : Наук. думка, 1985, 216 с.
14. *Тарасов Е. М., Надежкин В. А., Надежкина С. А.* Анализ эффективности эксплуатации систем технической диагностики и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2025. – № 1(42). – С. 103-108. – DOI 10.31079/2415-8658-2025-1-102-107. – EDN CCTPWS.
15. *Жиляков Е. В.* Беспроводные технологии диагностики, контроля и мониторинга // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – №3. – С. 42-43.
16. *Ma Y.* Turnout Failure Diagnosis System Based on Group Decision Making Strategy. Journal of Physics: Conference Series, 2003, 10 с.
17. *Пугачев В. С.* Теория вероятностей и математическая статистика – 2-е изд., исправл. и дополн. – М. : ФИЗМАТ ЛИТ, 2002, 496 с.

SELF-ORGANIZATION OF DECISION-MAKING FUNCTIONS FOR RECOGNIZING THE CONDITION OF HARVESTING DEVICES

Evgeny M. Tarasov, D. Sc,
Anna E. Tarasova, Ph. D,
Natalya S. Stepnova
Volga State University of Railway Engineering
Russia, 443066, Samara, Svobody str., 2V
E-mail: tarasov53em@yandex.ru, a.tarasova@samgups.ru,
stepnovanataliy@gmail.com

Konstantin A. Bochkov, D. Sc
Belarusian State University of Transport
246653, Republic of Belarus, Gomel, Kirova str., 34
E-mail: bochkov1999@mail.ru

Abstract. The paper considers the classification of the recognition of the states of the railway automation and remote control devices (genetics, diagnostics, forecasting) and the role of technical diagnostics systems in the train traffic control. The requirements for the functional components of the diagnostics systems are described, as well as single-row and multi-row algorithms of self-organization of the decision functions of optimal complexity based on the method of group accounting of arguments.

Keywords: technical diagnostics; technical forecasting; state recognition; decision functions; self-organization of models; cyber-physical systems.

УДК 656.13
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-689

КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ САРАТОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Андрей Ильич Городнов,
Сергей Александрович Гусев, д-р экон. наук,
Игорь Юрьевич Куверин, канд. техн. наук
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: photo@fadeproject.ru, o051nm@yandex.ru, igorkuv@mail.ru

Аннотация. Рассматривается концептуальная возможность информационного взаимодействия технических средств организации дорожного движения в составе интеллектуальной транспортной системы и логистическими системами участников транспортного рынка. На примере интеллектуальной транспортной системы Саратовской городской агломерации, включающей 643 единицы технических средств организации дорожного движения восьми классов и находящейся под управлением Государственного казенного учреждения «Региональный навигационно-информационный центр», выявлены ограничения существующей архитектуры и предложена концептуальная четырехуровневая модель информационной системы, дополняющая существующую инфраструктуру интеграционной платформы для взаимодействия с системами управления транспортировкой и складом. Научная новизна работы заключается в разработке концептуальной четырёхуровневой архитектуры интеллектуальной транспортной системы, включающей интеграционную платформу для стандартизированного информационного взаимодействия технических средств организации дорожного движения с логистическими системами в режиме реального времени, что ранее не было реализовано в Саратовской городской агломерации.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы; технические средства организации дорожного движения; информационное взаимодействие; интегрированная логистика; интеграционная платформа.

1. Введение

Цифровизация транспортного комплекс Российской Федерации является одним из приоритетных направлений государственной политики: соответствующее положения закреплены в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года и последовательно реализуются в рамках национальных проектов «Безопасные качественные дороги» и «Инфраструктура для жизни». Ключевым инструментом цифровизации выступают

интеллектуальные транспортные системы (ИТС), объединяющие технические средства организации дорожного движения (ТСОДД) – светофорные объекты, детекторы транспорта, системы фотовидеофиксации и т.д. – в единый программно-аппаратный комплекс (ПАК). Современные подходы к построению адаптивных систем управления светофорными объектами рассматриваются в работе [1].

Данные о загруженности улично-дорожной сети, прогнозируемом времени в пути и действующих ограничениях движения представляют непосредственную ценность для систем управления транспортировкой (Transportation Management System, TMS) и систем управления складом (Warehouse Management System, WMS). Перспективы интеграции таких систем с автономным транспортом в сетях 5G рассматриваются в исследовании [2]. Однако, как показывает анализ архитектуры действующей ИТС Саратовской городской агломерации, взаимодействие между ними не формализовано и не имеет какого-либо программного интерфейса.

Научная новизна предлагаемого решения заключается в том, что впервые для условий Саратовской городской агломерации предлагается не просто расширение состава ТСОДД, а формирование нового информационного слоя – интеграционной платформы, которая обеспечивает стандартизированное взаимодействие между подсистемами ИТС и логистическими информационными системами (TMS, WMS) в режиме реального времени. В отличие от существующих подходов, где данные ТСОДД передаются только в контролирующие органы (ГИБДД, МЧС, дорожные службы), предлагаемая архитектура ориентирована на коммерческих потребителей – перевозчиков, диспетчерские центры, навигационные сервисы и платформы агрегации грузоперевозок.

2. Текущее состояние ИТС Саратовской городской агломерации

Саратовская городская агломерация с населением свыше 1,35 млн. человек занимает выгодное положение на пересечении транспортных коридоров «Север-Юг» и «Запад-Восток» и обладает развитой мультимодальной транспортной инфраструктурой. Формирование ИТС агломерации осуществляется поэтапно с 2020 года; по итогам реализации первого этапа агломерация достигла первого уровня зрелости – ориентиром на период до 2030 года установлен переход ко второму уровню зрелости с расширением состава технических средств.

Таблица 1. Состав технических средств ИТС Саратовской городской агломерации (2025–2026 гг.)

Класс оборудования	Кол-во	Функциональное назначение
Дорожные контроллеры (ДК)	86	Исполнение сигнальных планов, приём команд из модульного центра обработки данных
Видеодетекторы транспорта (ВД)	385	Определение интенсивности, плотности и скорости потока; классификация ТС с точностью свыше 95 % в зоне до восьми полос («Паук-Трафик»)
Пункты учёта интенсивности движения (ПУИД)	71	Стационарные измерительные комплексы на опорных сечениях магистралей; исходная база адаптивных планов и расчёта предполагаемого времени прибытия
Радиолокационные детекторы (РЛД)	92	Классификация ТС по категориям; независимость от освещённости и осадков
Дорожные информационные табло (ДИТ)	4	Знаки переменной информации об инцидентах на дороге и т.д.
Метеостанции (МС)	3	Метеомониторинг
Экологическая станция (ЭС)	1	Непрерывный мониторинг концентраций NOx, CO
Модульный центр обработки данных (МЦОД)	1	Автоматизированные системы управления дорожным движением, «Цифровой двойник», детектирование инцидентов, база данных транспортных потоков

При системном анализе выявлены некоторые проблемы информационного взаимодействия. К подсистеме светофорного управления подключено лишь 86 из примерно 500 светофорных объектов города, при целевом ориентире 2030 года – не менее 40 %. Также, стандартизированный программный интерфейс (API) для внешних потребителей отсутствует: данные передаются только для ГИБДД МВД России, МЧС и дорожным службам, а TMS перевозчиков и диспетчерские центры вынуждены опираться на сторонние картографические сервисы. А единственный МЦОД образует единую точку отказа, прерывающую управление всеми 86 ДК при нештатном отключении, даже при наличии функциональной возможности локального управления. Наконец, стационарные посты весогабаритного контроля не интегрированы в платформу, что исключает маршрутизацию крупногабаритного транспорта.

Перечисленные ограничения носят преимущественно архитектурный характер: они обусловлены отсутствием информационного слоя, объединяющего подсистемы ТСОДД в единое информационное пространство. Этот разрыв не позволяет реализовать управление дорожным движением и транспортно-логистическими процессами агломерации. Показательно при этом, что эффективность самих алгоритмов уже подтверждена практикой: внедрение координированного управления («зелёной волны») на ул. имени Чапаева В.И. (от Ильинской площади до ул. Большая Казачья) обеспечило некоторое снижение заторности участка, сокращение среднего времени движения по маршруту в будние утренние часы-пик (8:00 – 9:00). Полученные эффекты, однако, локализованы в пределах отдельно взятой улицы, что и обусловило разработку концептуальной архитектуры. При этом вопросы оценки задержек передачи информации в цифровых радиоканалах, критичных для подобных систем, рассматриваются в работе [3].

3. Концептуальная архитектура информационной системы взаимодействия технических средств организации дорожного движения

Предлагаемая архитектура выстроена по четырехуровневой модели, в которой каждый уровень несет строго определенную функцию (рис. 1). Периферийный уровень образуют 643 единицы ТСОДД, формирующие первичный информационный поток о транспортной, метеорологической и экологической обстановке. Телекоммуникационный уровень транспортирует данные по волоконно-оптическим линиям связи с LTE–резервированием. Уровень обработки и управления сосредоточен в МЦОД ГКУ «РНИЦ», где агрегируют данные, исполняются алгоритмы детектирования инцидентов, формируются адаптивные сигнальные планы и публикуются результаты через интеграционную платформу. Потребительский уровень охватывает традиционных адресатов – ГИБДД, МЧС, дорожные службы – и логистические информационные системы: TMS, WMS, диспетчерские центры и навигационные сервисы (рис. 2). Подходы к исследованию транспортных потоков в условиях адаптивного сигнального управления на нескольких перекрёстках представлены в работе [4].

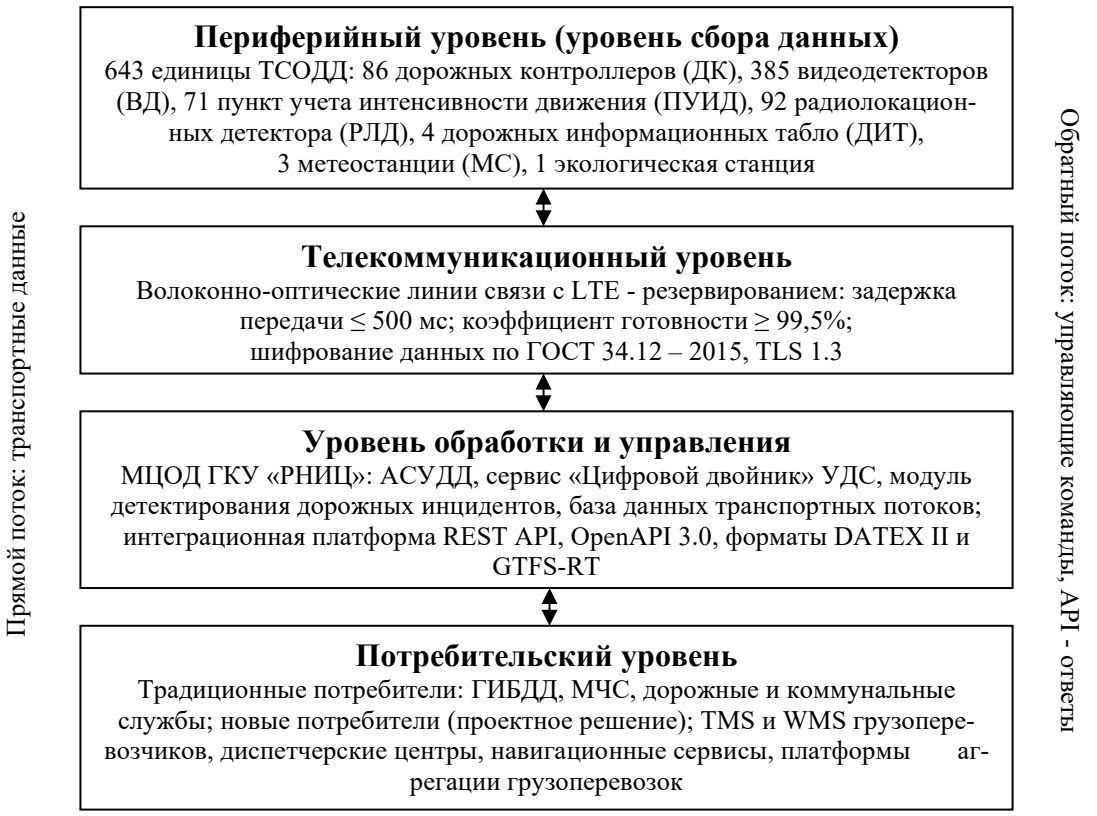


Рис. 1. Четырехуровневая концептуальная архитектура информационной системы взаимодействия ТСОДД

Основой третьего уровня служит интеграционная платформа – программный шлюз, через которые внешние системы получают данные. Платформа предоставит интерфейс (REST API) с открытой документацией (OpenAPI 3.0). Сведения о дорожных событиях передаются в формате DATEX II, данные общественного транспорта – в формате GTFS-RT. Безопасный доступ обеспечен протоколом OAuth 2.0.

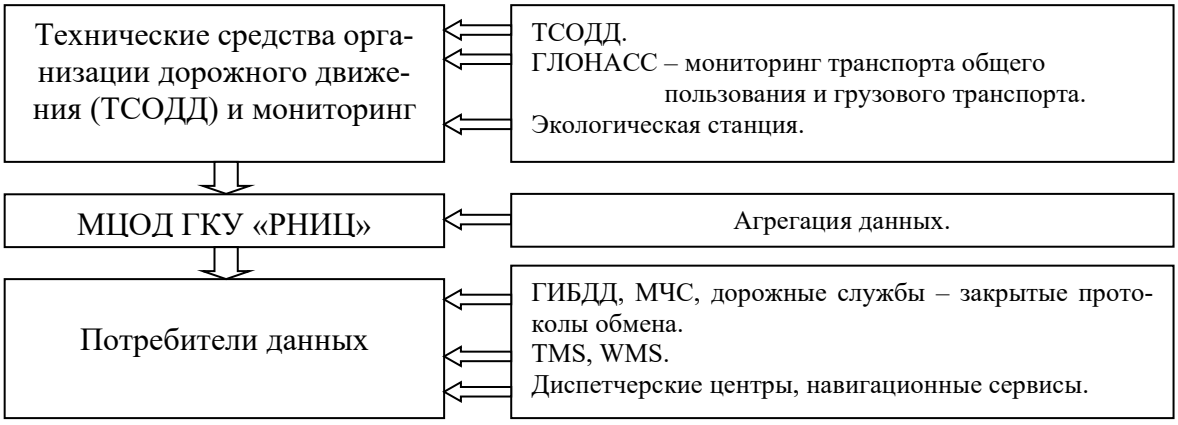


Рис. 2. Схема информационного взаимодействия

Для оперативного оповещения реализована подписка на события: при возникновении инцидента, перекрытии дороги или изменении схем организации дорожного движения внешние системы получают уведомление. Концепция цифрового двойника для ИТС в междугородних сценариях описана в исследовании [5]. Принципиальное отличие предлагаемой архитектуры от существующих решений состоит в том, что интеграционная платформа выполняет функцию не просто шлюза для передачи данных, а полноценного информационного посредника, обеспечивающего:

– стандартизированный доступ к данным ТСОДД для внешних логистических систем через REST API;

– подписку на события в режиме реального времени (инциденты, перекрытия, изменения схем организации движения);

– безопасный доступ через OAuth 2.0;

– передачу данных в международных форматах DATEX II и GTFS-RT.

Ранее в Саратовской агломерации такие возможности отсутствовали.

Новизна предлагаемого решения для логистических систем заключается в том, что TMS и WMS перевозчиков получают прямой доступ к данным о дорожной обстановке без необходимости использовать сторонние картографические сервисы. Это позволяет:

– строить маршруты с учётом прогнозируемого времени в пути и текущих ограничений;

– в реальном времени корректировать маршруты при возникновении инцидентов;

– планировать работу складов с учётом прогноза прибытия транспорта;

– интегрировать данные о дорожной обстановке в системы управления транспортировкой и складом.

Ранее такая интеграция в Саратовской агломерации не была реализована.

4. Макроскопическая модель транспортного потока

В качестве базовой модели взята макроскопическая модель Лайтхилла–Уизема–Ричардса (LWR, 1955–1956), рассматривающая транспортный поток по аналогии со сжимаемой жидкостью. Уравнение непрерывности – закон сохранения числа транспортных средств:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность транспортного потока, авт/км, q – интенсивность транспортного потока, авт/ч, x – координата, км, t – время, ч., v – средняя

скорость транспортного потока.

Данные для решения уравнения, в частности, поступают с 32 видеодетекторов транспорта (ВД) по ул. им. Чапаева В. И. по 8 светофорным объектам: от Ильинской площади до ул. Большая Казачья, где действует координированное управление («зеленая волна»). В модели Гринщилдса (1935) скорость линейно зависит от плотности:

$$v(\rho) = v_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right). \quad (2)$$

Тогда интенсивность транспортного потока:

$$q(\rho) = v_f \ \rho \ \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right), \quad (3)$$

$$q_{max} = \frac{v_f \cdot \rho_{max}}{4}. \quad (4)$$

Подставив параметры, полученные с ВД, получим следующие параметры по ул. им. Чапаева В. И. (таблица 2).

Таблица 2. Параметры по улице имени Чапаева В. И.

Обозначение	**Наименование**	**Единица измерения**	**Значение**
v_f	Скорость потока	км/ч	30
$\rho_{\max}$	Заторная плотность	авт/км	40
ρ_{cr}	Критическая плотность	авт/км	20
$q_{\max}$	Пропускная способность	авт/ч	300

Заранее рассчитав, режим работы изолированного перекрестка по формуле Уэбстера:

$$C_0 = \frac{1{,}5L + 5}{1 - Y}. \quad (5)$$

Получим оптимальный результат для светофорного объекта, расположенного на пересечении ул. им. Чапаева В. И. – ул. Большая Казачья, в следующей конфигурации (рис. 3).

Для формирования «зеленой волны» на связке из 8 светофорных объектов вычисляется временной сдвиг между соседними светофорными объектами:

$$\Delta t_k = \frac{d_k}{v_f}, \quad (6)$$

где d_k – расстояние между СО, км, v_f – скорость зеленой волны, км/ч.

	Фаза 1				Фаза 2			
Н1		34 с	4 с	3 с		26 с	4 с	3с
Н2		34 с	4 с	3 с		26 с	4 с	3с
Н3		34 с	4 с	3 с		26 с	7 с	
Н4		34 с	7 с			26 с	4 с	3с

Рис. 3. Режим работы светофорного объекта

При проверке сдвигов и режимов работы СО используется программное обеспечение для моделирования транспортных потоков SUMO с занесением данных о транспортном потоке, геометрических характеристиках улично-дорожной сети и циклограмм светофоров (рисунок 4).

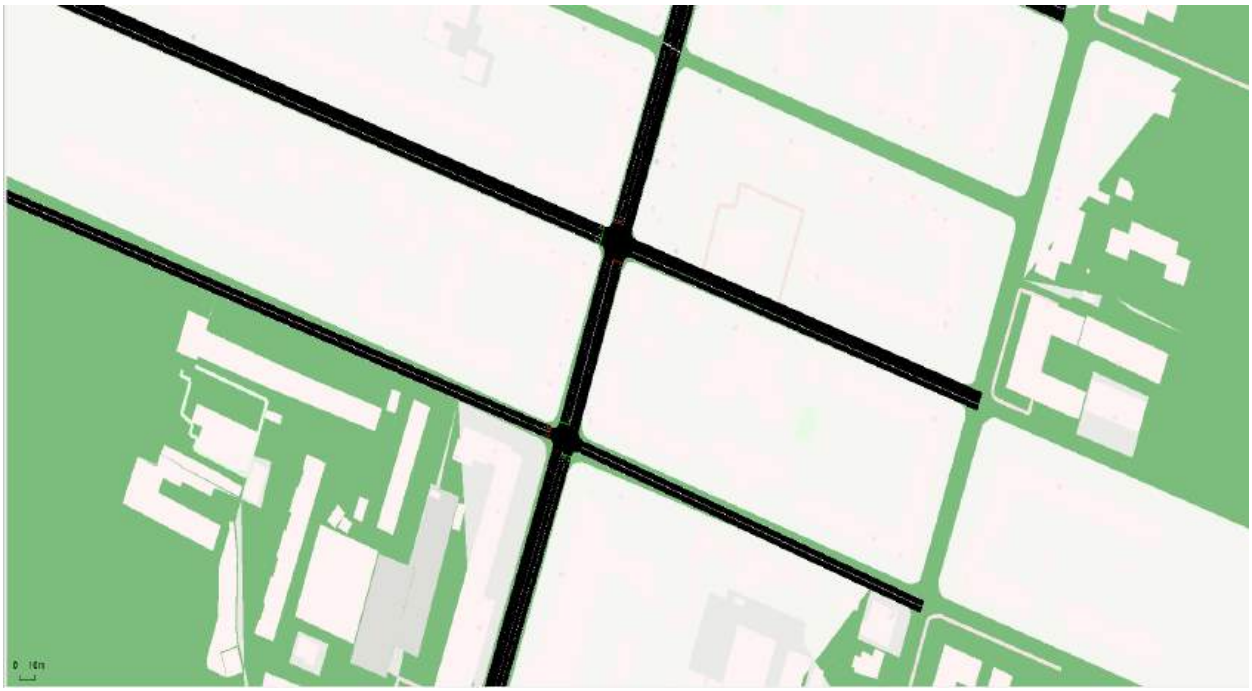


Рис. 4. Имитационная модель координированного управления по ул. им. Чапаева В. И.

Аспекты применения технологий искусственного интеллекта для оптимизации параметров управления групповыми светофорными объектами рассмотрены в работе [6].

По окончании моделирования зафиксировано увеличение средней скорости транспортного потока на 9,2 % (рисунок 5).

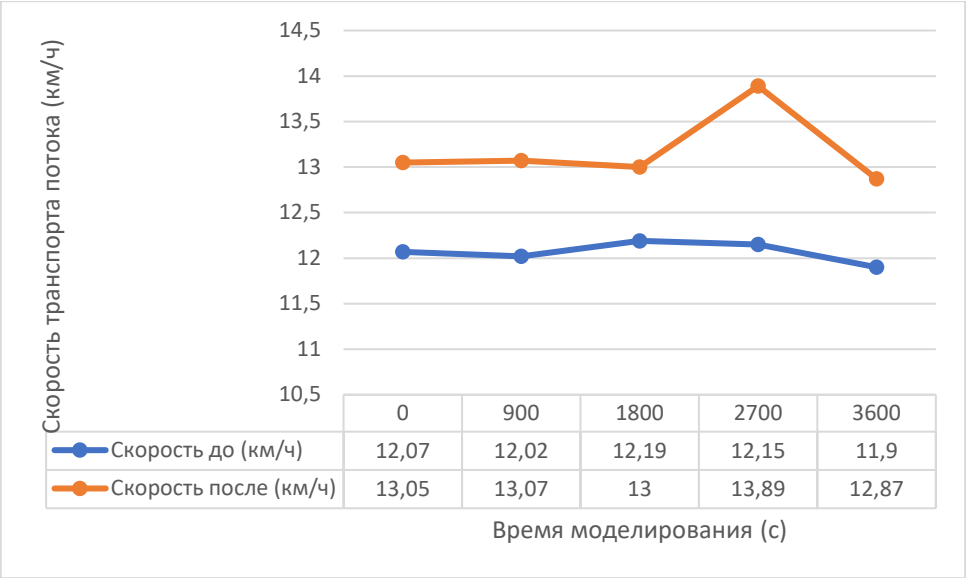


Рис. 5. Изменение скорости транспортного потока до и после внедрения координированного управления

5. Заключение

Система непрерывно опрашивает все 643 устройства ТСОДД – видеодетекторы, радиолокационные детекторы, дорожные контроллеры, метеостанции и экологическую станцию. Опрос повторяется каждые 60 секунд.

Если то или иное устройство не отвечает, этот факт фиксируется в журнале событий, и система переходит к следующему – единичная неполадка не останавливает работу системы в целом. Полученные данные проверяются на достоверность: скорость и интенсивность потока сравниваются с допустимыми диапазонами для конкретного участка дороги. Явно ошибочные значения заменяются данными предыдущего измерения.

Прошедшие проверку данные сохраняются в базе МЦОД с указанием времени и идентификатора точки измерения. Если по какому-либо участку интенсивность движения превысила 70 % от его пропускной способности или скорость потока резко упала, система формирует сигнал «перегрузка» и передаёт его в модуль управления светофорами – это запускает внеплановый пересчёт сигнальных планов на соответствующих перекрёстках. При этом вопросы обеспечения безопасности передачи данных в таких системах, в том числе в сетях V2X, рассматриваются в работе [7]. Методы имитационного моделирования, включая моделирование антиблокировочных систем торможения, применяемые для верификации подобных решений, описаны в работах [8, 9]. Отдельного внимания заслуживает опыт оптимизации маршрутов движения общественного транспорта с динамическим использованием выделенных полос, представленный в исследованиях [10, 11].

Перспективы развития цифровых двойников и предиктивной аналитики для управления загрузкой транспортных сетей обсуждаются в работе [12], а подходы к оценке пропускной способности и выбору приоритетных коридоров – в исследовании [13].

Научная новизна и практическая значимость предлагаемого решения заключаются в следующем:

1. Впервые для Саратовской городской агломерации предложена концептуальная четырёхуровневая архитектура ИТС, включающая интеграционную платформу для взаимодействия с логистическими информационными системами.

2. Разработан алгоритм информационного взаимодействия ТСОДД с TMS и WMS, обеспечивающий передачу данных в стандартизированных форматах (DATEX II, GTFS–RT) и подписку на события в режиме реального времени.

3. Предложена схема устранения единой точки отказа (МЦОД) за счёт распределённой архитектуры обработки данных.

4. Показана возможность интеграции макроскопической модели транспортного потока (LWR) с алгоритмами координированного управления («зелёная волна») и логистическими информационными системами.

Список использованных источников

1. *Тисленко Т. И., Семенова Д. В.* Разработка адаптивной системы управления светофорными объектами с использованием марковских процессов принятия решений // Управление большими системами. – 2025. – № 115. – С. 298–323.
2. *Hakak S., Gadekallu T. R., Maddikunta P. K.* Autonomous Vehicles in 5G and Beyond: A Survey // Vehicular Communications. – 2022. – Vol. 39. – P. 1–37. – DOI: 10.1016/j.vehcom.2022.100551.
3. *Baniata H., Pflanzner T., Feher Z., Kertész A.* Latency Assessment of Blockchain-based SSI Applications Utilizing Hyperledger Indy // Proceedings of the 12th International Conference on Cloud Computing and Services Science. – 2022. – P. 264–271. – DOI: 10.5220/0011082300003200.
4. *Matei L., Dumitru I., Racila L.* Traffic Flow Investigation of an Adaptive Signal Control System in Several Junctions // CONAT 2024 International Congress of Automotive and Transport Engineering. – 2024. – P. 38–49.
5. *Llagostera-Brugarola E., Corpas-Marco E., Victorio-Vergel C.* A Digital Twin for Intelligent Transportation Systems in Interurban Scenarios // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 13. – Art. 7454. – DOI: 10.3390/app15137454.
6. *Tang R., Zhu B., Zhang P., Wu C.* Emergency Lane Control Strategies in Intelligent Transportation Systems Using Dynamic Congestion Prediction // Transportation Research Part

C: Emerging Technologies. – 2026. – Vol. 173. – Art. 100402. – DOI: 10.1016/j.trc.2026.100402.

7. *Venkatasamy T., Hoss M. J., Ramasamy G.* Intrusion detection system for V2X communication in VANET networks using machine learning-based cryptographic protocols // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Art. 11-35. – DOI: 10.1038/s41598-024-82313-x.
8. *Li X., Miao H.* Application of Artificial Intelligence Technology in Optimizing Control Parameters of Traffic Signal Group Systems // International Journal of Intelligent Information Technologies. – 2024. – Vol. 20, No. 1. – 19 p. – DOI: 10.4018/IJIIT.355013.
9. *Kacprzycki L., Brukalski M., Abramowski M. M.* Simulation of an Anti-Lock Braking System in a MATLAB/Simulink Environment for Various Road Adhesion Properties // Engineering Transactions. – 2025. – Vol. 73. – 27 p. – DOI: 10.24423/engtrans.3463.2025.
10. *Ayman A. A., E.-S. Zeidan H., Ahmed S., Farhan An.* Antilock-Braking Systems (ABS) Control: A Technical Review // Intelligent Control and Automation. – 2011. – Vol. 2. – P. 186–195. – DOI: 10.4236/ica.2011.2302
11. *Moaaz A. O., Ali A. S., Ghazaly N. M.* Investigation of Anti-Lock Braking System Performance Using Different Control Systems // International Journal of Control and Automation. – 2020. – Vol. 13, No. 1s. – P. 137–153.
12. *Pechkurov I., Plotnikov D., Gorev A.* Development of a Method for Selecting Bus Rapid Transit Corridors Based on the Economically Viable Passenger Flow Criterion // Sustainability. – 2023. – Vol. 3. – Art. 2391. – DOI: 10.3390/su15032391.
13. *Zhao J., Zhou X.* Improving the operational efficiency of buses with dynamic use of exclusive bus lane at isolated intersections // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2018. – Vol. 20, No. 2. – P. 642–653. – DOI: 10.1109/TITS.2018.281924.

THE CONCEPT OF AN INTEGRATED PLATFORM OF AN INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEM USING THE SARATOV AGGLOMERATION AS AN EXAMPLE

Andrey I. Gorodnov,
Sergey A. Gusev, D. Sc,
Igor Y. Kuverin, Ph. D
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Russia, 410054, Saratov, Politekhnicheskaya St., 77
E-mail: photo@fadeproject.ru, o051nm@yandex.ru, igorkuv@mail.ru

Abstract. The conceptual possibility of information interaction between technical means of traffic management within the framework of an intelligent transport system and the logistics systems of transport market participants is considered. Using the example of the intelligent transport system of the Saratov urban agglomeration, which includes 643 units of technical means of traffic management of eight classes and is managed by the State Public Institution "Regional Navigation and Information Center," the limitations of the existing architecture are identified, and a conceptual four-level information system model is proposed, which complements the existing infrastructure of the integration platform for interaction with transportation and warehouse management systems. The scientific novelty of the work lies in the development of a conceptual four-level architecture for an intelligent transport system, which includes an integration platform for standardized information interaction between traffic management technical tools and logistics systems in real time – a solution that has not previously been implemented in the Saratov urban agglomeration.

Keywords: intelligent transport systems; traffic management systems; information interaction; integrated logistics; integration platform.

УДК 656.1:004.8
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-690

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Николай Иванович Григоренко, канд. техн. наук,
Владимир Анатольевич Гутников, канд. техн. наук
Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации
Россия, 119331, Москва, проспект Вернадского, д. 29
E-mail: gri-nik@mail.ru, lomonosov25@rambler.ru

Аннотация. Представлено современное решение, которое сочетает в себе данные с датчиков LiDAR высокого разрешения и информационной системы государственного градостроительного кадастра. Эта технология позволяет принимать упреждающие меры для повышения безопасности и сокращения количества сбоев в работе, используя всю доступную информацию о траекториях движения транспортных средств и смене полос движения. Технология цифровых двойников обеспечивает беспрецедентную точность мониторинга дорожного движения и состояния инфраструктуры за счет объединения потоков реальных данных с анализом производительности на основе моделирования. Работа направлена на решение актуальных проблем управления городским транспортом с помощью инструментов, работающих в режиме реального времени, и демонстрирует революционное влияние новых технологий на мониторинг интеллектуальной инфраструктур.

Ключевые слова: цифровой двойник; программное обеспечение; дорожная инфраструктура; мониторинг дорожного движения.

1. Введение

Развитие цифровых технологий и моделирования транспортных систем нашло отражение в профильных стратегиях, где установлены целевые требования к цифровизации отрасли и определены базовые показатели эффективности управления транспортными потоками крупных городов [1]. В Российской Федерации предусмотрена разработка программ комплексного развития транспортной инфраструктуры (ПКРТИ), комплексных схем организации дорожного движения (КСОДД) и документов планирования регулярных перевозок пассажиров и багажа (ДПП). Данный вектор научно-технологического развития предполагает разработку планов устойчивой городской мобильности, совершенствование пространственного планирования, а также модернизацию транспортных систем крупных агломераций [2].

Городская транспортная система является важнейшей компонентой при организации дорожного движения. Традиционные методы показывают свою ограниченность, так как не способны учитывать множество факторов, влияющих на мобильность транспортного потока.

В машиностроении широко применяется концепция цифровых двойников. Возможности этой новой концепции можно использовать в различных областях, включая сферу дорожного движения и транспорта. Цифровой двойник транспортной сети имитирует реальную динамику дорожного движения и взаимодействие различных компонентов транспортной системы. Отображение физической планировки дороги, перекрестков и инфраструктуры в виртуальной среде максимально точно воспроизводит реальность.

Специалистами ЦНИИП Минстроя России разработана информационная система государственного градостроительного кадастра г. Москвы (далее – ГГК г. Москвы). Система создана в соответствии с Постановлением Правительства Москвы от 21.09.2004 № 642-ПП «О развитии государственного градостроительного кадастра г. Москвы» и с учетом строительных норм СНиП 14-01-96 «Основные положения государственного градостроительного кадастра». Согласно регламентированным в п. 2.1 целевым установкам и задачам, ГГК «Общегородская информационная система государственного градостроительного кадастра г. Москвы» определяется как упорядоченная в организационном плане совокупность информационных ресурсов, требуемых для ведения градостроительной и инвестиционной деятельности в пределах города, а также современных информационных технологий, обеспечивающих информационные процессы, управление территорией и объектами недвижимости. В рамках исследования представлена методология цифрового двойника регулируемых перекрестков на базе ГГК г. Москвы, объединяющая лидарные данные и имитационное моделирование. Научная задача направлена на разработку алгоритмов трансформации лидарных треков в параметры потока, а практическая – на создание инструментария для прогнозирования заторов и управления светофорами [3].

2. Структура организации контроля вычислений

Цифровой двойник позволяет произвести точную имитацию реальной системы транспортного комплекса. Имитация позволяет воспроизводить весь жизненный цикл реальных аналогов транспортной системы, используя самые точные физические модели, обновляемые данные с датчиков, историческую информацию и другие важные аспекты [4]. Идея цифрового

двойника позволяет осуществлять мониторинг, анализ и оптимизацию сложных систем в режиме реального времени. Концептуальное представление цифрового двойника показано на рис. 1.

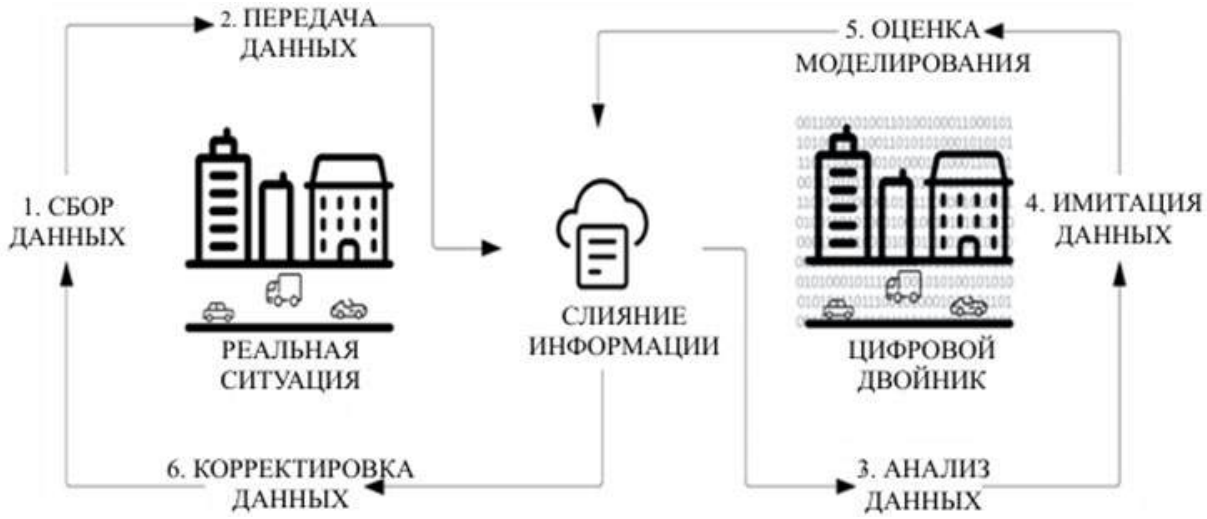


Рис. 1. Концептуальная иллюстрация цифрового двойника

Для создания цифрового двойника транспортной сети необходим полный набор информационых данных. Необходимо правильно классифицировать каждого участника дорожного движения, например автомобиль, автобус, пешехода, велосипедиста и т. д., и получать актуальные данные об их точном местоположении и скорости [5]. Цифровой двойник, применяемый для оценки эффективности пропускной способности перекрёстка, включает в себя данные в режиме реального времени и даёт динамическую картину перекрёстка, позволяя проводить оценку и оптимизацию на основе моделирования. Разработка и применение цифровых двойников в сфере транспорта связаны с рядом факторов. Следует определить следующие тематические области:

– концепция и пограничные условия цифровых двойников в сфере транспорта;

– технологии сбора данных в режиме реального времени и стратегии интеграции датчиков;

– практическое применение цифровых двойников для мониторинга дорожного движения, управления трафиком и дорожной инфраструктурой, а также внедрения имитационных моделей.

Сбор данных в режиме реального времени и интеграция датчиков – один из факторов эффективности цифрового двойника. Точные данные с высоким разрешением – основа любой эффективной системы цифровых

двойников. Рассмотрим подход к созданию модели цифрового двойника, базирующейся на использовании современных технологий сбора данных транспортной инфраструктуры. По мере углубления цифровой трансформации в транспортной отрасли традиционные технические подходы выявляют всё больше проблем, связанных с управлением жизненным циклом транспортной инфраструктуры [6]. На рис. 2 представлена концептуальная схема предлагаемой архитектуры модели цифрового двойника, транспортных средств (ТС) и программно-аппаратной платформы интеллектуального мониторинга трафика (разработка компании Ouster BlueCity [7]).

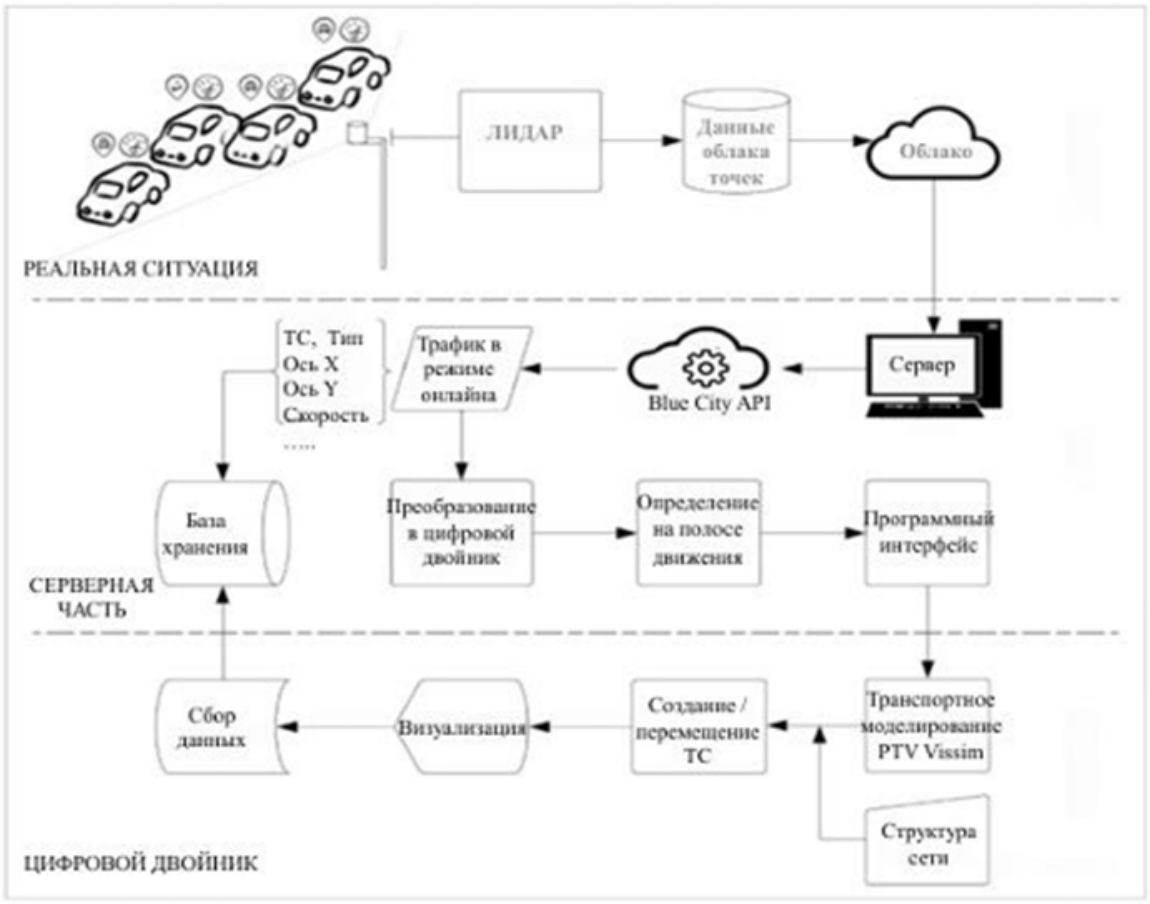


Рис. 2. Архитектура платформы цифрового двойника

При создании модели ориентация была сфокусирована на элементе, часто встречающемся в дорожной инфраструктуре, – перекрестке. На перекрестке с помощью датчика LiDAR собираются данные в режиме реального времени. Далее эти данные передаются на сервер через облако. Основная задача сервера – собрать данные, необходимые для создания цифрового двойника. В программе для моделирования создается модель для оценки трафика на перекрестке. Получаемые данные об участниках дорожного

движения (тип транспортного средства, местоположение, скорость и т. д.) извлекаются из данных облака точек. Полученные данные преобразуются для определения локальных координат транспортных средств в цифровом виде для создания цифрового двойника каждого транспортного средства [8]. Используя набор данных, определяется точный участок дороги и полоса движения, которую использует каждое транспортное средство на данном участке.

В разработанном авторами методологическом подходе подразумевается использование высокопроизводительного лидара для сбора данных в виде облака точек с перекрестка. Данные в виде облака точек отправляются на сервер в режиме реального времени. Классификация обнаруженных участников дорожного движения выполняется на отечественной информационной системе ГГК г. Москвы, интегрированной в программно-аппаратную платформу интеллектуального мониторинга трафика, в которой используется аннотированный набор данных на базе искусственного интеллекта и 3D-лидаров (LiDAR). Алгоритм группирует данные облака точек в объекты и определяет их тип (например, легковой автомобиль, автобус, грузовик, пешеход, велосипедист) на основе характеристик формы (таких как длина, ширина, высота), особенностей движения во времени и интенсивности отражения. Этот процесс выполняется в режиме реального времени на встроенной вычислительной системе датчика и не требует ручного вмешательства. Тип объекта возвращается в виде категориального значения в выходном потоке.

На рис. 3 представлена структурно-функциональная схема алгоритма определения локации участников дорожного движения. Это метод геозонирования, где изображен процесс определения точного местонахождения и полосы движения, а также вычисление расстояния участника дороги от начала въезда на перекресток. При точном определении полосы и относительного расстояния положение участника движения может быть определено массивом данных для моделирования и мониторинга. Это позволяет реалистично и динамично представить информацию о движении, что дает возможность детально анализировать и оптимизировать потоки трафика. Данный подход гарантирует, что местоположение каждого участника дорожного движения определяется не произвольными координатами, а значимыми и готовыми к моделированию параметрами, отражающими их реальное положение в виртуальной среде. Этот детальный процесс трансформации является фундаментальным для интеграции LiDAR-данных в

информационную систему ГТК г. Москвы, которая позволяет не только визуализировать, но и эффективно анализировать реальные условия движения.

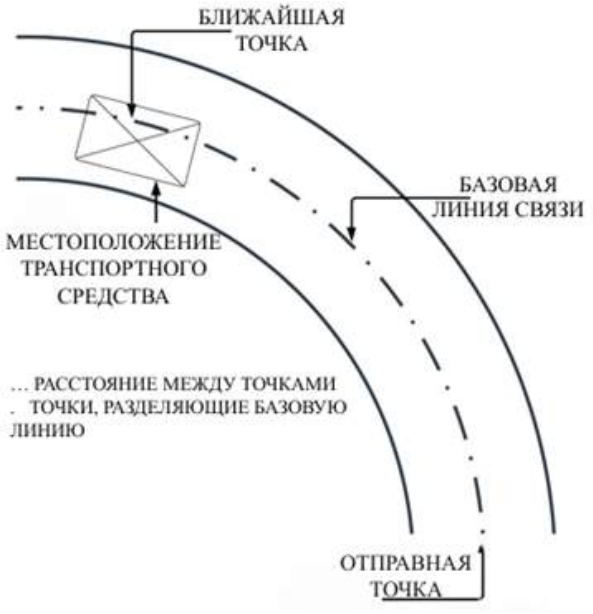


Рис. 3. Концептуальная идея метода геозонирования

Комплексный подход обеспечивает проведение имитационного моделирования дорожного движения для оценки эффективности элементов дорожной инфраструктуры с учетом интегрированной платформы цифровых двойников на базе информационной системы ГГК г. Москвы. Данное решение направлено на комплексный анализ работы перекрестков и оперативное внедрение оптимизационных сценариев в реальную транспортную экосистему [9]. Результаты моделирования дают ценную информацию о работе системы управления светофорами, позволяют проанализировать задержки, транспортные потоки и характер заторов. Традиционное моделирование не может обеспечить контроль всего жизненного цикла в режиме реального времени и передачу данных из-за использования единой модели дорожного движения и ограниченных сценариев моделирования.

В рамках этой методологии преобразование географических координат, полученных с помощью лидара, в формат моделирования позволяет точно определять местоположение участников дорожного движения. Данный метод включает в себя следующие этапы:

1. Сопоставление участков и полос движения. Каждый участок и полоса движения учтены в модели и сопоставляются с соответствующим участком дороги в реальной среде. Данное сопоставление крайне важно для точного отслеживания маршрута каждого участника дорожного движения.

2. Определение ближайшей базовой точки. Базовая линия каждой полосы движения разбивается на множество близко расположенных точек, координаты которых определяются при моделировании. Для каждого транспортного средства, обнаруженного с помощью лидара, алгоритм вычисляет ближайшую базовую точку относительно преобразованного локального положения транспортного средства.

3. Вычисление относительного расстояния. После определения ближайшей точки на базовой линии расстояние от этой точки до начала линии вычисляется путем суммирования расстояний между последовательными точками на базовой линии до ближайшей точки.

По сравнению с традиционными методами сочетание данных с высоким разрешением и технологии цифровых двойников имеет ряд преимуществ при оценке эффективности мониторинга и пропускной способности перекрёстка. Во-первых, использование точных данных, полученных с помощью технологии LiDAR, позволяет лучше понять динамику работы перекрёстка и точнее отслеживать показатели эффективности. Во-вторых, данные поступают в режиме реального времени, что позволяет непрерывно отслеживать и анализировать транспортные потоки, способствуя принятию упреждающих решений в реальных условиях. В-третьих, в отличие от традиционных подходов к имитационному моделированию, предлагаемый подход с использованием цифровых двойников не требует трудоёмких операций по калибровке и может использоваться для создания имитационных моделей. Специалисты по организации дорожного движения, градостроители и транспортные организации могут извлечь значительную пользу из данных, полученных в результате оценки с использованием цифровых двойников, для принятия взвешенных решений по совершенствованию общих стратегий управления дорожным движением, оптимизации времени работы светофоров и улучшения проектирования перекрёстков. При проектировании отдельных элементов транспортной инфраструктуры важно учитывать существующие направления развития [10].

3. Заключение

Развитие транспортной инфраструктуры должно осуществляться сбалансированно с градостроительной деятельностью в поселениях, муниципальных округах, городских округах (на основании программ комплексного развития систем коммунальной, транспортной и социальной инфраструктуры [11]).

Разработка комплексных схем организации дорожного движения для муниципальных образований с численностью населения более 50 тыс. человек и городов федерального значения требует внедрения передовых инструментов цифровизации. Практическая новизна данной работы заключается в разработанной авторами оригинальной методологии построения цифровых двойников для регулируемого дорожного потока, которая, в отличие от существующих статических подходов, обеспечивает автоматизированную трансформацию реальных лидарных данных о траекториях транспортных средств в динамические калибровочные параметры имитационных моделей на базе информационной системы ГГК г. Москвы. Предложенное решение переводит процесс проектирования ИТС из разряда описательных в категорию предиктивных инженерных инструментов, создавая готовую технологическую основу для оперативного прогнозирования заторов и адаптивного управления светофорными объектами в режиме реального времени.

Список использованных источников

1. *Журавлев А. Д., Торопов Н. Ю.* Концептуальные подходы к оценке эффективности функционирования интеллектуальных транспортных систем // Вестник дорожной отрасли. 2024. № 4 (112). С. 28–36.
2. *Якимов М. Р.* Транспортное планирование: создание транспортных моделей крупных городов : монография. Москва : Логос, 2024. 288 с. ISBN 978-5-98704-XXXX-X.
3. *Петров П. П., Сидоров С. С.* Методология построения цифровых двойников регулируемых перекрестков на основе лидарных данных и геоинформационной системы ГГК г. Москвы // Вестник гражданских инженеров. 2025. № 3 (110). С. 114–122.
4. *Макаров И. А.* Инновационные подходы к организации дорожного движения на основе цифровых двойников автомобильных дорог // Компьютерные и информационные науки. 2024. № 2. С. 14-22.
5. *Курбатов Д.С., Старостенко А.В.* Инновационные подходы к организации дорожного движения на основе цифровых двойников автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2025. Т 22, № 5. С. 772-785. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785
6. *Григоренко Н. И., Гутников В. А.* Технологии цифрового двойника портовых систем, в сфере обеспечения безопасности функционирования объекта критической транспортной инфраструктуры // Безопасность в современном мире. 2024. № 4(5). С. 70-83. EDN LVGMPF.
7. Ouster BlueCity: AI-Driven Lidar for Smarter Cities & Traffic Safety|Ouster. Available online: https://ouster.com/products/software/bluecity
8. *Николаев А. Б., Кузнецов В. В.* Алгоритмы координатных преобразований и локализации объектов в цифровых моделях транспортных потоков // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2025. № 4 (86). С. 88-95.

9. *Гузь А. Р., Пальмов С. В.* Цифровой двойник в интеллектуальной транспортной системе // Региональная и отраслевая экономика. 2023. № 1.- С. 112-116. DOI: 10.47576/2949-1916_2023_1_112.
10. *Григоренко Н. И., Гутников В. А.* Влияние комплексной транспортной сети на территориальное пространственное развитие // Современные тенденции развития транспортной отрасли: Материалы III Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 21–22 апреля 2026 года. – Нижний Новгород: ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», 2026. – С. 348-354. – EDN PTLBFX.
11. *Сычугов А. Н., Михейчиков В. Н., Чернышов М. В.* Применение нейронных сетей для распознавания объектов на железнодорожном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2023. Т. 20. Вып. 2. С. 478-491. DOI: 10.20295/1815-588X2023-2-478-491.

DIGITAL TWINS IN URBAN TRANSPORT MONITORING AND MODELLING

Nikolai I. Grigorenko, Ph. D.,
Vladimir A. Gutnikov, Ph. D.
Central Research and Project Institute of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation,
Russia, 119331, Moscow, Vernadsky Avenue, 29
E-mail: gri-nik@mail.ru, lomonosov25@rambler.ru

Abstract. Presented is a modern solution that combines data from high-resolution LiDAR sensors and the state cadastre information system. This technology allows for the adoption of proactive measures to improve safety and reduce disruptions by using all available information on vehicle trajectories and lane changes. Digital twin technology provides unprecedented accuracy in monitoring traffic and infrastructure conditions by combining real data flows with model-based performance analysis. The work aims to solve the current problems of urban transport management with the help of real-time tools and shows the revolutionary impact of new technologies on monitoring intelligent infrastructures.

Keywords: digital duplicate; software; road infrastructure; traffic monitoring.

УДК 656.052.1:004.93
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-691

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ВОСПРИЯТИЯ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Николай Иванович Григоренко, канд. техн. наук
Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации
Россия, 119331, Москва, проспект Вернадского, д. 29
E-mail: gri-nik@mail.ru

Аннотация. Безопасность эксплуатации беспилотного транспорта напрямую зависит от надежности и точности его сенсорных систем. Приведен анализ современных архитектур восприятия автономных транспортных систем, оценка ограничений существующих сенсорных технологий и определение ключевых направлений развития мультисенсорных систем реального времени. Сформулирован комплекс технических требований к сквозному объединению данных и минимизации информационных рисков. Разработанные принципы и требования имеют прямую применимость при проектировании перспективных бортовых комплексов автономного транспорта, а также при создании стандартов и валидационных платформ для интеллектуальных транспортных систем.

Ключевые слова: автономные транспортные средства; сенсорные системы; слияние данных; техническое зрение; искусственный интеллект; калибровка датчиков; функциональная безопасность.

1. Введение

Автономные транспортные средства (АТС) представляют собой одно из наиболее динамично развивающихся технологических направлений в современной транспортной индустрии и соответствуют Стратегии пространственного развития Российской Федерации [1]. В рамках актуальной государственной политики определены ключевые приоритеты научно-технологического развития и сформирован перечень важнейших наукоемких технологий [2]. Развитие автономного транспорта взаимосвязано с развитием технологий, где ключевым направлением выделяется сенсорика. Система восприятия автономного транспорта базируется на сенсорах; их совершенство во многом определяет, насколько безопасно и эффективно транспорт сможет «понимать» окружающую среду. В восприятии окружающей среды задействованы технологические инновации в сфере сбора и обработки данных, встроенные вычислительные системы и искусственный интеллект.

Технологическая совокупность способствует принятию решений по контролю беспилотного транспорта и интерпретации сложных дорожных ситуаций. Взаимодополняемость этих технологий способствует снижению количества аварий из-за человеческого фактора, повышает безопасность на дорогах и оптимизирует трафик.

Объединение информации с различных сенсорных устройств автомобиля позволяет воспринимать образ окружающей среды, способствуя безопасной навигации и эффективному дорожному движению при осуществлении дорожных маневров [3]. Синергия технологий позволяет обеспечивать высокую надежность систем управления за счет аппаратного резервирования, робастного программного обеспечения, непрерывного мониторинга, кибербезопасности и сквозных процедур валидации. Моделирование различных дорожных сценариев, включая редкие ситуации, которые крайне сложно воссоздать при натурных испытаниях, возможно в виртуальной среде на основе алгоритмов автономного вождения.

Для понимания практической реализации подобных комплексов целесообразно изучить архитектуру действующих беспилотных платформ и конфигурации их датчиков. Заметным примером служит концепция компании Tesla. Подход Tesla к автономному вождению принципиально отличается от стратегии большинства других разработчиков, использующих лидары. Компания сделала ставку на систему восприятия, основанную исключительно на техническом зрении (подход Pure Vision) [4]. Современная аппаратная платформа Tesla Full Self-Driving (FSD) опирается на комплекс из восьми камер высокого разрешения, обеспечивающих круговой обзор в 360 градусов и обнаружение объектов на расстоянии до 250 метров (при этом от использования радаров и ультразвуковых датчиков, применявшихся в ранних модификациях, компания полностью отказалась). Для обработки визуального потока в режиме реального времени используются специализированные высокопроизводительные бортовые вычислители с ИИ-ускорителями, способные выполнять более 100 триллионов операций в секунду (TOPS) для логического вывода в нейронных сетях.

Целью исследования является определение ключевых направлений интеграции систем восприятия автономного транспорта в экосистему интеллектуальных транспортных систем (ИТС) для повышения безопасности и эффективности дорожного движения. Проанализированы существующие аппаратные решения и требования к вычислительной мощности для обработки сенсорных данных в реальном времени.

2. Структура организации контроля вычислений

Один из центральных вопросов повсеместного применения беспилотных технологий заключается в том, способны ли автоматизированные системы обеспечить уровень безопасности, сопоставимый с показателями водителя-человека или превосходящий их. Дорожно-транспортные происшествия остаются одной из главных причин травматизма и смертности во всем мире, при этом, по данным профильных исследований, абсолютное большинство аварий обусловлено человеческим фактором. Внедрение автономного транспорта призвано минимизировать данные риски за счет замены человеческого фактора комплексами датчиков и алгоритмами реального времени. Искусственный интеллект (ИИ) выступает сквозной технологией, определяющей функционирование современных систем восприятия и принятия решений. Первым критически важным этапом применения ИИ является распознавание внешней среды. Глубокие нейронные сети обрабатывают сырые данные с сенсоров для детекции и классификации объектов. Если для семантического анализа изображений стандартом стали сверточные нейросети и архитектуры на основе трансформеров, то для интерпретации облаков точек лидаров или радиолокационных сигналов применяются специализированные графовые и трехмерные модели.

Критически важная функция искусственного интеллекта в АТС – прогнозирование поведения участников дорожного движения. На основе искусственного интеллекта происходит сквозная интеграция технологий, способствующих кратному повышению точности восприятия и адаптивности автономного транспорта. В этих условиях возникает необходимость сертификации данных технологий и предъявляются высокие требования к мощности бортовых вычислителей вследствие обеспечения безопасности и интерпретируемости моделей (проблемы «чёрного ящика» ИИ).

Совершенствование уровня безопасности автономного транспорта является ключевым фактором, достигаемым при комплексировании (слиянии) данных от различных сенсоров и их совместной обработке. Для идентификации объектов каждый датчик оснащается изолированным модулем распознавания; на уровне принятия решений происходит объединение этих данных. Сформированные на их основе локальные предположения впоследствии объединяются в общий результат (например, посредством байесовских сетей или алгоритмов, опирающихся на строгие правила) [5].

Производительность алгоритма слияния базируется на высокоточной пространственной калибровке датчиков и их строгой временной

синхронизации. Учитывая, что различные сенсоры имеют индивидуальные задержки передачи сигналов и работают с неодинаковой частотой дискретизации, отсутствие единых временных меток делает корректный синтез данных невозможным. Процесс калибровки традиционно включает три компонента:

1. Внутреннюю калибровку, определяющую собственные параметры сенсора (например, фокусное расстояние и дисторсию объектива камеры).

2. Внешнюю калибровку, устанавливающую взаимное пространственное расположение и ориентацию датчиков в единой системе координат автомобиля.

3. Временную калибровку, корректирующую задержки распространения и обработки сигналов.

Архитектура сквозного комплексирования подразумевает, что сырые или частично обработанные потоки данных с камер, лидаров, радаров и модулей спутниково-инерциальной системы (ГНСС/ИИМ) непрерывно поступают в центральный модуль объединения. Данный модуль производит пространственно-временное сопоставление информации, формируя консистентную динамическую модель окружающей среды, на основе которой алгоритмы верхнего уровня генерируют финальные управляющие команды (рис. 1).

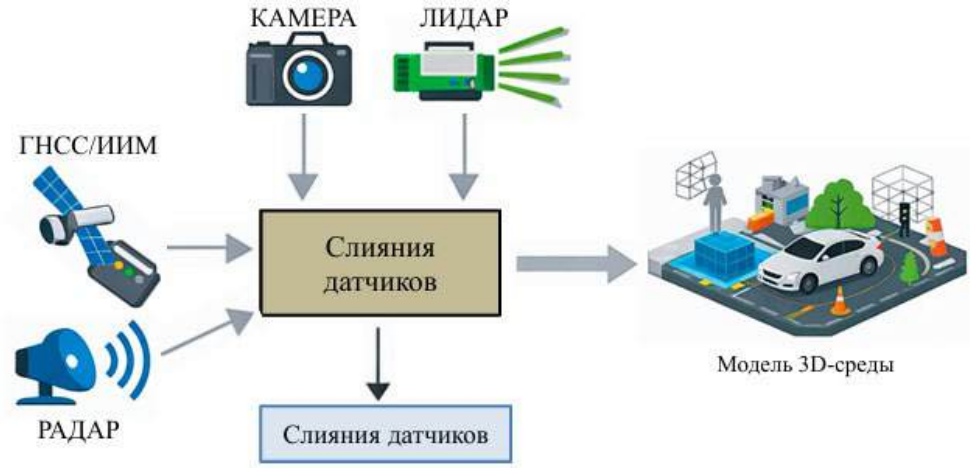


Рис. 1. Архитектура объединения датчиков

Создание надежного беспилотного транспорта возможно при гармонизации сложной экосистемы сенсоров и сквозных алгоритмов обработки данных. Глубокие нейронные сети управляют не только семантической сегментацией сцены, но и комплексированием данных, локализацией, предиктивным анализом и непосредственным контролем траектории [6]. Однако

главным вызовом остается обеспечение детерминированности: функционирование нейросетей по-прежнему компрометируется проблемой «черного ящика». Ввиду этого в фокусе актуальных исследований находятся вопросы объяснимости ИИ, верификации моделей, сертификации безопасности и детекции аномалий в режиме реального времени.

Отказоустойчивость сенсорных компонентов напрямую определяет общую безопасность эксплуатации и уровень доверия пользователей. Приборные погрешности, деградация материалов и агрессивные внешние факторы (термические перепады, вибрационные и механические нагрузки, загрязнение) неизбежно приводят к постепенному дрейфу характеристик оборудования. Внедрение функций встроенного самотестирования, аппаратного резервирования и диагностических алгоритмов позволяет изолировать неисправности до того, как они скомпрометируют контур управления. Соблюдение концепции функциональной безопасности строго предписывает, что любой единичный отказ сенсора не должен приводить к возникновению критических угроз, а должен сопровождаться своевременным обнаружением сбоя, переходом системы в деградированный режим или безопасным прекращением движения [7].

Проектирование датчиков с учетом комплементарности и системного подхода существенно превосходит простое дублирование базовых задач, таких как определение расстояния или захват изображений. Разновидности сенсоров оперируют в совершенно иных информационных пространствах (например, радар измеряет скорость на основе эффекта Доплера). Переход к принципиально новым физическим принципам восприятия ознаменует качественное изменение развития сенсорных технологий. В числе наиболее ожидаемых инноваций следует выделить следующие:

- терагерцовые радары: кратно повышающие угловое разрешение радиолокационных систем в субмиллиметровом и терагерцовом диапазонах (100–300 ГГц) вместо традиционных автомобильных частот 76 – 81 ГГц;
- лидары с частотной модуляцией непрерывного излучения (FMCW) на фотонных чипах позволяют создавать компактные, надёжные и высокопроизводительные системы. Используется принцип частотно-модулированной непрерывной волны, ключевые оптические компоненты интегрированы на одном чипе, что также обеспечивает резкое снижение себестоимости.:
- нейроморфные (событийные) камеры: биомиметические сенсоры зрения, которые фиксируют изменения яркости и контраста отдельно для каждого пикселя в реальном времени;

• квантовые сенсоры и метаматериалы: на основе квантовых эффектов позволяют преодолеть фундаментальные физические ограничения традиционных датчиков (камер, радаров, классических лидаров), обеспечивая точность и надежность в любых погодных условиях.

Формирование обобщённых моделей, отличающиеся высокой адаптивностью, интерпретируемостью и устойчивостью к выбросам или пропущенным значениям в исходных данных, потребоваться мультидоменную интеграцию алгоритмов искусственного интеллекта. Непрерывное обучение в реальном времени и точная синхронизация обеспечивают безопасное автономное перемещение, базирующееся на адаптивной бортовой гибридной архитектуре [8]. На рисунке 2 представлен процесс сквозного комплексирования разнородных данных на системном уровне.



Рис. 2. Слияние данных с различных сенсоров

Согласно представленной схеме, в центральный вычислительный блок восприятия непрерывно поступают данные от первичных датчиков (камер, лидаров, радаров), навигационных модулей (ГНСС/ИИМ) и систем межобъектного взаимодействия (V2X). Каждый сенсор вносит свой вклад в формирование консистентной модели окружающей среды [9]. На основе этих данных модули верхнего уровня (планирования траектории, прогнозирования и выработки управляющих воздействий) обеспечивают безопасное маневрирование автомобиля.

3. Заключение

Представлены исследовательские и ключевые технологические направления по развитию сенсорных систем автономных транспортных средств. В настоящее время универсального сенсорного решения для беспилотного транспорта не существует. Различные сенсоры (камеры, лидары, радары, ультразвуковые датчики и модули локализации) обладают своими преимуществами и ограничениями. Полную семантическую информацию предоставляют камеры, но они критически зависят от освещения и погоды. Обеспечить высокоточное пространственное картографирование способны лидары, но они отличаются высокой стоимостью и уязвимостью к сложным метеоусловиям. К неблагоприятной внешней среде устойчивы радары, но они имеют ограниченное разрешение. Для дальнего радиуса действия ультразвуковые датчики не подходят, но эффективны для обнаружения объектов в ближней зоне. Обеспечить безопасность в динамичной дорожной обстановке только на основе ГЛОНАСС и инерциальных измерительных блоков, применяемых для глобального позиционирования, затруднительно.

В современных обзорах [10] отмечается, что из-за усложнения дорожных сценариев беспилотные автомобили переходят на продвинутые мультисенсорные платформы. Взаимное дополнение различных сенсорных систем лежит в основе проектирования таких платформ. Разнородность физических принципов работы датчиков, сквозное объединение данных из нескольких источников и информационная избыточность позволяют обеспечивать высокий уровень надёжности, необходимый в реальных условиях. Эффективность автономного вождения достигается за счёт синергии разнородных систем, а не преобладания одного типа сенсоров.

Научная новизна работы заключается в теоретическом обосновании перехода к системной концепции вероятностного восприятия на основе байесовского подхода, позволяющей оценивать неопределенность нейросетевых моделей. Практическая значимость определяется возможностью применения сформулированных требований к мультисенсорным платформам при проектировании автономного транспорта и разработке стандартов ИТС.

Практическая актуальность заключается в формировании принципов построения мультисенсорных платформ; требования к сквозному объединению данных и минимизации информационных рисков могут быть непосредственно использованы при проектировании перспективных бортовых комплексов автономного транспорта, а также при разработке стандартов и валидационных платформ для ИТС. В сфере беспилотного вождения задача

распознавания объектов трансформируется из разряда чисто инженерных в междисциплинарную проблему, включающую в себя инновационное развитие искусственного интеллекта, математических алгоритмов, методологий системной безопасности, сенсорных технологий и нормативного регулирования.

Список использованных источников

1. *Лебедева Н. А.* Проблемы и особенности реализации транспортной стратегии Российской Федерации до 2035 года // Научный результат. Экономические исследования. 2022. Т. 9. № 2. С. 74-84. DOI: 10.18413/2409-1634-2022-9-2-0-7.
2. *Иванова Е. В., Петров А. Н.* Приоритеты научно-технологического развития транспортного комплекса в условиях цифровизации // Вестник транспорта. 2025. № 3. С. 12–19.
3. *Григоренко Н. И.* Развитие автономных транспортных средств и обеспечение безопасности в городской среде / Н. И. Григоренко // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса : материалы XII Международной научно-практической конференции в рамках 12-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики, Горловка, 28 мая 2026 года. Горловка : Донецкий национальный технический университет, 2026. С. 213-217. EDN AFVBAU.
4. Описание платформы: Электронный ресурс: Autopilot and Full Self-Driving Capability // Tesla Support. URL: https://tesla.com (дата обращения: 05.09.2026).
5. *Баранов В. А., Круглов Д. М.* Архитектуры и алгоритмы комплексирования информации в мультисенсорных системах автономных транспортных средств // Интеллектуальные системы управления на транспорте. 2024. № 2. С. 34–41.
6. *Буренин В. В., Фролов А. В.* Применение глубоких нейронных сетей в системах управления автономными транспортными средствами // Автоматизация и управление в технических системах. 2023. № 2. С. 45–54.
7. *Федоров А. В.* Методы обеспечения отказоустойчивости мультисенсорных систем автономных транспортных средств в критических режимах движения / А. В. Федоров // Труды НАМИ. 2025. № 3 (298). С. 45–54.
8. *Григоренко Н. И.* Сравнение систем адаптивного круиз-контроля для автономных и управляемых человеком транспортных средств // Транспорт Урала. 2025. № 4(87). С. 85-91. DOI 10.20291/1815-9400-2025-4-85-91. – EDN REBYQV.
9. *Сай С. В., Костюченко Н. С.* Построение пространственной модели среды в системах технического зрения автономных транспортных средств // Информационные технологии и вычислительные системы. 2024. № 1. С. 38-47.
10. *Viktor P., Kiss G.* Multimodal Sensor Fusion in Autonomous Vehicles: Technologies, Architectures, and Open Challenges // Sensors. 2026. Vol. 26, no. 11. P. 3528. DOI: 10.3390/s26113528.

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS VEHICLE PERCEPTION SYSTEMS IN ITS

Nikolai I. Grigorenko, Ph. D.
Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation
Russia, 119331, Moscow, Vernadsky Avenue, 29
E-mail: gri-nik@mail.ru

Abstract. The safety of a self-guided vehicle depends directly on the reliability and accuracy of its sensor systems. The analysis of modern architectures of perception of autonomous transport systems, assessment of limitations of existing sensory technologies and identification of key directions of development of multisensory real-time systems. Formulated a set of technical requirements for cross-border data consolidation and minimization of information risks. Developed principles and requirements are directly applicable in the design of promising autonomous transport on-board complexes, as well as in the creation of standards and validation platforms for intelligent transport systems.

Keywords: autonomous vehicles; sensor systems; data fusion; technical vision; artificial intelligence; sensor calibration; functional safety.

УДК 004.415.2
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-692

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СУДОВОЙ ГРОЗОЗАЩИТЫ

Кристина Юрьевна Петрова,
Ксения Владимировна Катковская
Сибирский государственный университет водного транспорта
Россия, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
E-mail: kristina88petrova@yandex.ru, ksumat@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена задача автоматизации расчёта зон грозозащиты судов в соответствии с отраслевым стандартом «Судовые грозозащитные устройства. Правила и нормы проектирования. ОСТ5Р.6176-87». Проведён анализ существующих программных решений, показавший отсутствие поддержки судовой специфики. Обоснована актуальность разработки, приведены функциональные требования к программе, описан инструментарий реализации и прототип десктопного приложения на языке Python с использованием PySide6 и EasyOCR. Разработанная программа включает модули расчёта зон защиты для различных типов молниеотводов, автоматизированного считывания числовых параметров с чертежей и очистки полей.

Ключевые слова: грозозащита судов; молниеотвод; зоны защиты молниеотводов; распознавание чертежей; разработка десктопного приложения; безопасность судов; визуализация данных.

1. Введение

Актуальность расчёта радиуса зоны защиты обусловлена необходимостью проверки соответствия защищаемой области. В соответствии с приложением 4 «Судовые грозозащитные устройства. Правила и нормы проектирования. ОСТ5^{Р}.6176-87» расчёт зоны грозозащиты выполняется с учётом высоты молниеотводов, высоты защищаемых объектов и расстояний между молниеотводами. Определение радиуса зоны защиты на заданной высоте позволяет установить границы защищаемой области.

Анализ открытых источников показал отсутствие как веб-программ, так и десктопных программ, реализующих расчёт зон грозозащиты применительно к судовым условиям. Существующие продукты (ElectriCS Storm, MS Молниезащита, SparkRisk, DEHNrisk, Calculus и др.) ориентированы на наземные объекты и используют РД 34.21.122-87, СО 153-34.21.122-2003 либо международные стандарты IEC. Судовая специфика в них не учитывается. Это определяет необходимость разработки специализированного программного обеспечения [1 – 3]. Более подробно анализ существующих

программных решений и проектирование программы для расчёта параметров судовой грозозащиты были ранее представлены в другой статье [4].

2. Функциональные требования

Программа предназначена для расчета зон, подлежащих защите от разрядов молнии в соответствии с отраслевым стандартом «Судовые грозозащитные устройства. Правила и нормы проектирования. ОСТ5^{Р}.6176-87».

Для геометрического расчёта зоны защиты стандарт использует следующие исходные величины:

1. h – высота молниеотвода.
2. h_x – высота защищаемой точки.
3. L – расстояние между молниеотводами.
4. h_0 – высота верхней точки зоны.
5. r_0 – радиус зоны на уровне самой высокой точки.
6. r_x – радиус зоны на высоте h_x.

Для одиночного стержневого молниеотвода расчет производится по формулам:

$$h_0 = 0{,}85h,$$
$$r_o = (1{,}1 - 0{,}002h)h,$$
$$r_x = (1{,}1 - 0{,}002h)\left(h - \frac{h_x}{0{,}85}\right). \quad (1)$$

Если на судне два и более молниеотвода, стандарт сначала проверяет их взаимное расположение по условию $L \leq 3h_{min}$. Если условие выполняется, их рассматривают как единую систему. Если нет, каждый молниеотвод рассматривается как отдельный.

Для двух стержневых молниеотводов одинаковой высоты граница общей зоны защиты рассчитывается в зависимости от соотношения расстояния между молниеотводами L и высоты h. Если $L \leq h$, параметры общей зоны совпадают с параметрами одиночного молниеотвода, где: $h_c = h_0$, $r_{cx} = r_x$, $r_c = r_0$. Если $L > h$, высота общей зоны уменьшается согласно формуле: $h_c = h_0 - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h)$, а радиусы вычисляются как: $r_{cx} = \frac{h_c - h_x}{h_c} r_0$ и $r_c = r_0$ соответственно.

Для двух стержневых молниеотводов разной высоты ($h_1 \neq h_2$) сначала определяются параметры зоны каждого молниеотвода как одиночного, а затем рассчитываются обобщённые характеристики совместной зоны по значениям: $r_c = \frac{r_{01} + r_{02}}{2}$, $h_c = \frac{h_{c1} + h_{c2}}{2}$, где h_{c1} и h_{c2} – высоты общей зоны,

вычисленные для каждого молниеотвода по формулам для h_c (при $L \leq h$ принимается $h_c = h_0$, при $L > h$ – по приведённой выше формуле). Радиус совместной зоны на высоте h_x определяется как $r_{cx} = \frac{h_c - h_x}{h_c} r_c$.

В приложении 4 «Судовые грозозащитные устройства. Правила и нормы проектирования. ОСТ5^{Р}.6176-87» (пп. 1.5 – 1.6) рассматривается построение зоны защиты тросовых молниеотводов. Для судна тросовый молниеотвод может применяться для защиты пространства между двумя опорами, например мачтами.

Таким образом, опираясь на приведенные формулы для расчета параметров грозозащиты, можно сформулировать следующие функциональные требования к разрабатываемой программе:

1. Расчёт зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода.
2. Расчёт зоны защиты двух стержневых молниеотводов одинаковой высоты.
3. Расчёт зоны защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты.
4. Расчёт зоны защиты одиночного тросового молниеотвода.
5. Расчёт зоны защиты двойного тросового молниеотвода.
6. Обратный расчёт одиночного стержневого молниеотвода.
7. Автоматизированное считывание числовых параметров с чертежей.
8. Очистка полей и результатов расчёта.

Перечисленные функции выбираются из выпадающего списка, после чего динамически появляются соответствующие поля для ввода. При нажатии кнопки «Рассчитать» запускается алгоритм:

1. Проверка входных данных на положительность.
2. Выполнение вычислений по формулам стандарта.
3. Отображение текстовых формул с HTML-разметкой в блоке «Используемые формулы».
4. Вывод численных результатов с точностью до трёх знаков в блоке «Расчёт значения».

При отрицательных значениях радиусов (r_0, r_x, r_c, r_{cx} и т. п.) результаты выделяются красным цветом с пояснением «Недостаточная защита (радиус отрицательный)». Если не выполняется условие $L \leq 3h_{min}$, выводится предупреждение.

3. Инструментарий разработки

Для создания приложения был выбран язык программирования Python версии 3.13. Выбор десктопного приложения (вместо веб-версии)

обусловлен необходимостью работы с локальными файлами (чертежами) и отсутствием требований к удалённому доступу [5].

Python – это мультипарадигменный высокоуровневый язык программирования общего назначения с динамической строгой типизацией и автоматическим управлением памятью. Он ориентирован на повышение производительности разработчика, читаемости кода и его качества, а также на обеспечение переносимости написанных на нём программ [6]. Он является самым популярным языком программирования согласно многим индексам программирования [7].

Для построения интерфейса использована библиотека PySide6 (фреймворк Qt), позволяющая создавать сложные пользовательские интерфейсы с множеством виджетов и работать с графикой. Применение таблиц стилей Qt Style Sheets (синтаксис, близкий к CSS) дало возможность единообразно оформить все элементы приложения.

Для распознавания чисел с чертежей применена библиотека EasyOCR – современное решение с открытым исходным кодом, поддерживающее русский и английский языки. Извлечение чисел из распознанного текста выполняется с помощью регулярных выражений. Данная библиотека – эффективное решение для разнообразных датасетов, показывающее высокую точность, как для искаженных, так и неискаженных текстов [8]. Для численных расчётов используется библиотека NumPy (в частности, при решении квадратного уравнения в обратной задаче) [9].

4. Прототип программы

Разработка включала этапы анализа требований, проектирования архитектуры на основе методологии SADT, реализации, интеграции и документирования [10].

В ходе работы были созданы три основных модуля:

1. Расчёт значений по грозозащите. Реализованы шесть типов расчёта, перечисленных в разделе 2. Динамическое построение формы (dynamic_form) создаёт поля ввода в зависимости от выбранного типа. Вычисления выполняются в методе calculate_value с обработкой исключительных ситуаций (отрицательные высоты, деление на ноль, нечисловой ввод) [11].

2. Вставка рисунка для автоматизированного считывания. Модуль insert_diagram предназначен для автоматического считывания числовых параметров с чертежей судна. Пользователь нажимает кнопку

«Вставить схему», выбирает файл изображения (PNG, JPG, BMP). С помощью EasyOCR производится распознавание текста, из которого регулярными выражениями извлекаются числа. Они последовательно подставляются в поля ввода в порядке отображения на форме. Если распознано меньше чисел, чем полей, заполняются только первые поля; если больше – лишние игнорируются. После успешного заполнения автоматически выполняется расчёт.

3. Очистка. Кнопка «Очистить» сбрасывает все поля ввода, очищает блоки с формулами и результатами, возвращая интерфейс к исходному состоянию.

Результат представлен на рисунках 1, 2 и 3.

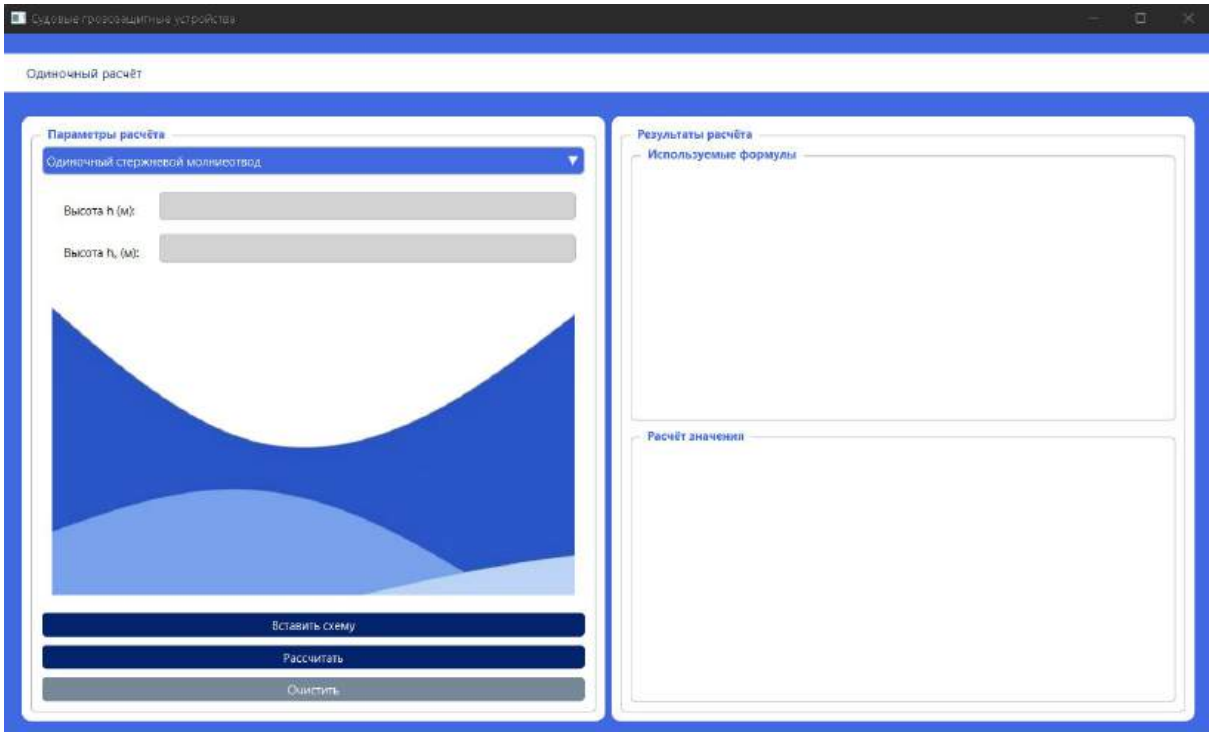


Рис. 1. Окно до ведения значений

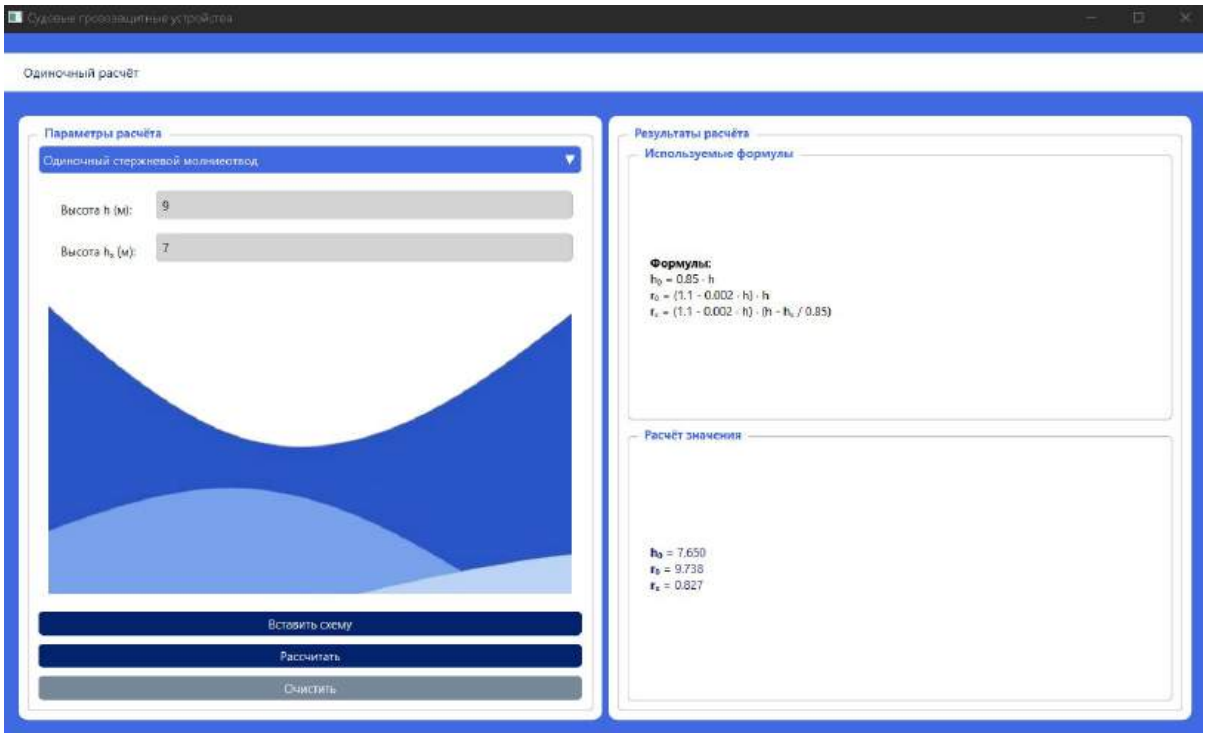


Рис. 2. Нажатие на кнопку «РАССЧИТАТЬ»

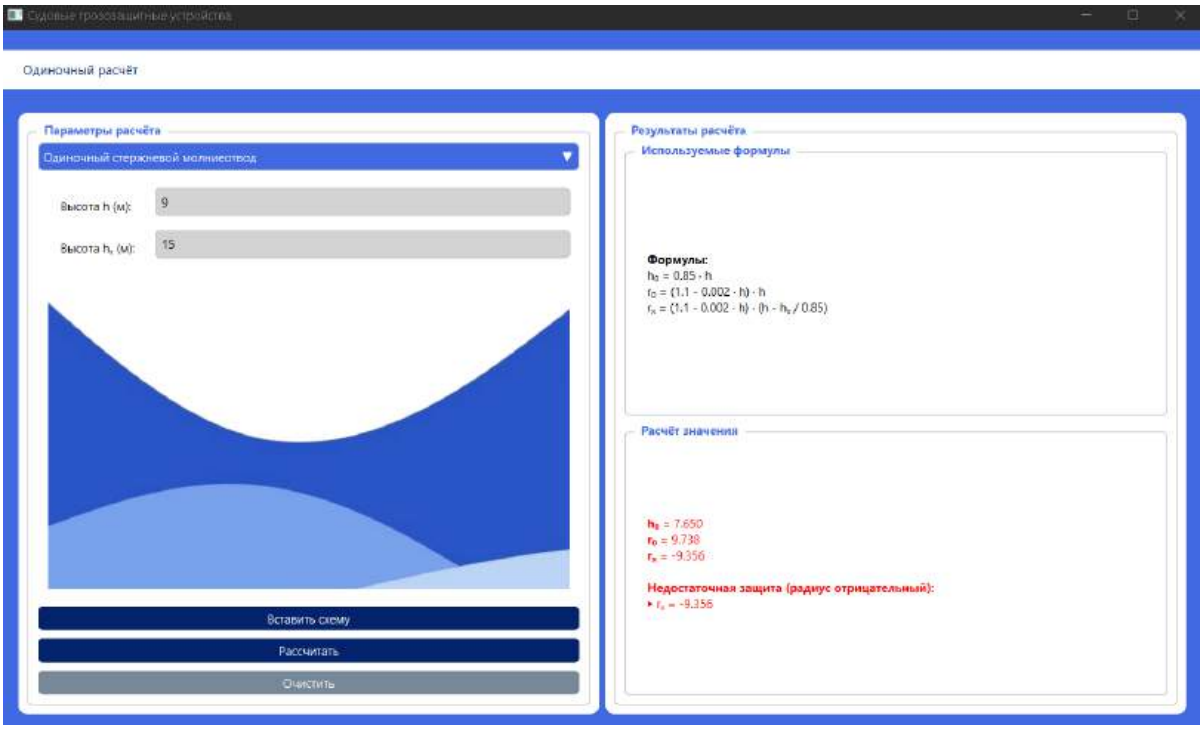


Рис. 3. Отображение ошибки из-за отрицательного радиуса

5. Заключение

В ходе работы была решена задача автоматизации расчёта параметров судовой грозозащиты в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ5^{Р}.6176-87.

В процессе разработки программы были сформулированы и реализованы функциональные требования, включающие шесть типов расчёта: для одиночного стержневого молниеотвода, обратный расчёт, для двух стержневых молниеотводов одинаковой и разной высоты, а также для одиночного и двойного тросовых молниеотводов. Разработанная программа включает три основных модуля: расчёт значений, вставку рисунка для автоматизированного считывания и очистку полей. Стоит отметить, что также было проведено ручное самостоятельное тестирование на корректность вычислений и обработку исключительных ситуаций.

В настоящее время завершается разработка модуля множественного расчёта. Данный модуль позволит добавлять произвольное количество стержневых и тросовых молниеотводов с указанием их координат и высот, задавать защищаемую область в виде прямоугольника на заданной высоте hx, выполнять расчёт защищённых и незащищённых точек с заданным шагом сетки и визуализировать результаты в графическом виде. В последующих статьях планируется описать архитектуру и алгоритмы этого модуля.

Список использованных источников

1. *Сотникова Ю. В.* К вопросам безопасности на объектах водного транспорта // NB: Административное право и практика администрирования. – 2024. – С. 29–43.
2. *Гринев А. С.* Об индуцированных перенапряжениях на металлических частях маломерной парусной яхты с неметаллическим корпусом в морских и пресных водах при близких ударах молнии в воду // Пути повышения результативности современных научных исследований: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак, 2023. С. 112–120.
3. *Ротанов А.* Эволюция российских зон молниезащиты // Вести в электроэнергетике. 2021. № 2 (112). С. 36–50.
4. *Петрова К. Ю.* Проектирование информационной системы для расчета параметров судовой грозозащиты // Сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса, состоявшегося 7 сентября 2026 г. в г. Петрозаводске. Петрозаводск, 2026. С. 13–21.
5. *Гурбангылыева М. Б.* Языки программирования – какими бывают и какой выбрать // Символ науки. – 2023. – С. 40–42.

6. Python // Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Python?ysclid=mt43ln1e1a456280465.
7. *Гайнутдинов В. Р.* Python – хороший выбор в качестве первого языка программирования // Лучшие научные проекты и исследования 2022: сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса. Пенза, 2022. С. 30–32.
8. *Литвинов Н. А., Аксёнов Р. В.* Сравнительный анализ инструментов для решения задачи распознавания текста // Искусственный интеллект и машинное обучение: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Новочеркасск, 2024. С. 58–64.
9. *Гараджаева С. А., Овездурдыева И. К.* Введение в модуль NumPy. Основы работы с Pandas. Разведывательный анализ данных // Наука и мировоззрение. – 2025. – С. 1–7.
10. *Железнов Э. Г., Соклакова С. Ю., Цымай Ю. В., Комиссаров П. В.* Моделирование производственных процессов транспортного предприятия с использованием SADT-технологий // Russian Journal of Logistics & Transport Management. – 2021. – Т. 6. – № S. – С. 43–47.
11. *Асадуллин Р. М., Копылов Я. К.* Важность проектирования идентичного интерфейса кроссплатформенного приложения // Вестник науки. – 2025. – С. 372–377.

DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF LIGHTNING PROTECTION

Kristina Y. Petrova
Kseniya V. Katkovskaya
Siberian State University of Water Transport
Russia, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33
E-mail: kristina88petrova@yandex.ru, ksumat@mail.ru

Abstract. The article examines the task of automating the calculation of ship lightning protection zones in accordance with the industry standard “Ship lightning protection devices. Design rules and standards. OCT5P.6176-87”. An analysis of existing software solutions was carried out, which showed that they do not support ship-specific requirements. The relevance of the development is substantiated; the functional requirements for the program are presented; the implementation tools and a prototype of a desktop application in Python using PySide6 and EasyOCR are described. The developed program includes modules for calculating protection zones for various types of lightning rods, automated reading of numerical parameters from drawings, and clearing of fields.

Keywords: lightning protection of ships; lightning rod; lightning rod protection zones; feature recognition; desktop application development; ship safety; data visualization.

Методы синтеза устройств и систем управления на транспорте

УДК 681.518.5+004.052.32
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-693

САМОПРОВЕРЯЕМЫЕ ТЕСТЕРЫ КОМПОЗИЦИИ РАВНОВЕСНЫХ КОДОВ «1 ИЗ 5» И «4 ИЗ 5»

Дмитрий Викторович Ефанов, д-р техн. наук
Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Аннотация. При синтезе самопроверяемых дискретных устройств могут эффективно применяться композиции равновесных кодов. Одной из таких композиций является композиция кодов «1 из 5» и «4 из 5». Она обладает уникальным свойством, присущим не всем композициям равновесных кодов, – кодовые слова данной композиции могут быть разбиты на пары ортогональных по всем разрядам. Это свойство позволяет применять их при синтезе схем встроенного контроля по нескольким диагностическим признакам, включая самодвойственность вычисляемых функций. В настоящей статье разработаны некоторые тестеры композиций равновесных кодов «1 из 5» и «4 из 5», использование которых на практике позволяет осуществлять контроль вычислений по ним.

Ключевые слова: самопроверяемые дискретные устройства; схемы встроенного контроля; равновесные коды; композиция равновесных кодов «1 из 5» и «4 из 5», самодвойственные булевы функции.

1. Введение

Одним из направлений в теории синтеза самопроверяемых дискретных устройств, применяемых в различных отраслях экономики, включая транспортные приложения, является использование двоичных равномерных избыточных кодов в качестве основ для построения схем встроенного контроля (СВК) [1 – 3]. Дискретное устройство комбинационного типа, на входы которого подаются наборы значений аргументов $<X> = <x_t\, x_{t-1}\, \ldots\, x_2\, x_1>$, на каждом из которых формируются значения булевых функций $f_m(X), f_{m-1}(X), \ldots, f_2(X), f_1(X)$, снабжается СВК, правила синтеза которой однозначно определяются правилами построения выбранного кода и элементной базой. Фактически на выходах исходного устройства – объекта диагностирования – генерируются кодовые векторы $<f_m(X)\, f_{m-1}(X)\, \ldots\, f_2(X)\, f_1(X)>$. Неисправности, возникающие в объекте

диагностирования, влияют на значения разрядов кодового вектора, вызывая в них ошибки. СВК строится таким образом, чтобы можно было зафиксировать эти ошибки и сформировать контрольный сигнал на выходах.

Часто при синтезе СВК используют равномерные коды с малой избыточностью, ориентированные на обнаружение ошибок в информационных символах, а не на их коррекцию [4, 5]. Это обусловлено целями организации контроля вычисления, а не исправления ошибок [1]. Существуют и приложения равномерных кодов для создания отказоустойчивых дискретных устройств, однако не будем заострять на них внимание читателя [6].

Весьма популярными являются равновесные коды, или коды «r из n» (r/n-коды), где r – число значащих разрядов, а n – общее количество символов в кодовых словах. Они обсуждались еще в работе Фреймана 1962 года, как коды, эффективные при передаче данных по асимметричным каналам связи [7]. Равновесные коды являются неразделимыми, т. е. в них невозможно отделить информационные символы от проверочных. Равновесные коды обнаруживают любые однонаправленные (монотонные) ошибки в кодовых словах, поэтому их применяют при синтезе СВК как раз для контроля вычислений по подмножествам монотонно независимых выходов [8, 9]. Возможен учет и еще одного свойства равновесных кодов, заключающегося в том, что ими обнаруживаются также любые разнонаправленные ошибки, в которых число искажений значащих разрядов не равно числу искажений не значащих разрядов (асимметричные ошибки) [10].

Известно большое количество модификаций равновесных кодов. Например, известная модификация Бордена [11]. Свойства кодов Бордена в СВК для дискретных устройств изучены автором настоящей статьи в [12]. Однако для определенных приложений равновесных кодов при синтезе СВК с контролем нескольких диагностических признаков, среди которых самодвойственность булевых функций, формируемых в СВК [13], требуется особая модификация. Код должен содержать четное количество кодовых слов, разбиваемых на пары ортогональных по всем разрядам кодовых слов (на пары инверсных комбинаций). К таким среди равновесных относятся коды вида $r/2r$ (1/2, 2/4, 3/6, и т. д.). Исследования автора настоящей статьи привели к тому, что из двух равновесных кодов можно образовать новый код, обладающий требуемым свойством. Это сделать можно, например, путем объединения кодовых слов кодов $1/n$ и $(n–1)/n$. Такие коды были названы композицией равновесных кодов [14].

Поскольку не удалось найти эффективных методов синтеза тестеров композиций равновесных кодов даже в таких известных монографиях, посвященных исключительно методам синтеза тестеров, как [15, 16], в настоящей работе предложены некоторые из них для тестера композиции равновесных кодов 1/5 и 4/5.

2. Композиция равновесных 1/5 и 4/5 кодов

Композиция равновесных кодов 1/5 и 4/5 содержит 10 кодовых слов, перечисленных в таблице. Каждому кодовому слову 1/5-кода соответствует кодовое слово 4/5-кода, ортогональное по всем разрядам. Особенностью такой композиции равновесных кодов является то, что ею не обнаруживается как часть монотонных ошибок, так часть разнонаправленных с одинаковым и разным числом искажений значащих и не значащих разрядов (симметричных и асимметричных ошибок).

Кодовые слова композиции 1/5 и 4/5 кодов

Кодовое слово	**Конъюнкция**	**Кодовое слово**	**Конъюнкция**
1/5-код		4/5-код	
00001	$\overline{x_5}\,\overline{x_4}\,\overline{x_3}\,\overline{x_2}\,\overline{x_1}$	01111	$\overline{x_5}\,x_4 x_3 x_2 x_1$
00010	$\overline{x_5}\,\overline{x_4}\,\overline{x_3}\,\overline{x_2}\,x_1$	10111	$x_5\,\overline{x_4}\,x_3 x_2 x_1$
00100	$\overline{x_5}\,\overline{x_4}\,x_3\,\overline{x_2}\,\overline{x_1}$	11011	$x_5 x_4\,\overline{x_3}\,x_2 x_1$
01000	$\overline{x_5}\,x_4\,\overline{x_3}\,\overline{x_2}\,\overline{x_1}$	11101	$x_5 x_4 x_3\,\overline{x_2}\,x_1$
10000	$x_5\,\overline{x_4}\,\overline{x_3}\,\overline{x_2}\,\overline{x_1}$	11110	$x_5 x_4 x_3 x_2\,\overline{x_1}$

Общее количество необнаруживаемых ошибок равно $\left(C_5^1 + C_5^4\right)\left(C_5^1 + C_5^4 - 1\right) = 10 \cdot 9 = 90$. Всего же возможно $\left(C_5^1 + C_5^4\right)\left(2^5 - 1\right) = 10 \cdot 31 = 310$ ошибок каждого кодового слова данной композиции, т. е. 29 % ошибок оказываются необнаруживаемыми. Ввиду того, что в классы необнаруживаемых входят любые виды ошибок, композицию равновесных кодов 1/5 и 4/5 можно применять при выделении групп монотонно и асимметрично независимых выходов с ограничениями. Например, кратности монотонных ошибок для данной композиции равновесных кодов d=3, а асимметричных – d=5.

3. Синтез тестеров композиции равновесных 1/5 и 4/5 кодов

Важным вопросом использования композиции равновесных кодов 1/5 и 4/5 при синтезе СВК является разработка самопроверяемого тестера. Как

отмечено выше, автор настоящей работы не смог найти эффективных методов синтеза тестеров данной модификации в научной литературе.

Синтезируем самопроверяемый тестер композиции 1/5 и 4/5 кодов. Следует учесть, что тестер должен иметь два выхода $z^0(X)$ и $z^1(X)$, где $<X> = <x_5\, x_4\, x_3\, x_2\, x_1>$. В противном случае, при наличии только одного выхода у тестера, реализация не будет самопроверяемой, так как не будут обнаруживаться неисправности элементов выходного каскада [15]. На выходах тестера формируется парафазный сигнал <01> или <10>, если на его входы поступает кодовое слово, принадлежащее композиции 1/5 и 4/5 кодов, и непарафазный сигнал <00> или <11>, если на его входы поступает кодовое слово, не принадлежащее композиции 1/5 и 4/5 кодов, или же имеются внутренние неисправности структуры.

Простейшим способом синтеза тестера композиции 1/5 и 4/5 кодов является его реализация по дизъюнктивной совершенной нормальной форме функций, описывающих выходы. Это требует разделения элементарных конъюнкций, соответствующих кодовым словам, представленным в таблице 1, без повторений на два подмножества и объединения их знаками дизъюнкций. Например, таким способом:

$$\begin{aligned} z^0(X) &= \overline{x_5 x_4 x_3 x_2 x_1} \vee \overline{x_5 x_4 x_3 x_2}\,\overline{x_1} \vee \overline{x_5 x_4 x_3}\,\overline{x_2 x_1} \vee \overline{x_5 x_4}\,\overline{x_3 x_2 x_1} \vee x_5\,\overline{x_4 x_3 x_2 x_1}, \\ z^1(X) &= \overline{x_5} x_4 x_3 x_2 x_1 \vee x_5 \overline{x_4} x_3 x_2 x_1 \vee x_5 x_4 \overline{x_3} x_2 x_1 \vee x_5 x_4 x_3 \overline{x_2} x_1 \vee x_5 x_4 x_3 x_2 \overline{x_1}. \end{aligned} \qquad (1)$$

Ясно, что таким образом можно разделить конъюнкции, соответствующие кодовым словам композиции 1/5 и 4/5 кодов, большим количеством способом. Для образования функции $z^0(X)$ можно использовать $\sum_{i=1}^{9} C_{10}^i = 2^{10} - 2 = 1022$ способа выбора различного числа конъюнкций. Для $z^1(X)$ он будет единственным. Таким образом, при поступлении на входы тестера кодового слова, принадлежащего композиции 1/5 и 4/5 кодов, всегда будет формироваться парафазный сигнал. В остальных случаях он не будет парафазным.

Тестеры композиции 1/5 и 4/5 кодов, реализуемые по формуле (1) и ее аналогам, будут иметь одни из самых высоких показателей сложности технической реализации.

При реализации тестера композиции 1/5 и 4/5 кодов можно использовать симметричные булевы функции [17]. Симметричная булева функция $s_p(x_1, x_2, ..., x_t)$ – это функция, значение которой не зависит от перестановки аргументов, а зависит только от количества *p* единичных аргументов.

Ниже приведены симметричные функции от *t* аргументов:

$$\begin{aligned}
&\tau_0 = 1,\\
&\tau_1 = x_1 \vee x_2 \vee ... \vee x_t,\\
&\tau_2 = x_1x_2 \vee x_1x_3 \vee ... \vee x_{t-1}x_t,\\
&...\\
&\tau_t = x_1x_2 \cdot ... \cdot x_t,\\
&\tau_{t+1} = 0.
\end{aligned} \tag{2}$$

Хорошо известно такое положение [17].

Теорема. Любая симметричная булева функция $s_p(x_1, x_2, ..., x_t)$ может быть представлена в виде:

$$s_p(x_1, x_2, ..., x_t) = \tau_p \overline{\tau_{p+1}}. \tag{3}$$

Используя (3) для двух симметричных функций, составленных для множества кодовых слов 1/5-кода отдельно и 4/5-кода отдельно, можно синтезировать тестер их композиции. В соответствии с (3) функции будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
&z^0(X) = s_1(X) = \tau_1\overline{\tau_2} = (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4)\overline{x_1x_2 \vee x_1x_3 \vee x_1x_4 \vee x_2x_3 \vee x_2x_4 \vee x_3x_4},\\
&z^1(X) = s_3(X) = \tau_4\overline{\tau_5} = (x_1x_2x_3x_4 \vee x_1x_2x_3x_5 \vee x_1x_2x_4x_5 \vee x_1x_3x_4x_5 \vee x_2x_3x_4x_5)\overline{x_1x_2x_3x_4x_5}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Реализация самопроверяемого тестера композиции 1/5 и 4/5 кодов по формуле (4) оказывается также довольно сложной.

Более простая реализация достигается за счет использования скобочной формы при особой группировке конъюнкций, соответствующих кодовым словам композиции 1/5 и 4/5 кодов. Выполним следующие действия. Объединим первую и вторую конъюнкции, а также девятую и десятую конъюнкции из таблицы 1, вынеся общие множители за скобки:

$$\begin{aligned}
&\left(\overline{x_5x_4x_3x_2}x_1 \vee \overline{x_5x_4x_3}x_2\overline{x_1}\right) \vee \left(x_5x_4x_3\overline{x_2}x_1 \vee x_5x_4x_3x_2\overline{x_1}\right) =\\
&= \overline{x_5x_4x_3}\left(\overline{x_2}x_1 \vee x_2\overline{x_1}\right) \vee x_5x_4x_3\left(\overline{x_2}x_1 \vee x_2\overline{x_1}\right) =\\
&= \left(\overline{x_2}x_1 \vee x_2\overline{x_1}\right)\left(\overline{x_5x_4x_3} \vee x_5x_4x_3\right) = (x_1 \oplus x_2)\left(\overline{x_5x_4x_3} \vee x_5x_4x_3\right).
\end{aligned} \tag{5}$$

Аналогично поступим с третьей и четвертой, а также с седьмой и восьмой конъюнкциями из таблицы 1:

$$\begin{aligned}
&\left(\overline{x_5x_4}x_3\overline{x_2x_1} \vee \overline{x_5}x_4\overline{x_3x_2x_1}\right) \vee \left(x_5\overline{x_4}x_3x_2x_1 \vee x_5x_4\overline{x_3}x_2x_1\right) =\\
&= \overline{x_5x_2x_1}\left(\overline{x_4}x_3 \vee x_4\overline{x_3}\right) \vee x_5x_2x_1\left(\overline{x_4}x_3 \vee x_4\overline{x_3}\right) =\\
&= \left(\overline{x_4}x_3 \vee x_4\overline{x_3}\right)\left(\overline{x_5x_2x_1} \vee x_5x_2x_1\right) = (x_3 \oplus x_4)\left(\overline{x_5x_2x_1} \vee x_5x_2x_1\right).
\end{aligned} \tag{6}$$

Остались не задействованы конъюнкции номер пять и шесть. Объединим их с конъюнкциями номер четыре и семь аналогично тому, как это было сделано выше:

$$\begin{gathered}\left(x_5\overline{x_4x_3x_2x_1}\vee\overline{x_5}x_4\overline{x_3x_2x_1}\right)\vee\left(\overline{x_5}x_4x_3x_2x_1\vee x_5\overline{x_4}x_3x_2x_1\right)=\\=\overline{x_3x_2x_1}\left(\overline{x_5}x_4\vee x_5\overline{x_4}\right)\vee x_3x_2x_1\left(\overline{x_5}x_4\vee x_5\overline{x_4}\right)=\\=\left(x_5\oplus x_4\right)\left(\overline{x_3x_2x_1}\vee x_3x_2x_1\right).\end{gathered}\qquad(7)$$

Помня, что одна и та же конъюнкция не должна входить в обе функции $z^0(X)$ и $z^1(X)$, образуем эти функции так: в функцию $z^0(X)$ включим только выражение (5), а в функцию $z^1(X)$ – оба выражения (6) и (7). Получим такие функции, описывающие выходы тестера:

$$\begin{gathered}z^0(X)=\left(x_1\oplus x_2\right)\left(\overline{x_5x_4x_3}\vee x_5x_4x_3\right),\\z^1(X)=\left(x_3\oplus x_4\right)\left(\overline{x_5x_2x_1}\vee x_5x_2x_1\right)\vee\left(x_5\oplus x_4\right)\left(\overline{x_3x_2x_1}\vee x_3x_2x_1\right).\end{gathered}\qquad(8)$$

Реализованный по формулам (8) тестер композиции 1/5 и 4/5 кодов будет проще, чем реализованные по формулам (1) и (4) тестеры.

Описанный метод синтеза тестеров позволяет реализовать также некоторое количество самопроверяемых тестеров композиции 1/5 и 4/5 кодов, поскольку могут быть объединены различные конъюнкции с соответствующими парами. Первую четверку можно выбрать $C_5^2=10$ способами. Вторую четверку – $C_{5-2}^2=3$ способами. Последнюю – единственным способом. Итого, существует 30 способов синтеза самопроверяемых тестеров композиции 1/5 и 4/5 кодов по рассмотренному методу в соответствии с формулами (8) и их аналогами.

4. Заключение

При синтезе самопроверяемых дискретных устройств с контролем вычислений по нескольким диагностическим признакам могут эффективно использоваться композиции равновесных кодов вида 1/*n* и (*n*–1)/*n* [14], например, рассмотренная в настоящей работе композиция 1/5 и 4/5 кодов. Несмотря на более чем полувековую историю равновесных кодов, автору данной работы не удалось найти упоминаний о рассматриваемых композициях кодов. Поэтому не нашлось и эффективных методов синтеза их тестеров. В беседе с известным специалистом по синтезу тестеров разделимых блоковых кодов, в том числе, равновесных, д-ром техн. наук, профессором Валерием Владимировичем Сапожниковым, выяснилось, что им, его коллегами

и учениками в свое время не исследовались рассматриваемые композиции. Однако использование рассматриваемой композиции равновесных кодов на практике может позволить перейти к синтезу самопроверяемых структур с более высокими показателями тестопригодности [18, 19]. В настоящей статье описано три метода синтеза самопроверяемых тестеров композиции 1/5 и 4/5 кодов. При этом для полной проверки каждого из получаемых тестеров потребуется подача полного множества кодовых слов композиции 1/5 и 4/5 кодов. Это следует учитывать при использовании тестеров композиции 1/5 и 4/5 кодов при синтезе самопроверяемых дискретных устройств.

При использовании композиции 1/5 и 4/5 кодов следует учитывать и тот факт, что ими не обнаруживается некоторая доля и однонаправленных и разнонаправленных ошибок. Как отмечено в работе, монотонные необнаруживаемые данным кодом ошибки имеют кратности d=3, а асимметричные – d=5. Это необходимо учитывать при организации контроля вычислений на подмножествах выходов объектов диагностирования.

Дальнейшие исследования в области синтеза именно тестеров композиций равновесных кодов могут быть сосредоточены на поиске методов, дающих более простые структуры тестеров, что позволит использовать данные коды гораздо эффективнее, чем классические равновесные. Кроме того, важным направлением является синтез тестеров на различной элементной базе, в том числе, широко используемой в настоящее время базе программируемых логических интегральных схем. Также интерес представляет развитие методов синтеза самопроверяемых дискретных устройств с применением композиций равновесных кодов.

Совершенствование методов синтеза самодиагностируемых и самопроверяемых дискретных структур является важным кирпичиком в плотной стене методов синтеза высоконадежных и безопасных систем управления ответственными технологическими процессами.

Список использованных источников

1. *Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М.: Радио и связь, 1989, 208 с.
2. *Lala P. K.* Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design. – San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 216 p.
3. *Ефанов Д. В.* Методы синтеза самопроверяемых дискретных устройств. – М.: ЛЕНАНД, 2025, 268 с.

4. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 1: Классические коды Бергера и их модификации. – М.: Наука, 2020, 383 с.
5. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 2: Взвешенные коды с суммированием. – М.: Наука, 2021, 455 с.
6. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Отказоустойчивые структуры цифровых устройств на основе логического дополнения // Автоматика и телемеханика. – 2021. – №8. – С. 140-158. – DOI: 10.31857/S0005231021080079.
7. *Freiman C. V.* Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels // Information and Control. – 1962. – Vol. 5. – Issue 1. – Pp. 64-71. – DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
8. *Saposhnikov V. V., Morosov A., Saposhnikov Vl. V., Göessel M*. A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1998. – Vol. 12. – Issue 1-2. – Pp. 41-53. – DOI: 10.1023/A:1008257118423.
9. *Matrosova A. Yu., Levin I., Ostanin S. A.* Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead // VLSI Design. – 2000. – Vol. 11. – Issue 1. – Pp. 47-58. – DOI: 10.1155/2000/46578.
10. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Условия обнаружения неисправности логического элемента в комбинационном устройстве при функциональном контроле на основе кода Бергера // Автоматика и телемеханика. – 2017. – №5. – С. 152-165.
11. *Borden J. M.* Optimal Asymmetric Error Detecting Codes // Informational and Control. – 1982. – Vol. 53. – Issue 1-2. – Pp. 66-73. – DOI: 10.1016/S0019-9958(82)91125-1.
12. *Ефанов Д. В.* Особенности обнаружения ошибок кодами Бордена // Электронное моделирование. – 2019. – Том 41. – №6. – С. 49-64. – DOI: 10.15407/emodel.41.06.049.
13. *Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Пивоваров Д. В.* Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах на основе самодвойственного дополнения до равновесных кодов // Труды Института системного программирования РАН. – 2019. – Том 31. – №1. – С. 115-132. – DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8.
14. *Ефанов Д. В.* Композиции двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам комбинациями для синтеза самопроверяемых дискретных устройств // Проблемы управления. – 2025. – №3. – С. 49-62.
15. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.* Самопроверяемые дискретные устройства. – СПб: Энергоатомиздат, 1992, 224 с.
16. *Piestrak S. J.* Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. – Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
17. *Поспелов Д. А.* Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1968, 328 с.
18. *Efanov D. V., Yelina Y. I.* On the Compositions of Constant-Weight Codes for the Synthesis of Self-Checking and Controllable Digital Devices // Proceedings of 21st IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2025), Tbilisi, Georgia, 05-08 December 2025, pp. 1-10, doi: 10.1109/EWDTS67441.2025.11303696.

19. *Efanov D. V., Yelina Y. I., Boltayev S. T., Aripov N. M., Azizov A. R., Ametova E. K., Valiev S. I.* Design of Self-Checking Discrete Devices Based on Boolean Signals Correction and Composition of Constant-Weight Codes // IEEE Access. – 2026. – Vol. 14. – Pp. 42924 – 42942. – DOI: 10.1109/ACCESS.2026.3670019.

SELF-CHECKING CHECKERS OF «1-OUT-OF-5» AND «4-OUT-OF-5» CONSTANT-WEIGHT CODES COMPOSITION

Dmitry V. Efanov, D. Sc.
Solomenko Institute of Transport Problems, Russian Academy of Sciences
Russia, 199178, St. Petersburg, 12th line of Vasilievsky Island, 13

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnicheskaya st., 29B
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Abstract. In the design of self-checking discrete devices, constant-weight codes composition can be effectively used. One of such compositions is the «1-out-of-5» and «4-out-of-5» constant-weight codes composition. This composition has a unique property – code words can be divided into pairs orthogonal in all bits. This property allows them to be used in the concurrent error-detection circuit synthesis for several diagnostic features, including self-duality of the calculated complements. In this paper, some of «1-out-of-5» and «4-out-of-5» constant-weight codes composition checker are developed, the use of which in practice allows for the control of calculations on them.

Keywords: self-checking discrete devices; concurrent error-detection circuit; constant-weight codes; «1-out-of-5» and «4-out-of-5» constant-weight codes composition, self-dual Boolean complements.

УДК 004.052.32+681.518.5
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-694

О САМОПОДОБИИ КОНТРОЛЬНЫХ ГРУПП МОДУЛЬНОГО ВЗВЕШЕННОГО КОДА

Есения Игоревна Елина
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, лит. Б

Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13
E-mail: eseniya-elina@mail.ru

Аннотация. В работе исследуется закономерность изменения контрольных групп модульных взвешенных кодов с суммированием при последовательном увеличении модуля, являющегося степенью двойки. Установлена взаимосвязь между контрольными группами, формируемыми при различных значениях модуля и показано, что увеличение модуля приводит к закономерному уточнению существующего разбиения множества информационных векторов, формируя иерархическую структуру контрольных групп. Выявленная структура позволяет исследовать коды с большими модулями на основе закономерностей, установленных для меньших модулей. Полученный результат может быть использован при разработке самопроверяемых цифровых устройств для контроля и управления в транспортных системах.

Ключевые слова: модульный взвешенный код; самопроверяемое цифровое устройство; контрольная группа; информационный вектор; иерархическая структура.

1. Введение

В транспортной системе перемещаются не только люди и материальные объекты – между ее элементами непрерывно передается цифровая информация. Она обеспечивает координацию транспортных процессов, передачу управляющих команд и данных о состоянии объектов. Ошибка, возникающая при формировании или обработке цифрового сигнала, может повлиять на точность воспроизведения и интерпретацию получаемых данных и, как следствие, нарушить корректность работы всей транспортной системы. В связи с этим особое значение приобретают встроенные средства контроля [1, 2], обеспечивающие обнаружение нарушений непосредственно в процессе функционирования транспортной системы [3].

Для внедрения встроенных средств контроля применяют коды обнаружения [4 – 7] и исправления [8, 9] ошибок. Особый интерес представляют

модульные взвешенные коды с суммированием $WS(m, k, M)$ [10, 11], где M – значение модуля, m и k – количество информационных и проверочных символов соответственно, а $n=k+m$ – длина кодового слова. Модульные взвешенные коды являются разделимыми кодами обнаружения ошибок и допускают выбор параметров с учетом заданных требований. Исследования модульных взвешенных кодов представлены в работах [12 – 15] и посвящены вопросам выбора весовых коэффициентов, обнаружения ошибок, а также оценке и сравнению характеристик получаемых кодов. При этом значительно меньше внимания уделяется исследованию внутренней структуры кодов и взаимосвязей между кодами с различными характеристиками. Это позволяет рассматривать $WS(m, k, M)$-код не как отдельную кодовую конструкцию с фиксированным набором параметров, а как элемент последовательности взаимосвязанных кодов, между которыми существуют определенные закономерности.

В настоящей работе рассматриваются $WS(m, k, M)$-коды с фиксированной последовательностью весовых коэффициентов и значениями модуля, являющимися степенями двойки. Исследуется закономерность формирования информационных векторов в контрольных группах и устанавливается взаимосвязь между группами, формируемыми при различных значениях кода.

2. Формирование контрольных групп модульного взвешенного кода

Рассмотрим модульный взвешенный код с суммированием $WS(m, k, M)$, в котором контрольная информация формируется на основе взвешенной суммы информационных разрядов в кольце вычетов по заданному модулю M. Значение модуля принимают равным $M \in \mathbb{N}, M \geq 2$.

Пусть информационная часть кодового слова содержит m символов, образующих информационный вектор $<y_m\, y_{m-1} \ldots y_2\, y_1>$. Каждому информационному символу вектора в соответствие ставится весовой коэффициент w_i, где i – порядковый номер информационного символа, $i = 1, 2, ..., m$. На основе информационных символов и соответствующим им весовых коэффициентов вычисляется взвешенная сумма $W_M = \sum_{i=1}^{m} y_i w_i$, затем определяется наименьший неотрицательный вычет полученной суммы по модулю: $W_M \pmod M$. Полученное значение представляется в двоичном виде и записывается в контрольный вектор. Информационным векторам, для которых остаток по модулю имеет одинаковое значение, соответствует один и тот же

контрольный вектор. Совокупность таких информационных векторов образует контрольную группу.

При изменении модуля множество рассматриваемых информационных векторов остается неизменным, поскольку определяется числом информационных разрядов. Изменяется только результат вычисления остатка, вследствие чего одни и те же информационные векторы перераспределяются между контрольными группами. Таким образом, при фиксированных информационных разрядах и весовых коэффициентах каждому значению модуля соответствует определенное разбиение одного и того же множества информационных векторов по контрольным группам.

В качестве примера рассмотрим $WS(4, 2, 4)$ код. Пусть задана последовательность весовых коэффициентов $[w_4, w_3, w_2, w_1] = [3, 2, 1, 1]$. Тогда формируется четыре возможных контрольных вектора 00, 01, 10 и 11, между которыми распределяются все 16 возможных информационных векторов. Для выбранных параметров распределение информационных векторов по контрольным представлено в таблице 1.

Если сохранить те же информационные векторы и последовательность весовых коэффициентов, но увеличить модуль до $M = 8$, множество информационных векторов останется неизменным. Однако количество возможных контрольных групп увеличится с четырех до восьми. Следовательно, изменится распределение информационных векторов по контрольным группам. Именно эта взаимосвязь между разбиениями одного и того же множества информационных векторов при различных значениях модуля является предметом дальнейшего рассмотрения.

Таблица 1. Распределение информационных векторов по контрольным группам для $WS(4, 2, 4)$-кода

Контрольные группы	**Информационные векторы**
00	0000, 0111, 1001, 1010
01	0001, 0010, 1011, 1100
10	0011, 0100, 1101, 1110
11	0101, 0110, 1000, 1111

3. Закономерность изменения контрольных групп при увеличении модуля

При исследовании модульных взвешенных кодов с фиксированной последовательностью весовых коэффициентов установлено, что изменение модуля приводит к закономерному изменению распределения информационных векторов по контрольным группам.

Пусть значения модулей образуют последовательность степеней двойки и выбираются из множества $M \in \left\{ 2^2, 2^3, ..., 2^{\left\lceil \log_2\left(\sum_{i=1}^{m} w_i + 1\right)\right\rceil} \right\}$ [16]. В частности, рассматриваются значения модулей $M = 4, 8, 16, 32$. Как описано выше для каждого значения модуля, при фиксированной последовательности весовых коэффициентов, множество информационных векторов остается неизменным, поскольку определяется числом информационных разрядов m. При этом изменение модуля приводит к изменению количества возможных контрольных групп и, соответственно, к перераспределению информационных векторов по контрольным группам.

Рассмотрим переход от $M = 4$ к $M = 8$. Количество возможных контрольных групп увеличивается с четырех до восьми. При этом информационные векторы, которые при $M = 4$ относились к одной контрольной группе, при $M = 8$ распределяются между определенными контрольными группами. Например, группа с контрольным значением 0 переходит в группы со значениями 0 и 4, группа со значением 1 – в группы 1 и 5, группа со значением 2 – в группы 2 и 6, а группа со значением 3 – в группы 3 и 7.

Аналогичное преобразование наблюдается при переходе от $M = 8$ к $M = 16$. Таким образом, изменение модуля приводит не к произвольному перераспределению информационных векторов, а к закономерному преобразованию уже сформированных контрольных групп. Результаты перехода между различными значениями модуля представлены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что при переходе к следующему значению модуля каждому контрольному значению при меньшем модуле соответствует два возможных контрольных значения при большем модуле. При этом численные значения соответствующих контрольных значений отличаются на величину, равную предыдущему модулю. Эта закономерность имеет простое представление в двоичной форме. При увеличении модуля от $M = 4$ до $M = 8$ длина контрольного вектора увеличивается с двух до трех разрядов. Каждому контрольному вектору при $M = 4$ соответствуют два контрольных

вектора при $M = 8$, получаемые добавлением нового старшего разряда 0 или 1. Этот принцип сохраняется при последующих переходах $M = 8 \rightarrow M = 16$ и $M = 16 \rightarrow M = 32$.

Таблица 2. Изменение контрольных значений при последовательном увеличении модуля

Переход к следующему модулю	**Контрольное значение при меньшем модуле**	**Контрольный вектор при меньшем модуле**	**Контрольные значения при большем модуле**	**Контрольные векторы при большем модуле**
$M = 4 \rightarrow M = 8$	0	00	0, 4	000, 100
	1	01	1, 5	001, 101
	2	10	2, 6	010, 110
	3	11	3, 7	011, 111
$M = 8 \rightarrow M = 16$	0	000	0, 8	0000, 1000
	1	001	1, 9	0001, 1001
	2	010	2, 10	0010, 1010
	3	011	3, 11	0011, 1011
	…	…	…	…
	7	111	7, 15	0111, 1111

Приведенные результаты позволяют предположить наличие общей закономерности формирования контрольных групп при последовательном увеличении модуля равному степени двойки. Для обоснования данной закономерности сформулируем теорему.

Теорема. *При фиксированной последовательности весовых коэффициентов переход от модуля 2^p к следующему значению модуля 2^{p+1}, где p – показатель степени текущего модуля, приводит к разделению каждой контрольной группы не более чем на две группы, соответствующие контрольным значениям, номера которых отличаются на 2^p в десятичном представлении.*

Доказательство. При некотором значении модуля 2^p информационным векторам одной контрольной группы соответствует одно и то же число W_M. Поэтому при делении на 2^p эти информационные векторы дают одинаковый остаток.

При переходе к следующему модулю 2^{p+1} те же значения числа W_M могут давать только два возможных остатка, отличающихся между собой на 2^p. Следовательно, информационные векторы, относившиеся при модуле 2^p к одной контрольной группе, при модуле 2^{p+1} могут распределиться не более чем между двумя контрольными группами. Соответствующие контрольные значения отличаются на 2^p в десятичном представлении. ■

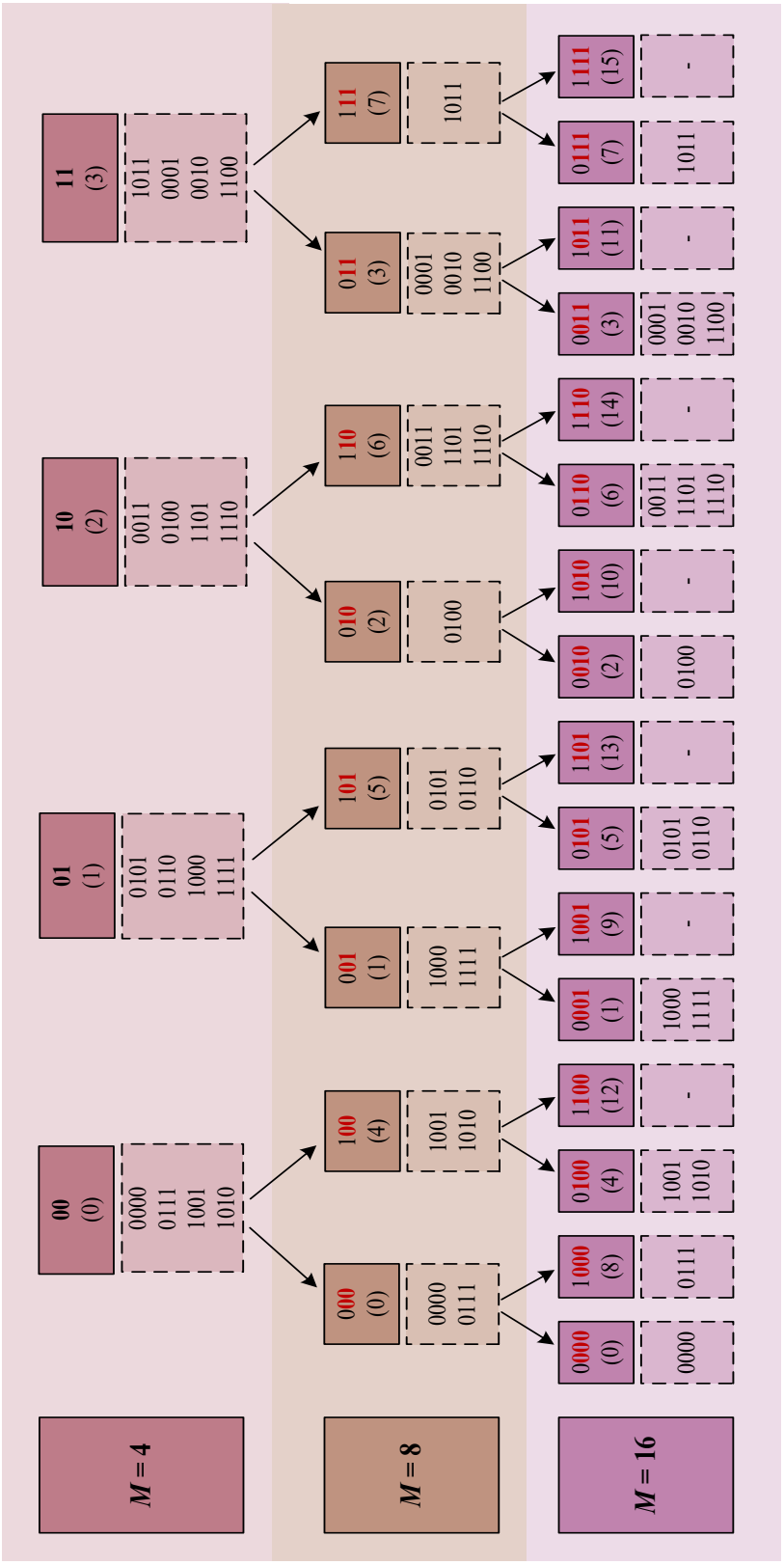
Полученная закономерность позволяет рассматривать контрольные группы, формируемые при увеличении модуля, как элементы единой иерархической структуры. Каждая контрольная группа, формируемая при большем модуле, непосредственно связана с контрольной группой, сформированной при меньшем модуле, а исходное разбиение множества информационных векторов последовательно уточняется. В результате последовательность модулей M = 4, 8, 16, 32 формирует структуру, аналогичную бинарному дереву.

Наглядное представления данной структуры приведено на рисунке. В скобках указаны десятичные значения контрольных векторов, а под каждой контрольной группой приведены соответствующие ей информационные векторы.

4. Заключение

В работе установлена закономерность изменения контрольных групп модульных взвешенных кодов с суммированием при последовательном увеличении модуля, являющегося степенью двойки. Практическое значение полученного результата заключается в возможности исследования кодов с большими модулями на основе структур и закономерностей, установленных для меньших модулей.

Выявленная закономерность формирует основу для дальнейшего развития методов анализа и синтеза модульных взвешенных кодов и их применения при построении самопроверяемых цифровых устройств транспортных систем. Полученный результат может быть использован для обеспечения обнаружения нарушений при передаче и обработке цифровой информации в системах управления транспортными объектами.



Иерархическая структура контрольных групп при последовательном увеличении модуля, принимающего значения степеней двойки, для последовательности весовых коэффициентов [1, 2, 3, 3]

Список использованных источников

1. *Аксенова Г. П.* О функциональном диагностировании дискретных устройств в условиях работы с неточными данными // Проблемы управления. – 2008. – № 5. – С. 62–66.
2. *Закревский Л. А., Иванюк А. А., Янушкевич А. И., Ярмолик В. Н.* Неразрушающее тестирование элементов памяти при помощи встроенных средств контроля на четность // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 2. – С. 120–128.
3. *Матросова А. Ю.* Метод обнаружения неисправности в синхронном устройстве // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 12. – С. 128–137.
4. *Ефанов Д. В.* Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов и равновесного кода «3 из 4» // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2026. – № 2. – С. 43–56. – DOI: 10.7868/S3034644426020040.
5. *Кузьмин О. В., Дружинин В. И.* Коды Боуза – Чоудхури – Хоквингема в системах обнаружения и исправления ошибок при передаче данных // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 3(39). – С. 23–29.
6. *Berger J.M.* A Note on Burst Detection Sum Codes // Information and Control. – 1961. – Vol. 4. – Issue 2-3. – Pp. 297-299. – DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80024-7.
7. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.* New Methods of Concurrent Checking. – Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008. – 184 p.
8. *Кузьмин О. В., Терехова А. В.* Алгоритмическое исследование треугольника типа Паскаля и помехоустойчивые коды // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. – 2025. – № 3. – С. 29–37. – DOI: 10.18101/2304-5728-2025-3-29-37.
9. *Ефанов Д. В., Елина Е. И.* Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов с суммированием в кольце вычетов по заданному модулю // Автоматика и телемеханика. – 2026. – № 5. – С. 108–130. – DOI: 10.7868/S2413977726050065.
10. *Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В.* Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. – М.: Наука, 2020. – 383 с.
11. *Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В.* Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием. – М.: Наука, 2021. – 455 с.
12. *Ефанов Д. В., Елина Е. И.* Синтез самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов Боуза – Лина // Проблемы управления. – 2024. – № 4. – С. 26–43. – DOI: 10.25728/pu.2024.4.3.
13. *Елина Е. И.* Исследование свойств модульных взвешенных кодов с суммированием в схемах встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов // Автоматика на транспорте. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 178–193. – DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-02-178-193.

14. *Das D., Touba N.A.* Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits // Proceedings of 17th IEEE Test Symposium. – California, USA, 1999. – P. 370-376. – DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
15. *Das D., Touba N.A., Seuring M., Gossel M.* Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes // Proceedings of the IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW). – Palma de Mallorca, Spain, 2000. – P. 171-176. – DOI: 10.1109/OLT.2000.856633.
16. *Ефанов Д. В., Елина Е. И.* Исследование алгоритмов синтеза самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов Боуза – Лина // Автоматика на транспорте. – 2024. – Т. 10, № 1. – С. 74–99. – DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-74-99.

ON THE SELF-SIMILARITY OF CHECK GROUPS IN MODULAR WEIGHT-BASED CODES

Yeseniya I. Yelina
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
Russia, 199178, St. Petersburg, 12th Line of Vasilevskiy Island, 13
E-mail: eseniya-elina@mail.ru

Abstract. This paper investigates the regularity governing the changes in check groups of modular weight-based sum codes as the modulus, represented by a power of two, is successively increased. The relationship between the check groups formed for different modulus values is established, and it is shown that increasing the modulus leads to a regular refinement of the existing partition of the set of data vectors, thereby forming a hierarchical structure of check groups. The identified structure makes it possible to investigate codes with larger moduli based on the regularities established for smaller moduli. The obtained result can be used in the development of self-checking digital devices for monitoring and control in transport systems.

Keywords: modular weight-based code; self-checking digital device; check group; data vector; hierarchical structure.

УДК 004.052.32+681.518.5
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-695

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ ВЫБОРА ПОРОЖДАЮЩЕГО ПОЛИНОМА ПРИ СИНТЕЗЕ САМОПРОВЕРЯЕМОГО ЦИФРОВОГО УСТРОЙСТВА

Мария Сергеевна Мащалкина
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: masha.mashchalkina@mail.ru

Аннотация. Рассматривается выбор порождающего полинома для системы функционального контроля комбинационного устройства на основе моделирования его неисправностей. Исследуется влияние места возникновения неисправности и входных условий на состав ошибок в выходных векторах. Описан порядок формирования множества различных ненулевых ошибок при моделировании одиночных константных неисправностей SA0 и SA1. На расчётном примере схемы с тремя входами и четырьмя выходами показано, что неисправность общего внутреннего узла может вызывать одновременное искажение нескольких выходных разрядов. Для полученного множества ошибок выполнено сравнение трёх порождающих полиномов по остаткам от деления полиномиальных представлений ошибок. Два полинома обнаруживают четыре из пяти различных векторов, тогда как третий обеспечивает обнаружение всех пяти. Показано, что полиномы одинаковой степени могут иметь различное покрытие ошибок конкретной схемы, поэтому число контрольных разрядов не является достаточным основанием для выбора кода. Результаты моделирования позволяют обосновать выбор полинома с учётом структуры устройства и могут использоваться при разработке средств функционального контроля цифровых устройств транспортных систем.

Ключевые слова: моделирование неисправностей; комбинационная схема; константная неисправность; выходная ошибка; полиномиальный код; порождающий полином; функциональный контроль; транспортные системы.

1. Введение

Цифровые устройства транспортных систем обрабатывают поступающие сигналы и на их основе формируют управляющие воздействия. Возникновение неисправности в логической схеме может нарушить правильность вычислений и привести к искажению выходных сигналов. Для выявления таких нарушений применяются системы функционального контроля, позволяющие обнаруживать ошибки непосредственно в процессе работы устройства. Эффективность контроля зависит от согласования свойств основной

схемы и средств проверки, что учитывается при построении самопроверяемых устройств [1].

Выбор контрольного кода требует анализа ошибок, которые могут возникать на выходах схемы. Даже одиночная неисправность логического элемента способна вызвать одновременное изменение нескольких выходных разрядов. Характер этих изменений определяется структурой устройства и поданным входным набором. Классификация ошибок позволяет сопоставить возможные искажения с обнаруживающими свойствами различных кодов [2]. При этом для конкретной схемы состав выходных ошибок можно установить с помощью моделирования неисправностей.

Одним из способов организации функционального контроля является применение полиномиальных кодов, в которых ошибка обнаруживается по ненулевому остатку от деления её полиномиального представления на порождающий полином [3]. Обнаруживающие свойства таких кодов зависят от выбранного полинома и длины информационного слова [4]. При контроле комбинационных устройств дополнительно учитываются кратность возможных ошибок и расположение искажённых разрядов [5]. Поэтому полиномы одинаковой степени могут обеспечивать различное покрытие ошибок одной и той же схемы. Для обоснованного выбора необходимо проверить их способность обнаруживать искажения, полученные при моделировании.

Целью настоящей работы является исследование возможности использования результатов моделирования неисправностей для выбора порождающего полинома. Рассматривается порядок формирования множества выходных ошибок и проводится сравнение полиномов на расчётном примере комбинационной схемы. Особое внимание уделяется общему внутреннему узлу, неисправность которого может приводить к изменению нескольких выходов и тем самым влиять на выбор контрольного кода.

2. Моделирование неисправностей комбинационной схемы

Рассматриваются одиночные константные неисправности SA0 и SA1. При SA0 выбранный сигнал принудительно принимает нулевое значение, при SA1 принимает единичное значение. Остальная часть схемы работает в соответствии с её логическим описанием. Такой подход позволяет проследить распространение искажения от места неисправности до выходов. Результаты моделирования используются при исследовании полиномиальных кодов в системах функционального контроля [6].

Для каждого входного набора X вычисляется вектор выходов исправной схемы $F(X)$. Затем вносится неисправность f и определяется выходной вектор $F_f(X)$. Вектор ошибки получается побитовым сложением этих результатов по модулю два:

$$e(X,f)=F(X)\oplus F_f(X), \quad (1)$$

Единица в векторе ошибки указывает на изменение соответствующего выхода. Ноль означает сохранение его значения. Если все разряды равны нулю, неисправность на данном входном наборе не проявилась на выходах. Такие результаты исключаются из дальнейшей проверки. Повторяющиеся ненулевые векторы объединяются в одно множество E.

Для пояснения результатов сохраняются входные наборы и точки внесения неисправностей. Это позволяет установить, какой элемент вызвал ошибку и при каких условиях она появилась. Одному вектору могут соответствовать несколько неисправностей или несколько входных наборов.

При моделировании необходимо учитывать внутренние узлы, от которых зависят несколько выходов. Неисправность такого узла может изменить сразу несколько разрядов. На некоторых входных наборах часть искажений не проходит к выходам из-за логических условий. Особенности согласования структуры устройства и полиномиального контроля рассмотрены в [7]. Таким образом, множество E зависит не только от числа выходов, но и от выбранных точек внесения неисправностей.

3. Оценка обнаружения выходных ошибок

Пусть множество E содержит q различных ненулевых векторов ошибок. Каждый вектор представляется полиномом над GF(2), коэффициенты которого совпадают со значениями разрядов. Порядок разрядов фиксируется перед расчётом. В рассматриваемом далее четырёхразрядном слове левый разряд соответствует третьей степени переменной, правый соответствует свободному коэффициенту.

Для i-го вектора ошибки и порождающего полинома $G_j(x)$ степени k_j вычисляется остаток:

$$R_{ij}(x)=e_i(x)x^{k_j}\bmod G_j(x). \quad (2)$$

В выражении (2) через $e_i(x)$ обозначено полиномиальное представление ошибки. Сдвиг на k_j разрядов учитывает размещение контрольных разрядов после информационных. Ненулевой остаток соответствует обнаруживаемой ошибке. При нулевом остатке ошибка не обнаруживается. Предполагается,

что контрольное значение независимо формируется по входам исправным блоком и сравнивается с результатом кодирования фактических выходов.

Покрытие ошибок определяется отношением числа обнаруживаемых векторов к общему числу векторов множества E:

$$C\left(G_j\right)=\frac{D\left(Gj\right)}{q}\cdot 100\ \%. \qquad (3)$$

Здесь $D(G_j)$ обозначает число ошибок с ненулевым остатком. Полное покрытие достигается, если обнаруживаются все q векторов. В этом случае значение показателя составляет 100 %. Результат относится только к сформированному множеству E. Он не характеризует ошибки, которые не включены в принятую модель неисправностей.

4. Сравнение полиномов на расчётном примере

Рассмотрим комбинационную схему с тремя входами a, b, c и четырьмя выходами. Сигнал t формируется операцией И над входами a и b. Первый выход определяется операцией исключающего ИЛИ над t и c. Для второго выхода та же операция выполняется над a и c. Третий выход формируется операцией ИЛИ над t и c, четвёртый операцией И над b и c. Узел t является общим для первого и третьего выходов. Значения сигналов исправной схемы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения сигналов исправной схемы

Входы *abc*	**Узел *t***	**Выходы 1–4**
000	0	0000
001	0	1110
010	0	0000
011	0	1111
100	0	0100
101	0	1010
110	1	1110
111	1	0011

Неисправности SA0 и SA1 вносятся в узел t и отдельно в каждый из четырёх выходов. Всего рассматриваются десять одиночных неисправностей. Для каждой из них проверяются восемь входных наборов, что даёт 80 случаев моделирования. Неисправность узла t действует одновременно на обе

ветви его сигнала. Неисправности входов, отдельных ветвей и задержки сигналов в примере не учитываются.

Неисправность отдельного выхода вызывает однократную ошибку. Для узла *t* результат зависит от значения *c*. При нулевом значении *c* изменение узла проходит к первому и третьему выходам. Возникает вектор ошибки 1010. При единичном значении *c* третий выход сохраняет единицу благодаря операции ИЛИ. В этом случае изменяется только первый выход и формируется вектор 1000.

Например, входному набору 000 соответствует исправный выходной вектор 0000. При неисправности SA1 узла *t* выходы принимают значения 1010. Для набора 001 исправный вектор равен 1110, а при той же неисправности получается 0110. Вектор ошибки в последнем случае равен 1000. Таким образом, одна неисправность вызывает ошибки различной кратности в зависимости от входных условий.

В результате моделирования получены пять различных ненулевых векторов: 1000, 0100, 0010, 0001 и 1010. Первые четыре являются однократными ошибками. Последний вектор соответствует одновременному изменению первого и третьего выходов и возникает при неисправности общего внутреннего узла.

Сравним полиномы А, Б и В с коэффициентами 11, 101 и 111 соответственно. Коэффициенты записаны полностью, от старшей степени до свободного члена. Полином А имеет первую степень и соответствует контролю чётности. Полиномы Б и В имеют вторую степень. Они различаются коэффициентом при первой степени: для Б он равен нулю, для В равен единице.

Остатки для каждого вектора вычислены по формуле (2) и приведены в таблице 2. Они записаны двоичными векторами длины, равной степени полинома. Старший коэффициент расположен слева. Нулевой остаток указывает на необнаруживаемую ошибку. По числу ненулевых остатков определяется покрытие множества *E*.

Все три полинома обнаруживают однократные ошибки. Поэтому при моделировании только первичных выходов каждый из них обеспечивал бы полное покрытие. Включение внутреннего узла *t* изменяет результат. Полиномы А и Б не обнаруживают вектор 1010. Для них покрытие составляет 80 %, поскольку обнаруживаются четыре из пяти различных ошибок.

Полином В обнаруживает все пять векторов и обеспечивает покрытие 100 %. Среди рассмотренных вариантов он подходит для контроля данной схемы. При единичных старшем и свободном коэффициентах существуют

только один полином первой степени и два полинома второй степени. Все эти варианты проверены. Следовательно, для полученного множества *E* минимальная достаточная степень равна двум.

Таблица 2. Остатки и показатели обнаружения ошибок

Вектор / показатель	**А (11)**	**Б (101)**	**В (111)**
1000	1	10	11
0100	1	01	10
0010	1	10	01
0001	1	01	11
1010	0	00	10
Обнаружено векторов	4 из 5	4 из 5	5 из 5
Покрытие, %	80	80	100

Пример показывает, что увеличение степени полинома само по себе не гарантирует улучшения обнаружения ошибок. Полином Б использует два контрольных разряда, но пропускает ту же ошибку, что и контроль чётности. Выбрать между полиномами Б и В позволяет проверка векторов, полученных при моделировании внутренних неисправностей.

5. Применение результатов моделирования

Результаты моделирования неисправностей могут использоваться при проектировании цифровых устройств управления и контроля транспортных систем. В таких устройствах один промежуточный сигнал нередко участвует в формировании нескольких команд или признаков состояния. Неисправность общего узла при этом способна вызвать связанные изменения на нескольких выходах. Для выявления подобных искажений моделирование выполняется по логическому описанию конкретного устройства с учётом допустимых входных наборов.

Сформированное множество ошибок позволяет сравнить порождающие полиномы до разработки средств контроля и выбрать вариант, обеспечивающий требуемое покрытие. Полученные данные могут также использоваться при выделении групп выходов, для которых целесообразно организовать совместный контроль [8]. Дальнейшее построение контрольной структуры может предусматривать применение полиномиальных кодов в сочетании с логической коррекцией сигналов [9].

Поскольку состав выходных ошибок зависит от внутренней структуры устройства, после её изменения моделирование необходимо повторить. Сохранение выходных функций исправной схемы не означает, что неисправности будут проявляться прежним образом. Повторная проверка требуется и при перестановке выходов, поскольку в этом случае изменяется соответствие между разрядами выходного вектора и коэффициентами его полиномиального представления.

При использовании результатов следует учитывать границы проведённого анализа. Обнаружение всех ошибок множества E характеризует выбранный полином, однако само по себе не подтверждает самопроверяемость всей системы. Для этого необходимо дополнительно исследовать блок формирования контрольных сигналов и устройство сравнения. Кроме того, модель одиночных константных неисправностей SA0/SA1 не учитывает нарушения временных характеристик и одновременное возникновение нескольких неисправностей. Значение подобных ограничений при оценке возможностей CRC отмечается в [10].

6. Заключение

Рассмотрено применение моделирования неисправностей для обоснования выбора порождающего полинома комбинационной схемы. Показано, что включение в модель общих внутренних узлов позволяет выявить многократные выходные ошибки, которые не возникают при моделировании неисправностей только на первичных выходах. Учёт таких ошибок даёт более полное представление о требованиях к контрольному коду.

В расчётном примере получены пять различных ненулевых векторов ошибок. Два из трёх рассмотренных полиномов обнаруживают четыре вектора, тогда как полином с коэффициентами 111 обнаруживает все пять. При этом полиномы одинаковой степени обеспечивают различное покрытие. Таким образом, выбор порождающего полинома следует выполнять с учётом ошибок конкретной схемы, установленных при моделировании. Полученные результаты справедливы в пределах принятой модели одиночных константных неисправностей и могут служить основой для дальнейшей разработки средств функционального контроля.

Список использованных источников

1. *Jha N. K., Wang S.-J.* Design and Synthesis of Self-Checking VLSI Circuits // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1993. Vol. 12, no. 6. P. 878–887. DOI: 10.1109/43.229762.
2. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.* Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 5. С. 333–343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
3. *Peterson W. W., Brown D. T.* Cyclic Codes for Error Detection // Proceedings of the IRE. 1961. Vol. 49, no. 1. P. 228–235. DOI: 10.1109/JRPROC.1961.287814.
4. *Koopman P., Chakravarty T.* Cyclic Redundancy Code (CRC) Polynomial Selection for Embedded Networks // Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks. 2004. P. 145–154. DOI: 10.1109/DSN.2004.1311885.
5. *Абдуллаев Р. Б.* Свойства полиномиальных кодов в системах функционального контроля комбинационных логических схем // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 4. С. 655–686.
6. *Efanov D., Plotnikov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Abdullaev R.* Experimental Studies of Polynomial Codes in Concurrent Error Detection Systems of Combinational Logical Circuits // Proceedings of the 16th IEEE East-West Design & Test Symposium. 2018. P. 184–190. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524684.
7. *Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Абдуллаев Р. Б.* Особенности организации систем функционального контроля комбинационных схем на основе полиномиальных кодов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. Т. 15, № 3. С. 432–445. DOI: 10.20295/1815-588X-2018-3-432-445.
8. *Ефанов Д. В., Абдуллаев Р. Б., Лесковец И. В.* Применение полиномиальных кодов при синтезе схем встроенного контроля для комбинационных устройств по методу логического дополнения // Известия вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 1. С. 5–18. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-1-5-18.
9. *Efanov D. V., Abdullaev R. B., Plotnikov D. G., Bolsunovskaya M. V., Odoevsky A. S., Vasilyanov G. S.* Novel Methods for Synthesizing Self-Checking Combinational Circuits by Means of Boolean Signal Correction and Polynomial Codes // Computation. 2024. Vol. 12, no. 7. Art. 135. DOI: 10.3390/computation12070135.
10. *Paulitsch M., Morris J., Hall B., Driscoll K., Latronico E., Koopman P.* Coverage and the Use of Cyclic Redundancy Codes in Ultra-Dependable Systems // Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks. 2005. P. 346–355. DOI: 10.1109/DSN.2005.31.

FAULT SIMULATION AS A BASIS FOR SELECTING A GENERATOR POLYNOMIAL FOR SELF-CHECKING DIGITAL DEVICE DESIGN

Maria S. Mashchalkina
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnicheskaya St., 29B
E-mail: masha.mashchalkina@mail.ru

Abstract. This paper examines the selection of a generator polynomial for concurrent error detection in a combinational circuit based on fault simulation. The effects of fault location and input conditions on output error patterns are investigated. A procedure is described for constructing a set of distinct nonzero error patterns under single stuck-at-0 and stuck-at-1 faults. An illustrative circuit with three inputs and four outputs demonstrates that a fault at a shared internal node can simultaneously corrupt several output bits. Three generator polynomials are compared by calculating the remainders of the polynomial representations of the resulting errors. Two polynomials detect four of the five distinct patterns, whereas the third detects all five. The results show that polynomials of the same degree can provide different error coverage for a particular circuit. Therefore, the number of check bits alone is insufficient to justify code selection. Fault simulation supports generator polynomial selection by accounting for the circuit structure and can be used in the development of concurrent error detection circuitry for digital devices in transport systems.

Keywords: fault simulation; combinational circuit; stuck-at fault; output error; polynomial code; generator polynomial; concurrent error detection; transport systems.

УДК 681.513.2
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-696

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Данил Маратович Ахмеров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: akhmerov.dany@yandex.ru

Аннотация. Предложена концепция комплексной минимизации колебаний электромагнитного момента в бесколлекторных двигателях постоянного тока с трапецеидальной формой обратной электродвижущей силы. Данная методика управления позволяет одновременно компенсировать возмущения, создаваемые при переключении обмоток и гармонические составляющие в обратной электродвижущей силе, что повышает энергоэффективность электропривода в транспортных системах.

Ключевые слова: электротранспорт; бесколлекторный двигатель постоянного тока; система управления; уменьшение колебаний электромагнитного момента.

1. Введение

Бесколлекторные двигатели постоянного тока с трапецеидальной формой обратной электродвижущей силы (ЭДС) получили широкое распространение в современных мобильных транспортных системах благодаря технологической простоте изготовления и относительно низкой стоимости по сравнению с синхронными двигателями с постоянными магнитами. Более того бесколлекторные двигатели постоянного тока обладают большей удельной мощностью, по сравнению с синхронными двигателями с постоянными магнитами [1].

Классические продвинутые методы управления, к которым относится векторное управление, демонстрирует наибольшую эффективность в синхронных двигателях с постоянными магнитами, обладающих близкой к синусоидальной формой обратной ЭДС [2 – 6]. В этих условиях достигается наилучшее согласование между формой токов и ЭДС, что обеспечивает минимальные пульсации электромагнитного момента и высокую энергетическую эффективность. Это демонстрируется формулой формирования электромагнитного момента ниже:

$$T_e = \frac{p}{2\omega_r}(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c), \quad (1)$$

где p – количество полюсов, i_a, i_b, i_c – фазные токи для фаз A, B, и C соответственно, e_a, e_b, e_c – обратная ЭДС для фаз A, B, и C соответственно и ω_r – электрическая скорость вращения.

Однако применение продвинутых методов управления к бесколлекторным двигателям постоянного тока с трапецеидальной или иной несинусоидальной формой обратной ЭДС приводит к появлению паразитных гармонических составляющих тока и к увеличению пульсаций электромагнитного момента. Указанные эффекты негативно сказываются на акустических характеристиках, точности управления и долговечности системы в целом [7].

Вместе с тем при управлении бесколлекторными двигателями постоянного тока отдельную проблему представляет различие скоростей нарастания и падения тока в двух коммутируемых фазах электродвигателя. Данный эффект сопровождается паразитным искажением тока в непроводящей (третьей) фазе, что ведет к низкочастотным колебаниям электромагнитного момента. В зависимости от условий эксплуатации и параметров электродвигателя колебания электромагнитного момента могут достигать до 50% [8, 9].

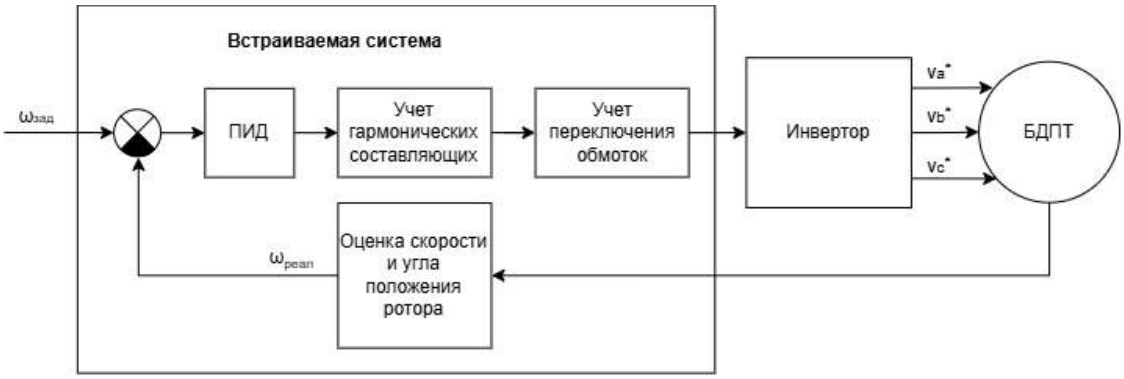
В связи с описанными выше проблемами важной научно-технической задачей является разработка алгоритма управления для бесколлекторных электродвигателей, в которых учитывается реальная форма обратной ЭДС и потери при коммутации обмоток электродвигателя для снижения пульсаций электромагнитного момента и повышения качества работы электропривода в транспортных системах.

2. Описание метода управления

Для управления бесколлекторным двигателем постоянного тока обычно используется трапецеидальная коммутация ключей, которая обеспечивает совпадение форм управляющего тока на ключах инвертора и обратной ЭДС. Однако в реальных бесколлекторных двигателях форма обратной ЭДС может отклоняться от идеальной трапецеидальной формы из-за конструкционных особенностей двигателя. В связи с этим в обратной ЭДС бесколлекторного двигателя постоянного тока появляются гармонические составляющие. Для их компенсации и минимизации пульсаций электромагнитного момента применяются специализированные методы уменьшения данных гармонических искажений [10].

Также при управлении бесколлекторным двигателем постоянного тока важной задачей является минимизация низкочастотных пульсаций момента,

которые создаются в коммутационных интервалах. Решение данной проблемы достигается путем динамической коррекции коэффициента заполнения широтно-импульсной модуляции (ШИМ) силовых ключей инвертора [11 – 13]. Это позволяет уменьшить взаимовлияние спадающего тока выключаемой обмотки и нарастающего тока включаемой обмотки.



Структурная схема системы управления бесколлекторным двигателем постоянного тока.

В существующей практике задачи компенсации гармонических составляющих в обратной ЭДС и минимизации коммутационных пульсаций тока решались изолированно, что не позволяло достичь максимальной эффективности работы электропривода. В отличие от них, в разработанной концепции управления бесколлекторным двигателем постоянного тока с несинусоидальной формой противо-ЭДС предложен алгоритм комплексной компенсации обоих источников колебаний электромагнитного момента.

В предлагаемой структуре системы управления (см. рисунок) оценка углового положения и скорости ротора осуществляется с помощью датчиков Холла или алгоритмов бездатчиковой оценки. В контуре регулирования скорости на основе ошибки рассогласования с помощью пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора формируется значение управляющего напряжения. Компенсация гармонических составляющих осуществляется с помощью инжекции дополнительных гармоник в управляющий сигнал. Данный сигнал преобразуется в ШИМ с динамической коррекцией коэффициента заполнения ШИМ в коммутационных интервалах фаз электродвигателя для устранения скачков тока при переключении фаз электродвигателя. Сформированные таким образом ШИМ подается на силовые ключи инвертора, обеспечивая формирование графика электромагнитного момента с его минимальными колебаниями.

3. Заключение

В рамках настоящего исследования предложена концепция системы управления бесколлекторным двигателем постоянного тока с несинусоидальной формой противо-ЭДС. Особенностью разработанного алгоритма является одновременная компенсация гармонических составляющих в обратной ЭДС и уменьшение колебаний тока при коммутации фаз электродвигателя. Комплексное подавление данных паразитных эффектов приводит к снижению амплитуды пульсаций электромагнитного момента. Как следствие, достигается повышение энергетической эффективности электропривода и минимизация его акустических шумов и вибраций, что имеет важное значение для применения в современных мобильных транспортных системах.

Список использованных источников

1. *Sadhique M. A. J., Ashok S., Sandeen J., Deepthi S.* Position Sensorless Control for BLDC Motor for Powertrain Applications // 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT). – Kannur, 2019. – Pp. 322-327. – DOI: 10.1109/ICICICT46008.2019.8993184.
2. *Maleki N. A., Pahlavani M. R. A., Soltani I.* Detailed Comparison Between FOC and DTC Methods of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive // Journal of Electrical and Electronic Engineering. – 2015. – Vol. 3. – Issue 2-1. – Pp. 92-100. – DOI: 10.11648/j.jeee.s.2015030201.30.
3. *Kumar M., Tiwari S., Kumar V., Sampathi S. J., Kumar Jarial R.* Implementation of Field-Oriented Control (FOC) Algorithm for Brushless DC (BLDC) Motor Speed Regulation // 2023 Second IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA). – Kurukshetra, India, 2024. – Pp. 1-6. – DOI: 10.1109/ICMICA61068.2024.10732537.
4. *Srivastava A., Padgil R., Gupta A., Lohia A., Nair N. P.* Model-Based Sensored Field Oriented Control Implementation for Permanent Magnet Synchronous // 2021 International Symposium of Asian Control Association on Intelligent Robotics and Industrial Automation (IRIA). – Goa, India, 2021. – Pp. 337-344. – DOI: 10.1109/IRIA53009.2021.9588787.
5. *Гуляев И. В., Волков А. В., Попов А. А., Ионова Е. А., Бобров М. А.* Сравнительный обзор синхронного двигателя с постоянными магнитами и бесколлекторного двигателя постоянного тока при непосредственном управлении моментом // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 6. – С. 123-128.
6. *Ахмеров Д. М.* Киберфизическая система управления электродвигателем в мобильных транспортных системах // Транспорт России: проблемы и перспективы. – 2025. – СПб.: ИПТ РАН, 2026. – С. 373-375.
7. *Lee S., Lemley T., Keohane G.* A comparison study of the commutation methods for the three-phase permanent magnet brushless DC motor // Electrical Manufacturing Technical

Conference 2009: Electrical Manufacturing and Coil Winding Expo. – Nashville, United States, 2009. – Pp. 49-55.
8. *Feng Z., Tahim E. S., Zhang J., Ramesh R. R., Kaushik A., Ebrahimi S.* Extended Operation of Brushless DC Motors Beyond 120° Under Torque Ripple Reduction Control // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2025. – Vol. 40. – Issue 4. – Pp. 3071-3083. – DOI: 10.1109/TEC.2025.3565219.
9. *Абузяров Т. Х., Плехов А.С.* Исследование методов снижения пульсаций момента бесколлекторных двигателей постоянного тока // Актуальные проблемы электроэнергетики: Сборник научно-технических статей, Нижний Новгород, 17 декабря 2019 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2019. – С. 56-63. – EDN WBRKDA.
10. *Kshirsagar P., Krishnan R.* High-Efficiency Current Excitation Strategy for Variable-Speed Nonsinusoidal Back-EMF PMSM Machines // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2012. – Vol. 48. – Issue 6. – Pp. 1875-1889. – DOI: 10.1109/TIA.2012.2225814.
11. *Shi J., Li T.* New Method to Eliminate Commutation Torque Ripple of Brushless DC Motor with Minimum Commutation Time // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60. – Issue 6. – Pp. 2139-2146. – DOI: 10.1109/TIE.2012.2191756.
12. *Lin Y., Lai Y.* Pulsewidth Modulation Technique for BLDCM Drives to Reduce Commutation Torque Ripple Without Calculation of Commutation Time // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47. – Issue 4. – Pp. 1786-1793. – DOI: 10.1109/TIA.2011.2155612.
13. *Kim D., Lee K., Kwon B.* Commutation Torque Ripple Reduction in a Position Sensorless Brushless DC Motor Drive // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006. – Vol. 21. – Issue 6. – Pp. 1762-1768. – DOI: 10.1109/TPEL.2006.882918.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF CONTROL OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTORS IN TRANSPORTATION SYSTEMS

Danil M. Akhmerov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: akhmerov.dany@yandex.ru

Abstract. A concept is proposed for the comprehensive minimization of electromagnetic torque fluctuations in brushless DC motors with a trapezoidal back electromotive force waveform. This control method allows for the simultaneous compensation of disturbances caused by winding commutation and harmonic components in the back EMF, thereby improving the energy efficiency of electric drives in transportation systems.

Keywords: electric transportation; brushless DC motor; control system; reduction of electromagnetic torque fluctuations.

Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

УДК 629.015
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-697

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРУЗОВОЙ МАШИНЫ С УЧЕТОМ РАБОТЫ СЦЕПЛЕНИЯ И ДВИГАТЕЛЯ

Александр Витальевич Ащеулов, д-р техн. наук,
Данил Евгеньевич Бортяков, канд. техн. наук,
Сергей Васильевич Никитин, канд. техн. наук,
Дмитрий Иванович Ковалев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Ж
E-mail: atsheulov_av@spbstu.ru, bortyakov@mail.ru, sergey_nikj@mail.ru, kovalev.di@edu.spbstu.ru

Аннотация. Исследование и проектирование машин невозможны без рассмотрения их моделей, позволяющих определить нагруженность их основных элементов при различных условиях эксплуатации. В работе рассматривается динамическая модель грузовой машины, в которой учитывается сцепление колес с дорогой, работа сцепления и механическая характеристика двигателя. Эта модель применима при исследовании устойчивости движения машины, её устойчивости при опрокидывании, оптимизации режимов пуска и движения машины при различных условиях, а также при исследовании и создании систем автоматического управления движением.

Ключевые слова: динамическая модель; модель двигателя внутреннего сгорания; силы сцепления; грузовая машина.

1. Введение

Пристальное внимание исследователей и инженеров уделяется исследованию движения и устойчивости машин различных видов. Наиболее простыми и, поэтому, часто применяемыми методами являются статические [1 – 4] методы расчета. Однако, из-за упрощенного учета динамических сил, например инерции машины и ее груза, центробежных сил при повороте эти методы дают приближенные ответы о возможном движении.

Исследование различных режимов работы машины, колебаний ее элементов при движении по неровностям, собственных частот и возможности резонанса, создание систем автоматического управления движением требуют использования динамических моделей машины [5 – 7].

В указанных источниках, в которых представлены исследования на основе решения систем уравнений динамики машины, рассматриваются частные случаи: поступательное движение машины с поперечными

колебаниями подрессоренной массы [5], собственные колебания кузова и выбор параметров элементов машины [6, 7]. Случай трогания и разгона машины не рассматривается.

При трогании и разгоне машины двигатель работает в переходных режимах, в сцеплении происходит интенсивное трение между его дисками, вращающимися с различной скоростью. Кроме этого, возникают большие нагрузки, которые могут повредить различные узлы и механизмы, или перевернуть машину, например на большом уклоне и наличии значительного груза или прицепа. Поэтому изучение описанных процессов является важной задачей современной науки.

В данной работе, с целью разработки и совершенствования методик анализа указанных выше процессов, ставится задача создания динамической модели грузовой машины, учитывающей характеристики двигателя, принципы и алгоритмы работы сцепления, и возможное буксование колес по дороге.

2. Динамическая модель грузовой машины

Динамическая модель грузовой машины представлена многомассовой моделью с семью степенями свободы (рис. 1).

Подрессоренная часть автомобиля представлена поступательно движущейся m_M и вращательной J_M массами рамы автомобиля, грузом массой m_L и его моментом инерции J_L. Груз расположен на расстоянии L_L и на высоте h_L относительно центра массы автомобиля, и считается жестко закрепленным на его раме. Неподрессоренные массы передней m_A и задней m_B осей связаны с подрессоренной массой автомобиля упруго-вязкими связями, характеризующимися коэффициентами жесткости C_{SA}, C_{SB} и вязкости B_{SA} и B_{SB} соответственно. Шины, передающие взаимодействие между неподрессоренными массами и дорогой, представлены упруго-вязкими связями, описываемыми коэффициентами жесткости C_{WA}, C_{WB} и вязкости B_{WA} и B_{WB} соответственно для передней и задней осей. Расстояния меду центром массы машины m_M и передней и задней осями колес обозначено L_A и L_B соответственно, а высота от дороги до центра массы m_M при недеформированных упруго-вязких связях – h_W.

Приводная часть машины представлена инерционной массой двигателя внутреннего сгорания (ДВС) J_{DRV}, и приведенной инерционной массой трансмиссии J_{TR}, которые связаны друг с другом сцеплением (рис. 1, б). Со стороны двигателя на сцепление действует, создаваемый им, момент M_{DRV},

а со стороны трансмиссии – момент M_W. Моменты M_{CLDR} и M_{CLTR} действуют со стороны сцепления на двигатель и на трансмиссию соответственно. При этом, когда диски сцепления скользят друг по другу имея разные скорости вращения, эти моменты определяются по правилу сил трения, а когда они взаимно неподвижны, то непосредственно связывают двигатель и трансмиссию как жесткое звено.

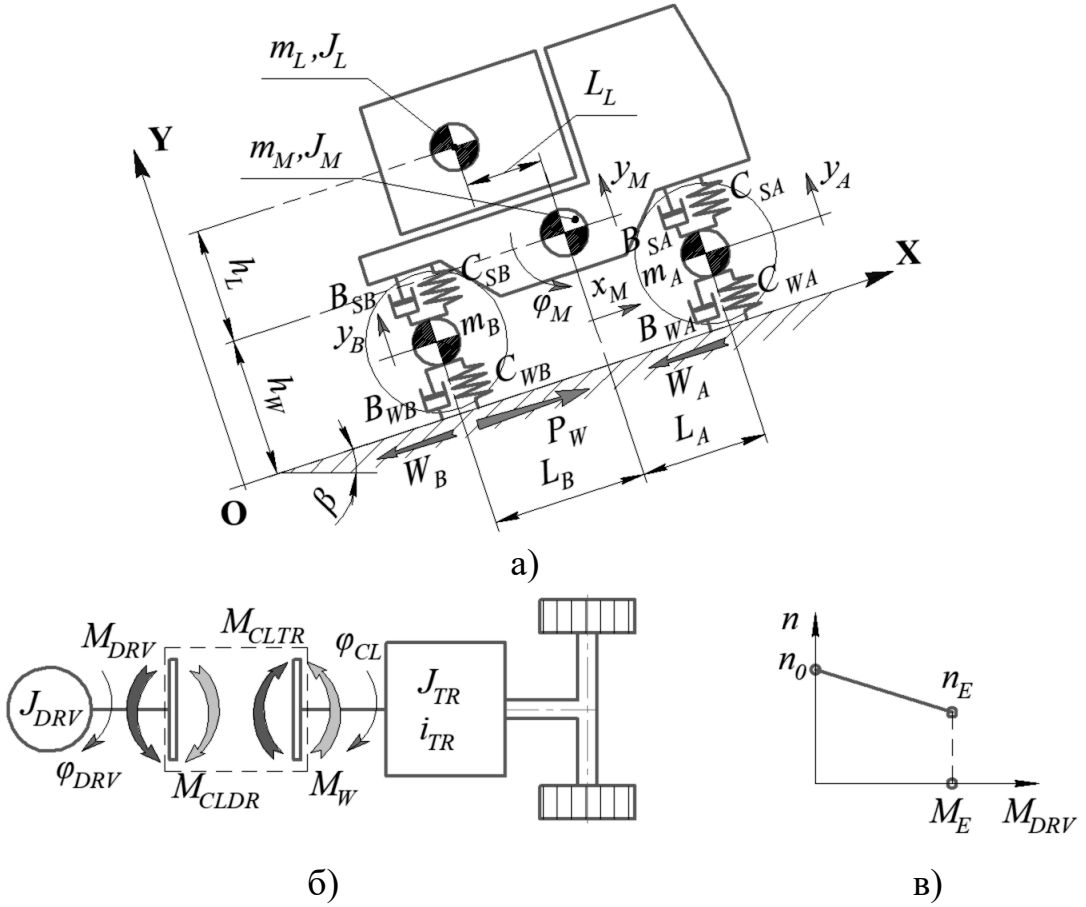


Рис. 1. Динамическая модель грузовой машины (а) и ее трансмиссии (б); упрощенная механическая характеристика двигателя (в)

Прямолинейное движение машины характеризуется координатой x_M, при этом считается, что груз и подрессоренные массы, в этом направлении, жестко связаны с рамой автомобиля. Вертикальные колебания подрессоренной массы с грузом описываются координатой y_M, а их качание относительно центра массы машины – координатой φ_M. Вертикальные перемещения неподрессоренных масс определяются координатами y_A и y_B. Угол поворота двигателя характеризуется координатой φ_{DRV}, а угол поворота вала сцепления координатой φ_{CL}.

Усилие тяги P_W и сопротивления перемещению машины W_A и W_B действуют между шинами и поверхностью дороги в направлении оси OX. При исследовании первоначального этапа разгона машины действием силы ветра пренебрегается.

Представленная модель, с учетом угла наклона дороги β, описывается системой дифференциальных уравнений движения

$$\begin{cases} \left(m_M + m_L + m_A + m_B\right)\ddot{x}_M = P_W + Fx - W_A - W_B; \\ \left(m_M + m_L\right)\ddot{y}_M = -m_M g\cos(\beta) - m_L g\cos(\beta) - C_{SA}\left(y_M - y_A + L_A\varphi_M\right) - \\ \quad -C_{SB}\left(y_M - y_B - L_B\varphi_M\right) - B_{SA}\left(\dot{y}_M - \dot{y}_A + L_A\dot{\varphi}_M\right) - B_{SB}\left(\dot{y}_M - \dot{y}_B - L_B\dot{\varphi}_M\right); \\ J_{PR}\ddot{\varphi}_M = -C_{SA}L_A\left(y_M - y_A + L_A\varphi_M\right) + C_{SB}L_B\left(y_M - y_B - L_B\varphi_M\right) + \\ \quad +m_L g\left(h_L\sin(\varphi_M) - L_L\cos(\varphi_M)\right) + -B_{SA}L_A\left(\dot{y}_M - \dot{y}_A + L_A\dot{\varphi}_M\right) + \\ \quad +B_{SB}L_B\left(\dot{y}_M - \dot{y}_B - L_B\dot{\varphi}_M\right) + \left(P_W - W_A - W_B\right)h_W; \\ m_A\ddot{y}_A = -C_{WA}y_A + C_{SA}\left(y_M - y_A + L_A\varphi_M\right) - B_{WA}\dot{y}_A + B_{SA}\left(\dot{y}_M - \dot{y}_A + L_A\dot{\varphi}_M\right) - \\ \quad -m_A g\cos(\beta); \\ m_B\ddot{y}_B = -C_{WB}y_B + C_{SB}\left(y_M - y_B - L_B\varphi_M\right) - B_{WB}\dot{y}_B + B_{SB}\left(\dot{y}_M - \dot{y}_B - L_B\dot{\varphi}_M\right) - \\ \quad -m_B g\cos(\beta); \\ J_{TR}\ddot{\varphi}_{CL} = M_{CLTR} - M_W; \\ J_{DRV}\ddot{\varphi}_{DRV} = M_{DRV} - M_{CLDR}. \end{cases} \quad (1)$$

Для дальнейшего описания физики моделируемых процессов введем обозначения относительных скоростей вращения элементов трансмиссии: $d\omega_{TW}$ – разность скорости вращения трансмиссии и скорости движения машины, отклонение которой от нуля будет свидетельствовать о буксовании или движении колеса юзом; $d\omega_{DC}$ – разность скоростей вращения двигателя и сцепления, в модели определяющее состояние их относительного движения, а также действующие между ними усилия

$$d\omega_{TW} = \dot{\varphi}_{CL} - \frac{2\dot{x}_M i_{TR}}{D_W}; \quad d\omega_{DC} = \dot{\varphi}_{DR} - \dot{\varphi}_{CL}.$$

Первое уравнение в системе (1) определяет поступательное движение машины вдоль координаты x_M под действием усилий от собственных масс Fx, сопротивления W_{AB} и тяги P_W.

Усилие Fx определяется соотношением

$$Fx = -\left(m_M + m_L + m_A + m_B\right)g\sin(\beta).$$

Усилие тяги P_W создается моментом M_{CLTR}, который передается от двигателя через сцепление и трансмиссию, и не может быть больше силы сцепления между дорогой и приводным колесом, определяемой как произведения силы реакции опоры на коэффициент сцепления.

$$P_W = \begin{cases} P_{CLW}, \quad если\left(\left(|P_{CLW}| < |C_{WB} y_B \varphi_{AD}|\right) \,\&\, \left(|d\omega_{TW}| = 0\right)\right); \\ |C_{WB} y_B \varphi_{AD}| \, sign(P_{CLW}), \quad если\left(|d\omega_{TW}| = 0\right); \\ |C_{WB} y_B \varphi_{AD}| \, sign(d\omega_{TW}), \quad иначе. \end{cases}$$

$$P_{CLW} = \frac{2M_{CLTR}}{D_W} i_{TR} \eta_{TR}.$$

Здесь φ_{AD} – коэффициент сцепления шин с дорогой, P_{CLW} – усилие, передаваемое от двигателя через сцепление и трансмиссию машины на колеса; M_{CL} – момент, передаваемый от двигателя через сцепление; D_W – диаметр колеса; i_{TR} – передаточное число трансмиссии; η_{TR} – коэффициент полезного действия трансмиссии.

При определении сил сопротивления W_A и W_B необходимо рассматривать ситуации, в которых машина неподвижна или находится в состоянии движения, когда приводное колесо имеет ту же линейную скорость обода колеса, что и скорость движения машины, или они имеют разные скорости. Математически эти состояния определяются как сухое трение [8], в состоянии покоя суммарная сила сопротивления $W_A + W_B$ не превосходит внешних усилий и перераспределяется между осями пропорционально давлению колес на опоры, а при движении равна произведению реакции опоры на коэффициент сопротивления. В описываемой модели сопротивления определяются следующим условным выражением согласно следующему алгоритму

Если $\dot{x}_M = 0$

Если $d\omega_{CLTR} = 0$

$$W_A = \frac{\left(Fx + P_W\right)\left(C_{WA} y_A + C_{WB} y_B\right)}{C_{WA} y_A + 2C_{WB} y_B};$$

$$W_B = \frac{\left(Fx + P_W\right) C_{WB} y_B}{C_{WA} y_A + 2C_{WB} y_B};$$

Сравнение W_A и W_B с предельной силой сопротивления.

Иначе

$$W_B = C_{WB} y_B \omega \, sign(d\omega_{CLTR});$$

$$W_A = Fx + P_W - W_B;$$

Сравнение W_A с предельной силой сопротивления

Иначе

$$W_A = C_{WA} y_A \omega \, sign(\dot{x}_M);$$

Если $d\omega_{CLTR} = 0$

$$W_B = C_{WB} y_B \omega \, sign(\dot{x}_M).$$

Иначе

$$W_B = C_{WB} y_B \omega \, sign(d\omega_{CLTR}).$$

Сравнение с предельной силой сопротивления осуществляется по правилу

если $\left(|W_Z| > k|F_Z \omega| \right)$

$$W_Z = k|F_Z \omega| sign(W_Z);$$

иначе

$$W_Z = W_Z.$$

где индекс Z может принимать значения A или B; k – коэффициент превышения силы сопротивления покоя над силой сопротивления при передвижении машины (в данной модели принимается k = 1,25); ω – коэффициент сопротивления.

Второе, третье, четвертое и пятое уравнения системы (1) описывают вертикальные колебания неподрессоренных и подрессоренных масс машины, а также вращение рамы вокруг ее центра массы. Приведенная вращательная масса определяется соотношением

$$J_{PR} = J_M + J_L + m_L \left(h_L^2 + L_L^2 \right).$$

Шестое уравнение системы (1) описывает передачу вращающего момента M_{CLTR} от сцепления к колесам машины. Так как работа сцепления реализуется за счет сил сухого трения, величина передаваемого момента M_{CLTR} определяется условным соотношением следующего вида

$$M_{CLTR} = \begin{cases} |M_{CL0} \cdot \gamma| sign(d\omega_{DC}), \ \textit{если} \left(|d\omega_{DC}| > 0 \right) \textit{ИЛИ} \left(M_{CL0} \cdot \gamma < M_{DRV} \right); \\ M_{DRV}, \ \textit{иначе.} \end{cases}.$$

Здесь γ – параметр, определяющий степень выжатости сцепления водителем. γ = 0. Когда сцепление полностью выжато и не передает вращающий момент от двигателя; γ = 1 – сцепление полностью включено. M_{CL0} – максимально возможный передаваемый крутящий момент через сцепление.

Последним уравнением системы (1) определяется вращение вала двигателя под действием движущего момента M_{DRV} и, противостоящего последнему, момента со стороны сцепления M_{CLDR}, определяемого соотношением

$$M_{CLDR} = \begin{cases} M_{CL0} \cdot \gamma sign(d\omega_{DC}), \ \textit{если} \left(|d\omega_{DC}| > 0 \right) \textit{ИЛИ} \left(M_{CL0} \cdot \gamma < M_{DRV} \right); \\ M_W sign(d\omega_{DC}), \ \textit{иначе.} \end{cases}$$

где M_W – момент от усилий, противостоящих движению машины

$$M_W = |Fx - W_A - W_B| \frac{D_W}{2 i_{TR} \eta_{TR}}.$$

Момент M_{DRV}, создаваемый двигателем, определяется его механической характеристикой, в качестве которой принята линейная модель (рис. 1, в)

$$M_{DRV} = a_{DR} + b_{DR}\dot{\varphi}_{DRV},$$

а коэффициенты этой зависимости определяются соотношениями

$$b_{DR} = \frac{30 M_E}{\pi\left(n_0 - n_E\right)}; a_{DR} = -b_{DR}\frac{\pi n_0}{30}.$$

n_0 – частота вращения двигателя на холостом ходу; n_E – номинальная частота вращения двигателя при вращающем моменте равном M_E. При этом, номинальная частота вращения двигателя n_E может быть определена как произведение $n_E = n_0 / k_d$, где k_d – коэффициент приспосабливаемости, который для дизельного двигателя может быть принят в диапазоне 1,05 – 1,15 [9]. Частота холостого хода n_0 в модели является параметром, определяющим режим работы двигателя, и может быть задана от n_{MIN} до n_{MAX} в зависимости от заданной степени нажатия на педаль газа водителем. Минимальное и максимальное значение значения частоты вращения вала двигателя определяется по технической документации.

Номинальный момент M_E зависит от величины номинальной мощности N_E за заданном режиме работы двигателя

$$M_E = \frac{30000 N_E}{\pi n_E},$$

а номинальная мощность определяется эмпирической зависимостью

$$N_E(n_E) = N_{MAX}\left[a_d \frac{n_E}{n_N} + b_d \frac{n_E^2}{n_N^2} - c_d \frac{n_E^3}{n_N^3}\right],$$

где N_{MAX} – максимальная мощность двигателя; n_N – частота вращения двигателя при максимальной мощности.

Таким образом, представленная модель прямолинейного движения машины имеет нелинейности при определении силы сопротивления между колесами и дорогой, силы тяги и движущего момента, передаваемого через сцепление и трансмиссию к приводным колесам.

3. Пример использования разработанной модели

При помощи представленной выше модели возможно исследовать движение машины при различных режимах. Например, ниже представлены результаты расчета разгона машины КАМАЗ 43253-69 с грузом и без груза на дороге, имеющей различный угол наклона к горизонту.

Были приняты следующие параметры модели: m_M = 5570 кг; J_M = 20300 кг м^2; m_L = 7500 кг; m_A = 450 кг; m_B = 700 кг ; J_L = 20400 кг м^2; L_A = 1,8125 м;

L_B = 2,3875 м; L_L = 1,6 м; h_W = 1,2 м; h_L = 0,4 м; D_K = 1,055 м; $C_{SA} = C_{SB}$ = 1250 Н/м; $B_{SA} = B_{SB} = 25$ Нс/м ; $C_{WA} = C_{WB}$ = 1800 Н/м; $B_{WA} = B_{WB}$ = 142 Нс/м; M_{CL0} = 1200 Нм; J_{TR} = 3 кг м^2; i_{PR} = 36,7; N_{MAX} = 176 кВт; n_N = 2200 об/мин; n_{MIN} = 600 об/мин; n_{MAX} = 2530 об/мин; J_{DRV} = 5,8 кг м^2. Коэффициенты эмпирической зависимости, по которой определяется номинальная мощность двигателя КАМАЗ-740.11-240 имеют следующие значения: a_d = 0,5; b_d = 1,48; c_d = 1,09 [9]. Коэффициент сопротивления вращению колес ω принят равным 0,1, а коэффициент сцепления колес с дорогой φ_{AD} = 0,8.

Начальные условия для основного эксперимента определялись расчетом системы, состоящей из уравнений 2, 3, 4 и 5 из представленной выше системы (1) при нулевых начальных условиях. Это позволило найти исходное положение масс под действием сил тяжести.

В основном эксперименте угол наклона дороги β менялся от 0° до 35° с шагом 2,5°. Параметр γ, характеризующий степень действия пружины сцепления, изменялся от 0 до 0,5 за 1,5 с, затем от изменялся 0,5 до 1 за 1 с, после чего оставался неизменным. Уровень «газа» при разгоне находится на минимальном уровне, т.е. $n_E = N_{MIN}$ = 600 об/мин и двигатель разогнан до этой частоты вращения. Начальная скорость расторможенной машины равна нулю.

Исследование проводилось в пакете MATLAB при помощи функции ode45, позволяющей интегрировать дифференциальные уравнения методом Дорманда-Принса. Время симуляции составило 15 с.

В качестве анализируемых параметров были выбраны максимальная V_{MAX} и минимальная V_{MIN} скорости, достигаемая машиной при движении, а также величина отката машины назад Sneg и величина перемещения машины вперед Spos. Результаты моделирования приведены в виде графиков на рис. 2.

Представленные результаты говорят о том, что машина без груза, при указанных выше характеристиках движения, не может при разгоне преодолеть уклон дороги выше 20° включительно. При угле наклона выше 25° машина будет скатываться вниз из-за недостатка силы сцепления приводных колес.

При разгоне с грузом, за счет большей силы сцепления, преодолеваемый угол составляет 25°. При больших углах наклона машина не скатывается вниз, но и преодолеть уклон не может.

Скорость подъема машины без груза при углах наклона дороги от 0° до 17,5° на 3 – 7 % выше, чем с грузом, что объясняется большей загруженностью двигателя.

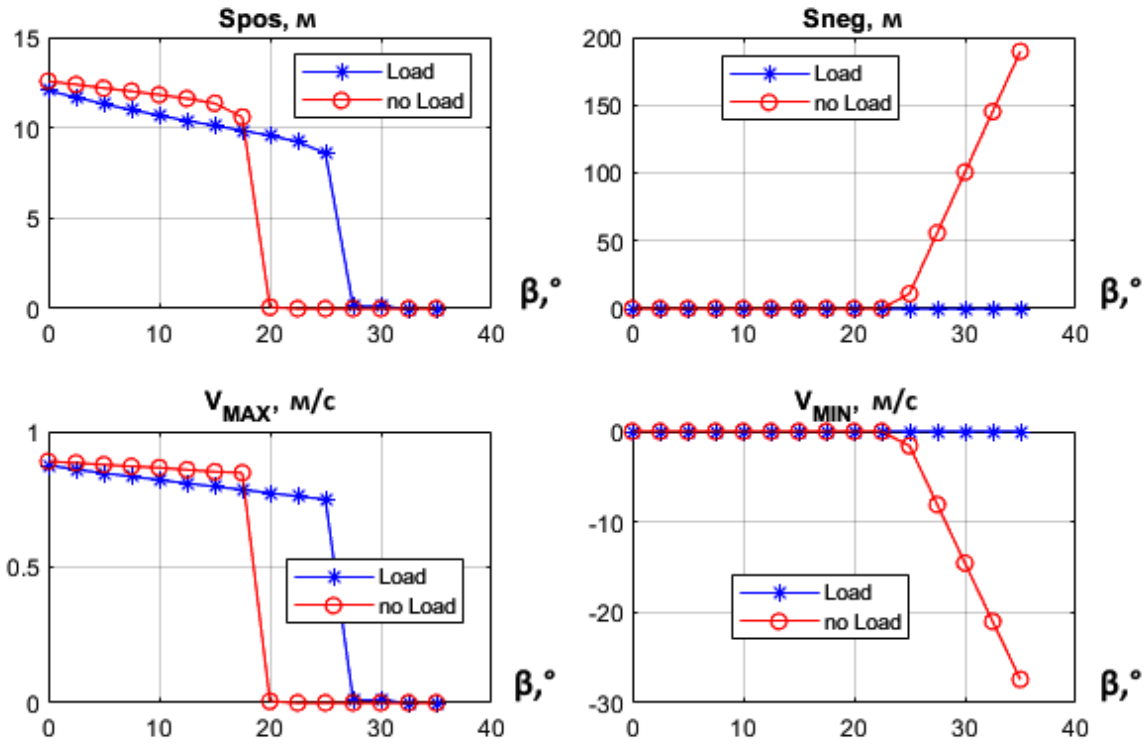


Рис. 2. Результаты расчета анализируемых параметров численного эксперимента

4. Заключение

Разработанная выше модель учитывает механическую характеристику двигателя, работу сцепления, соединяющего двигатель с приводными колесами, а также взаимодействие колес с дорогой, что расширяет возможности расчетчиков и исследователей при анализе различных режимов движения машины.

В рамках данной работы была показана возможность анализа процесса разгона грузовой машины, находящейся на дороге с уклоном. Полноценное же исследование требует анализа всех получаемых из модели параметров, задание иных начальных условий и определения показательных критериев качества движения, что является дальнейшей задачей, требующей решения.

Таким образом, применение представленной модели делает возможным моделирование разгона машины с газом; разгона с частично отпущенным сцеплением в первоначальный момент времени, или с различными

алгоритмами работы газом и сцеплением. Это позволит оценивать устойчивость движения машины, её устойчивость при опрокидывании, оптимизировать режимы пуска и движения машины в различных условиях, а также исследовать и создавать системы автоматического управления движением.

Список использованных источников

1. *Петренко А. М.* Устойчивость специальных транспортных средств: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2013, 41 с.
2. *Смирнов Г. А.* Теория движения колесных машин: Учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1990, 352 с.
3. *Старунова И. Н.* Теоретическое обоснование и исследование момента устойчивости колёсных машин при движении по склону // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2015. – №. 3 (53). – С. 95-98.
4. *Chu D. et al.* Rollover speed prediction on curves for heavy vehicles using mobile smartphone // Measurement. – 2018. – Т. 130. – С. 404-411.
5. *Shaohua L., Shaopu Y., Liqun C.* Investigation on cornering brake stability of a heavy-duty vehicle based on a nonlinear three-directional coupled model // Applied Mathematical Modelling. – 2016. – Т. 40. – №. 13-14. – С. 6310-6323.
6. *Hassan M. et al.* Investigating the effect of augmenting the anti-roll-bar with a torsional-dynamic-absorber on the handling-stability and the ride-comfort of the off-road-vehicles // Alexandria Engineering Journal. – 2023. – Т. 81. – С. 29-45.
7. *Ходес И. В., Илюхин М. Ю*. Поперечные угловые колебания двухосной колесной машины в режиме периодических подруливаний // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. – 2004. – №. 3. – С. 91-96.
8. *Никитин С. В., Бортяков Д. Е., Грачев А. А., Ковалев Д. И.* Модель механизма подъема, учитывающая переменные силы сопротивления. Современное машиностроение. Наука и образование. – 2026. – № 15. – С. 784-803. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id26-328.
9. *Кудрявцев Е.М.* Строительные машины и оборудование: Учебник. – М.: Изд. АСВ, 2012, 328 с.

DYNAMIC MODEL OF A TRUCK TAKING INTO ACCOUNT THE OPERATION OF THE CLUTCH AND ENGINE

Aleksandr V. Ashcheulov, D. Sc.,
Danil E. Bortyakov, Ph. D.,
Sergey V. Nikitin, Ph. D.,
Dmitriy I. Kovalev
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29H
E-mail: atsheulov_av@spbstu.ru, bortyakov@mail.ru, sergey_nikj@mail.ru,
kovalev.di@edu.spbstu.ru

Abstract. The study and design of machines are impossible without considering their models, which make it possible to determine the load on their main components under various operating conditions. The paper examines a dynamic model of a freight vehicle, which takes into account the grip of the wheels on the road, the operation of the clutch, and the mechanical characteristics of the engine. This model is applicable when studying the stability of a vehicle's movement, its stability in the event of rollover, the optimization of the starting and movement modes of the vehicle under various conditions, as well as when researching and developing automatic motion control systems.

Keywords: dynamic model; internal combustion engine model; adhesion forces; truck.

УДК 624.014:539.4
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-698

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПО СЕЧЕНИЮ КРУГЛОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ОТРЫВА

Иван Андреевич Васильев, канд. техн. наук,
Максим Валерьевич Пичугин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Ж
E-mail: vasiliev_ia@spbstu.ru, Pichugin_mv@spbstu.ru

Аннотация. Получено распределение эквивалентных напряжений по сечению стандартного круглого образца при испытании на растяжение. Полученное распределение сопоставляется с известными зависимостями, предложенными Бриджменом и Давиденковым. Полученные результаты позволят производить оценку критических напряжений в сечении шейки в момент разрушения. Произведена оценка влияния типа и размера конечных элементов при моделировании подобных процессов. Полученные результаты позволяют, в продолжении исследования, построить методику определения напряжений отрыва по результатам стандартных испытаний круглых образцов, что делают её доступной как в исследовательских целях, так и в процессе проектирования.

Ключевые слова: испытания круглых образцов; напряжения отрыва; метод конечных элементов; одноосное растяжение; методика оценки разрушения; распределение механических напряжений.

1. Введение

Для создания современных средств повышения надежности эксплуатации грузоподъёмных, строительно-дорожных машин и другого технологического оборудования, таких как системы мониторинга технического состояния с возможностью предиктивной оценки возможности разрушения, требуется разработка новых и совершенствование существующих методик оценки прочности несущих конструкций машин и оборудования [1 – 5].

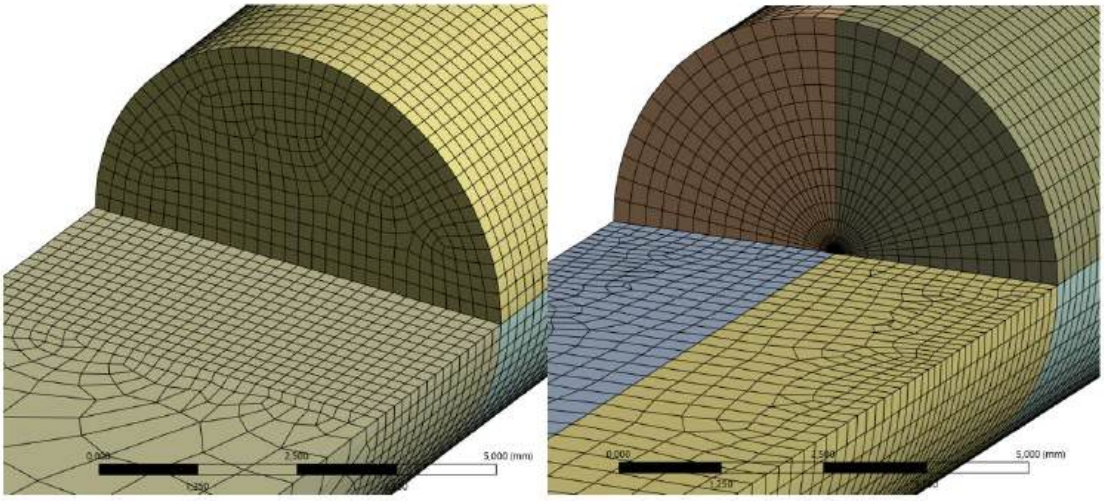
Данная работа является частью большого проекта по созданию перспективной системы мониторинга технического состояния несущих конструкций, отслеживающей не только текущие параметры (нагрузки в опорах, ветровые, весовые и прочие нагрузки, отклонение геометрических параметров относительно исходного состояния), но и обработку снимаемых значений математической моделью несущей конструкций, что обеспечит возможность не только определять текущее состояние, но и прогнозировать

нарушение несущей способности конструкции в будущем, с учетом особенностей конструкции [6].

Требуется разрабатывать новые методики оценки прочности конструкций с учетом различных факторов, таких как низкие температуры, высокая концентрация напряжений, развитие пластических деформаций и прочего [7, 8]. Данная работа содержит результаты поиска способа оценки напряжений отрыва стали с учетом предшествующих пластических деформаций.

2. Методика исследования

Исследование распределения напряжений по сечению круглого образца проводилось методом конечных элементов в среде Ansys. Материал определяется диаграммой деформирования, полученной в ходе эксперимента на образцах из стали 09Г2С. Для оценки влияния способа построения конечных элементов и их размера было проведено две серии расчетов: 1 – при автоматическом построении сетки (см. рисунок 1а); 2 – с построением sweep-методом (см. рисунок 1б). Состав обеих серий моделей представлен в таблице.



а) б)

Рис. 1. Вид сетки конечных элементов: а – сетка, построенная автоматическим инструментом (размер КЭ 0,2мм); б – Сетка построенная sweep методом (размер КЭ 0,2мм).

Отличие методов построения сетки заключается в том при sweep методе предварительно разбивается срединная грань модели на плоские элементы, а затем они вытягиваются вращением относительно геометрической оси. Это существенно упрощает построение сетки и сокращает время расчета модели по сравнению с автоматическим методом. Однако если в первом

случае, в исследуемой зоне модели получаются гексаэдальные элементы с заданным размером, то при sweep-методе в непосредственной близости от оси вращения получается группа призматических элементов, а размер элементов сохраняется лишь в радиусном направлении. Благодаря этому во второй группе моделей в центре получаются элементы плохого качества, так как один из размеров элемента сильно отличаются от других.

Состав серий проанализированных моделей

№ серии	№ модели	Метод построения	Размер элементов, мм
1	1	Automatic HEX	0,1
	2		0,2
2	3	Sweep	0,05
	4		0,1
	5		0,2
	6		0,4

3. Результаты

В результате расчета было получено распределение напряжений по центральному сечению образца. На рисунке 2 представлено распределение первого главного напряжения σ_1 в центральном сечении.

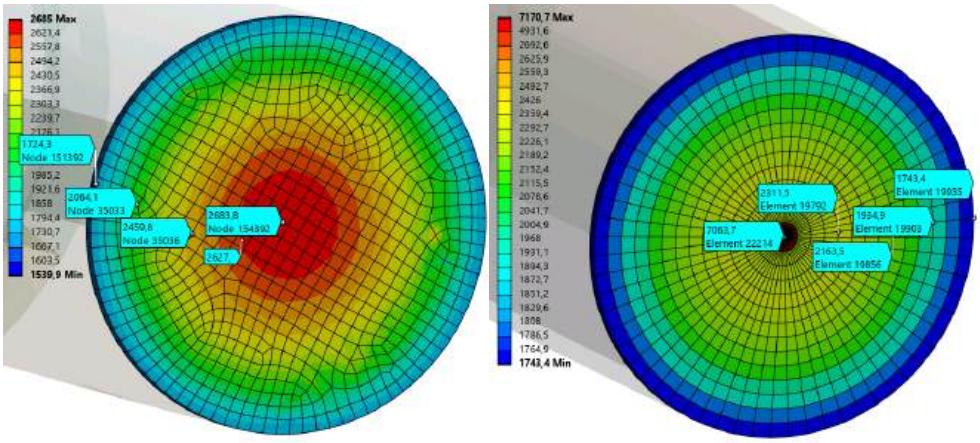


Рис. 2. Распределение первого главного напряжения σ_1 в центральном сечении:
а – первая группа моделей; б – вторая группа моделей.

По полученным результатам видно, что для моделей, полученных при построении сетки КЭ sweep-методом, характерна существенная неравномерность распределения напряжений. Так напряжения в элементах в близи оси образца отличаются от соседних элементов отличаются в 1,5…5 раз в зависимости от размера элементов. Расхождение результатов между первой

и второй группой моделей уменьшается с уменьшением размера элементов. Как следует из графиков распределения первого главного напряжения вдоль диаметральной линии центрального сечения результаты, полученные по второй группе слабо применимы, из-за высоких скачков напряжений в центре модели (см. рисунок 3), номерами обозначены модели из табл.1.

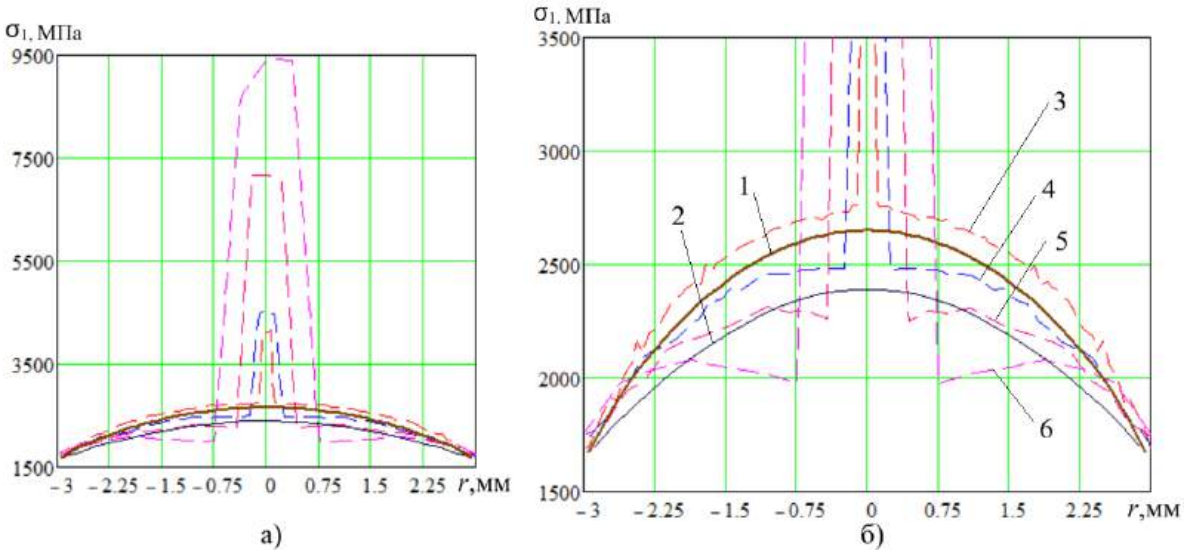


Рис. 3. График распределения первого главного напряжения в диаметральной: а – общий вид графика; б – укрупненный вид графика.

Полученные кривые сопоставлялись с известными аналитическими зависимостями, предложенные ученными Бриджменом и Давиденко-Спиридоновой [9, 10].

$$\sigma_z(r) = \left(1 + \ln\frac{a^2+2aR-r^2}{2aR}\right) \cdot Y \text{ – } \textit{по Бриджмену} \quad (1)$$

$$\sigma_z(r) = \left(1 + \frac{a^2+r^2}{2aR}\right) \cdot \sigma_s \text{ – } \textit{по Давиденкову-Спиридоновой} \quad (2)$$

Для использования данных аналитических зависимостей необходимо использовать радиусы шейки образца в продольном и поперечном направлении (см. рисунок 4), которые определялись по деформированному состоянию КЭ модели.

На рисунке 5 представлен сравнительный график результатов расчетов и аналитические зависимости. Аналитические зависимости дают значения выше, рассчитанных в ходе КЭ анализа. Так, максимальное расхождение результатов на модели №2 с размером КЭ 0,2мм со значениями, определёнными по выражениям 1 и 2, не превышает 6,5 % и 25,5 % соответственно.

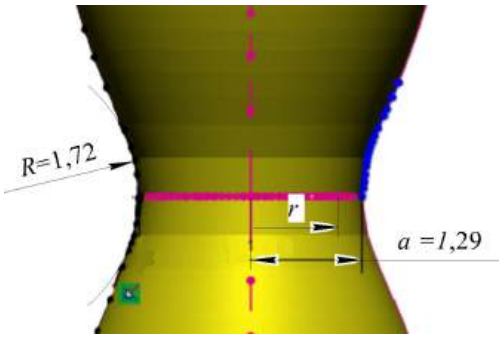


Рис. 4. Определение геометрических параметров по деформированному состоянию модели (Модель №2)

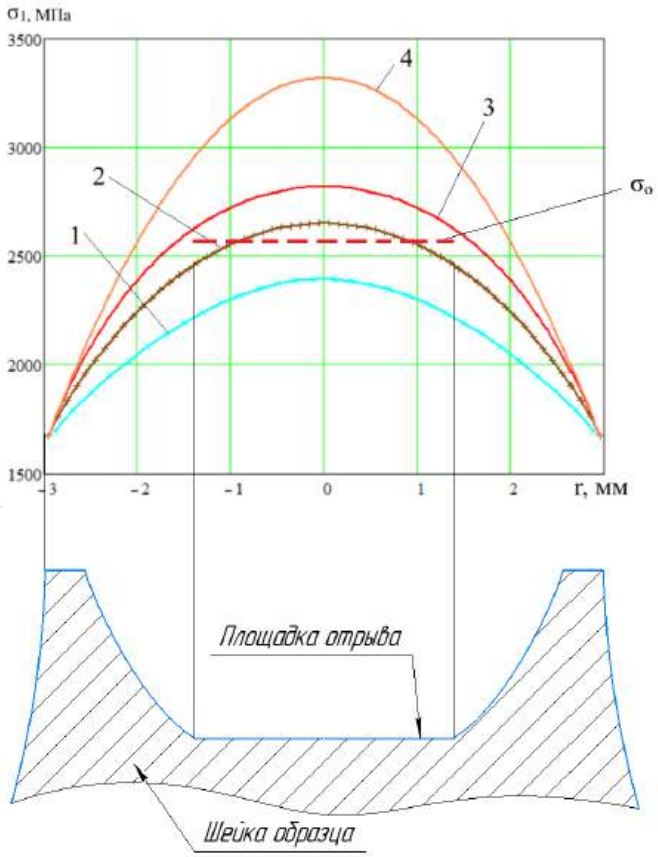


Рис. 5. Сравнительный график напряжений: 1,2 модели первой серии при размерах КЭ 0,1мм и 0,2мм; 3 – График зависимости 1; 4 – График зависимости 2

Для определения напряжений отрыва следует учитывать характер поверхности разрушения, так для пластичных сталей характерна форма разрушения «чашечка» (см. рисунок 5). Предлагается определять напряжения отрыва как среднее значение σ_o по плоской части поверхности разрушения, показано, обозначено жирной линией на рисунке 5.

4. Заключение

Исследование показывает, что форма и способ построения сетки конечно-элементной модели оказывают существенное влияние на результаты исследования. Так определено, что sweep-метод построения сетки не предпочтителен для моделирования цилиндрических стержней, ввиду получения высокой неравномерности по размерам элементов в центре и на периферии образца, как следствие высокая неравномерность получаемых результатов. Методы построения сетки на основе гексаэдальных элементов с более однородным размером элементов в рассматриваемом сечении дают более пригодные для анализа результаты, которые достаточно хорошо согласуются с базовыми аналитическими зависимостями.

Полученные результаты говорят о целесообразности продолжения исследования, так как позволят уточнить существующие зависимости, необходимые для разработки методик оценки прочности, где напряжения отрыва играют роль ключевого критерия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–79-00289, https://rscf.ru/project/25-79-00289/.

Список использованных источников

1. *Гарифуллин Н. М.* Система дистанционного контроля напряженно-деформированного состояния трубопроводов на базе электромагнитного метода. Вестник Башкирск. ун-та. 2017. №2. С.336-338.
2. *Шкутов И. В.* Разработка комплекса измерения напряженно-деформированного состояния нефтегазопровода на основе внутритрубных инспекционных приборов с применением инклинометров. Севергеоэкотех-2022 : Материалы XXIII Международной молодежной научной конференции, Ухта, 16–18 марта 2022 года. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2022. – С. 458-461.
3. *Kralovec C., Schagerl M.* Review of Structural Health Monitoring Methods Regarding a Multi-Sensor Approach for Damage Assessment of Metal and Composite Structures. Sensors. 2020; 20(3):826.
4. *Агафонов К. В., Валяев О. А.* Мониторинг силовых металлоконструкций с учетом скрытых дефектов материалов. Современные материалы, техника и технологии. 2019. №2 (23). – С. 125-130.
5. *Аганов И. А., Осадчий Г. В., Ефанов Д. В., Мирошниченко О. В., Кубрак В. Ю.* Система мониторинга инженерных конструкций на пуровском мосту // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2021. №5-6 (96-97).

6. *Васильев И. А., Пичугин М. В.* Система мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкции технологического оборудования // Строительные и дорожные машины. – 2026. – № 5. – С. 42-50.
7. *Соколов С. А., Тулин Д. Е.* Математическая модель хрупкого разрушения детали с трещиной // Физическая мезомеханика. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 67-75.
8. *Покровский А. М., Матвиенко Ю. Г.* Двухпараметрический критерий разрушения, учитывающий двухмерное стеснение деформации по фронту трещины смешанного типа. Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023, № 6, С. 11-21.
9. *Бриджмен П. В.* Исследования больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов / Пер. с англ. А.И. Лихтера; Под ред. Л. Ф. Верещагина. — Москва : Изд-во иностр. лит., 1955, 444 с.
10. *Качанов Л. М.* Основы теории пластичности / Москва: Изд-во Наука, 1969. – 420с.

ASSESSMENT OF STRESS DISTRIBUTION ACROSS THE CROSS-SECTION OF A CIRCULAR ROD UNDER UNIAXIAL TENSION TO DETERMINE PEEL STRESSES

Ivan A. Vasilev, Ph. D.,
Maxim V. Pichugin
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29ZH
E-mail: vasiliev_ia@spbstu.ru, Pichugin_mv@spbstu.ru

Abstract. The distribution of equivalent stresses across the cross-section of a standard round specimen under tensile testing has been obtained. The obtained distribution is compared with the known relationships proposed by Bridgman and Davydenkov. The results obtained will make it possible to assess the critical stresses in the neck cross-section at the moment of failure. The influence of the type and size of finite elements in modeling such processes has been assessed. The obtained results make it possible, in the continuation of the study, to develop a methodology for determining peel stresses based on the results of standard tests of round samples, which makes it accessible both for research purposes and in the design process.

Keywords: round sample tests; peel stresses; finite element method; uniaxial tension; failure assessment methodology; distribution of mechanical stresses.

УДК 623.437.3.093; 629.03; 629.36
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-699

КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

Егор Олегович Забродкин,
Максим Денисович Ожигин,
Роман Юрьевич Добрецов, д-р техн. наук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: zabrodkin.eo@edu.spbstu.ru, ozhigin.md@edu.spbstu.ru, dr-idpo@yandex.ru

Аннотация. Предложена концепция электромеханической подвески быстроходной гусеничной машины с вращающимся электроприводом и модифицированным буферно-демпфирующим узлом. Рассмотрены компоновка узла, блокировка демпфирующего узла и принципы работы системы управления. Применение демпфирующего узла направлено на снижение влияния инерционных масс на электродвигатель и улучшение характеристик подвески в высокочастотной области.

Ключевые слова: электромеханическая подвеска; быстроходная гусеничная машина; активная подвеска; электромагнитный амортизатор.

1. Введение

Одним из наиболее известных примеров активной электромагнитной подвески стала разработка компании Bose для легковых автомобилей [1]. Несмотря на высокий потенциал такой схемы с точки зрения комфорта и управляемости, она не получила массового распространения. На практике это объясняется не только высокой стоимостью, но и сложностью реализации: для таких систем требуются быстродействующие исполнительные устройства, развитая сенсорика, точные алгоритмы управления и решение задач тепловой нагруженности и надежности.

Для гусеничных машин средней и большой массы прямое применение принципов, заложенных в подвеске Bose, представляется еще более затруднительным. Это связано с возрастанием требуемых усилий, массогабаритных ограничений и более жесткими требованиями к живучести и отказоустойчивости ходовой части. В этих условиях более реалистичной альтернативой может выступать электромеханическая подвеска, в которой электрическая машина не заменяет всю систему подрессоривания, а устанавливается вместо традиционного амортизатора. В случае телескопической

схемы на его месте может быть использован линейный электродвигатель. При этом упругий элемент сохраняется в составе подвески и продолжает выполнять базовые функции восприятия нагрузки.

Такое построение дает несколько практических преимуществ. Во-первых, упругий элемент обеспечивает беззазорную связь ротора электрической машины с направляющими элементами подвески. Во-вторых, он разгружает электромеханический привод на основных режимах движения, что снижает потребную постоянную мощность. В-третьих, даже при отказе электрической машины транспортное средство сохраняет возможность самостоятельного передвижения за счет сохранения пассивной упругой части.

Вместе с тем внедрение электромеханической подвески неизбежно сопровождается ростом себестоимости и усложнением ходовой части, что может негативно сказаться на ее надежности. Однако в ряде случаев эти недостатки могут быть оправданы повышением средней скорости движения машины, улучшением плавности хода и расширением возможностей адаптивного управления. Дополнительным преимуществом таких систем считается возможность рекуперации части энергии колебаний.

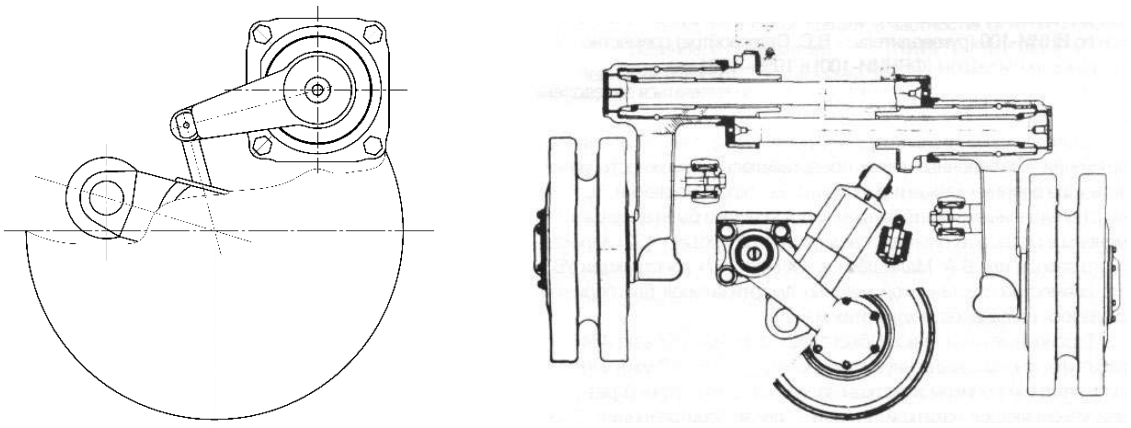
Цель исследования заключается в разработке концепции электромеханической подвески для транспортных машин и в формировании принципов построения системы управления, обеспечивающей эффективное использование ее технических возможностей при сохранении работоспособности и эксплуатационной надежности.

2. Обзор решений

Определяющими факторами являются улучшение подвижности, проходимости и средней скорости быстроходной гусеничной машины (БГМ). Активная подвеска представляет особый интерес, поскольку она оказывает прямое влияние на допустимую скорость движения транспортного средства за счет снижения вибронагруженности корпуса, уменьшения динамических нагрузок в элементах ходовой части и повышения устойчивости машины при движении по неровному основанию. Следовательно, совершенствование параметров и структуры подвески следует рассматривать как один из ключевых путей повышения средней скорости движения БГМ.

В подавляющем большинстве подвесок современных БГМ в качестве демпфирующего элемента используются телескопические амортизаторы, менее распространены с рычажно-лопастным амортизатором (Т-72, Т-62 и *M1 Abrams*) и с рычажно-поршневым амортизатором (ПТ-76, *Alvis*

Stormer) [2]. Схематичный вид подвески: с гидравлическим или фрикционным амортизаторами (а) и с телескопическим амортизатором (б) изображены на рис. 1.



а б

Рис. 1. Устройство подвески опорного катка БГМ: а) с рычажно-лопастным (рычажно-поршневым или фрикционным) амортизатором, несоосным с торсионом; б) с телескопическим амортизатором (опытное шасси «Объект 430»)

Установка линейного двигателя на место телескопического амортизатора или проектирование системы, включающей линейный ЭД сталкивается со следующими проблемами: размер линейного электродвигателя, его высокая стоимость, а также большой вес; что усложняет применение такой системы на практике. В исследовании по установке линейного актуатора на танк *M1A1 Abrams* было отмечено, что «в таком случае ход линейного актуатора был бы 20 дюймов, что слишком велико. А также такой актуатор потреблял бы слишком большое количество мощности» и выбор пал на вращающийся электродвигатель» [3].

В исследованиях поднимается вопрос замены серийно выпускаемого лопастного амортизатора высокомоментной электрической машиной [4], а также предлагается методика расчета кинематического передаточного отношения [5]. Системы с вращающимися электродвигателями обычно оснащаются трансмиссионными механизмами. К ним, как правило, относятся шарико-винтовые передачи, зубчатые (в том числе – реечные) передачи, гидравлические системы преобразования, шарнирные механизмы и другие устройства. В результате использование таких передач приводит к увеличению инерционных нагрузок. В работе [6] предлагается решение проблемы инерционных масс путем установки *SBDS* (англ. *Series Buffering and Damping Structure* – последовательная буферная и демпфирующая структура)

(рис. 2). Результаты стендовых испытаний подвески с *SBDS* и подвески без него представлены в таблице 1.

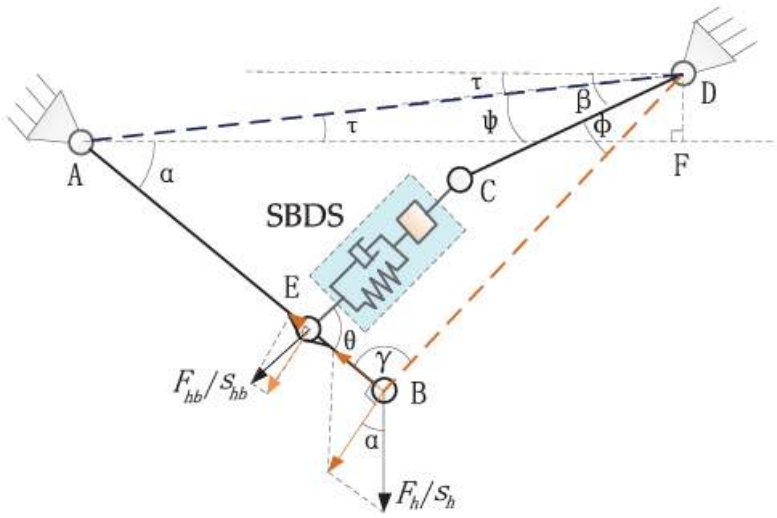


Рис. 2. Кинематическая схема с учетом SBDS [6]

Таблица 1. Сравнение данных испытаний подвески [6]
(класс дороги определяется в стандарте[1])

Дорожное воздействие	**Состояние**	**Среднеквадратичное значение ускорения кузова, м/с²**	**Среднеквадратичное значение динамической нагрузки колеса**	**Среднеквадратичное значение хода подвески, мм**
Дорога класса D, 60 км/ч	Без *SBDS*	8.41	1.03	26.87
	С *SBDS*	3.46	0.46	27.14
	Изменение (%)	-58.86	-55.34	+1.00
Дорога класса E, 40 км/ч	Без *SBDS*	13.73	1.69	44.08
	С *SBDS*	6.13	0.73	42.17
	Изменение (%)	-55.35	-56.80	-4.33
Дорога класса F, 20 км/ч	Без *SBDS*	18.53	2.26	57.88
	С *SBDS*	9.75	0.99	55.76
	Изменение (%)	-47.38	-56.19	-3.66

При этом выбор электромашины также является важной частью концепции, поскольку именно он определяет компромисс между развиваемым

[1]ISO 8608:2016. Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data.

демпфирующим моментом, инерционностью привода, массогабаритными показателями, диапазоном регулирования, возможности рекуперации и требованиями к передаточному механизму. Анализ задачи показывает, что для гусеничных машин применение вращательных электромагнитных амортизаторов упирается прежде всего в проблему избыточного момента инерции ротора и трансмиссионных звеньев – при увеличении передаточного отношения повышаются демпфирующие возможности, однако одновременно ухудшаются плавность хода, диапазон управляющего воздействия и надежность узлов подвески [7]. В этой связи, например, в работе [7] предложен облегченный адаптивный электромагнитный амортизатор *LR-AESA* для гусеничных машин, в котором за счет двухстаторной симметричной схемы уменьшена осевая длина ротора и, соответственно, его момент инерции при сохранении требуемого демпфирующего момента.

3. Выбор технологий

Проработку концепции целесообразно начинать с выбора прототипа. В качестве прототипа подвески предлагается взять схему с рычажно-лопастным амортизатором (рис. 1, а). При несоосном расположении ротора амортизатора и верхней головки балансира появляется возможность эффективнее использовать пространство борта машины, либо увеличивая дорожный просвет и динамический ход опорного катка, либо снижая высоту центра подрессоренных масс [4, 5]. В концепции предлагается сохранить в составе подвески упругий элемент, что позволит обеспечить беззазорное соединение вала электромашины и направляющих элементов системы подрессоривания на ходах сжатия и отбоя, снизить нагрузки на электромашину и гарантировать возможность самопередвижения шасси при отказе электропривода (см. рис. 3).

В качестве электромашины предлагается выбрать гипотетическую электромашину, имеющую конструкцию, аналогичную *LR-AESA*, а также дополнить схему последовательной буферно-демпфирующим узлом с оригинальным механизмом блокирования для работы на низких скоростях БГМ.

Узел, являющийся модификацией *SBDS* [6], представлен на рисунке 4. Модификация имеет переработанный корпус, дополненный проушиной на корпусе для крепления к рычагу амортизатора. А также механизм блокировки, предназначенный для расширения диапазона эффективной работы конструкции. Блокировка осуществляется зажатием упорного элемента - штокового узла гидравлическим поршнем.

За основу взято гусеничное шасси-аналог серийной российской машины, с рычажно-лопастными амортизаторами. Такая конструкция позволяет имплементировать рассмотренные выше разработки, не изменяя конструкции борта машины.

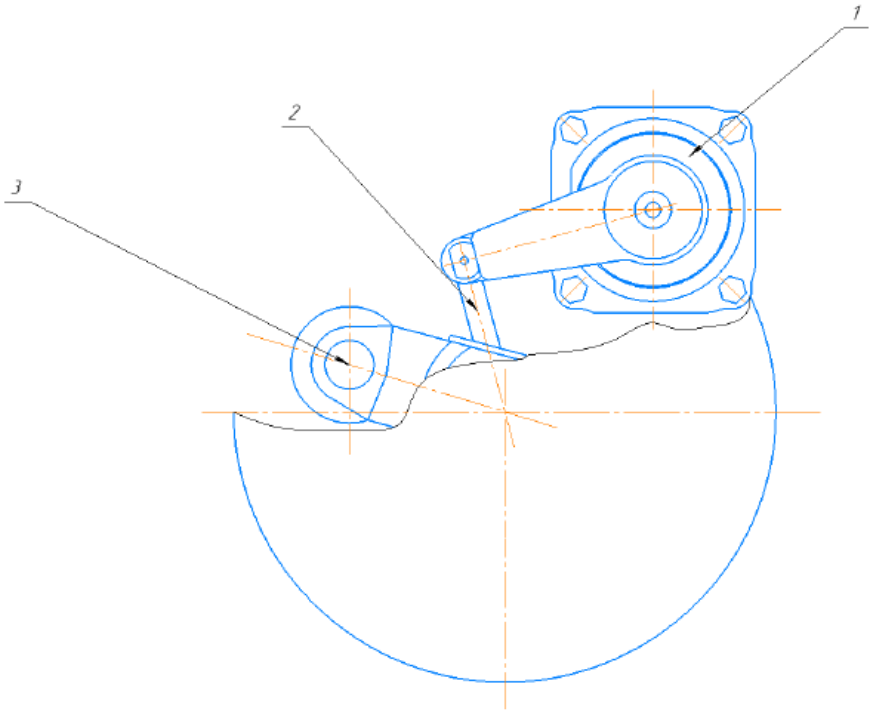


Рис. 3. Схема концепции с учетом размеров прототипа: 1 – электромотор с двухстаторной симметричной схемой; 2 – буферно-демпфирующий узел; 3 – торсион

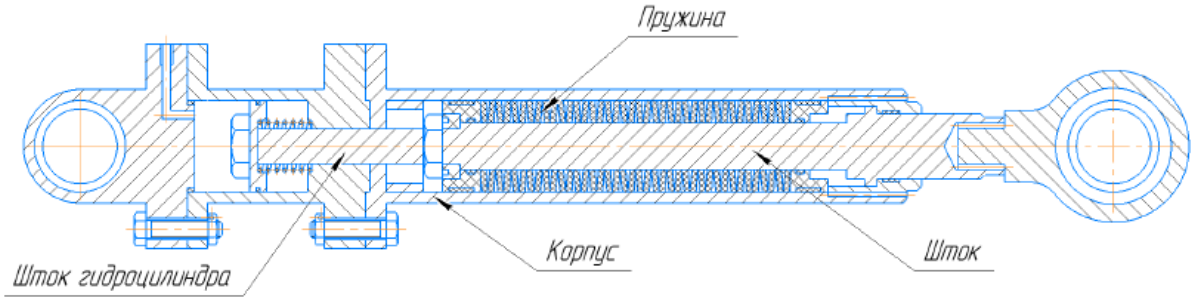


Рис. 4. Модифицированный вариант SBDS [6] с механизмом блокировки

4. Система управления

Система управления электромеханической подвеской быстроходной гусеничной машины должна представлять собой иерархическую цифровую замкнутую систему реального времени, обеспечивающую демпфирование колебаний, координацию работы подвесочных узлов, повышение плавности хода, устойчивости корпуса и допустимой средней скорости движения при одновременном снижении динамической нагруженности ходовой части.

На рис. 5. представлена система блокировки демпфирующего узла.

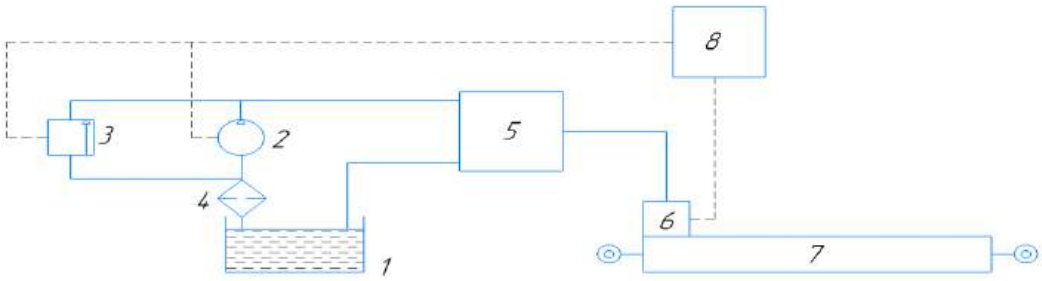


Рис. 5. Схема системы управления блокировкой демпфирующей структурой: 1 – поддон; 2 – насос; 3 – предохранительный клапан; 4 – фильтр; 5 – гидравлический блок; 6 – электромагнитный клапан; 7 – объект управления; 8 – электронный блок управления

В отличие от традиционного амортизатора, электромеханическая подвеска работоспособна лишь при наличии развитого контура управления, включающего непрерывное измерение параметров состояния, вычисление управляющих воздействий и их распределение по исполнительным каналам. Рациональной является архитектура, в которой центральный электронный блок управления координирует работу локальных блоков подвесок левого и правого бортов, непосредственно управляющих электромашинами отдельных опорных катков. В состав системы целесообразно включать датчики углов поворота балансиров, вертикальных и угловых ускорений корпуса, датчик скорости движения, каналы связи с системой управления двигателем и трансмиссией, а также бортовой накопитель энергии, обеспечивающий сглаживание пиковых нагрузок и прием рекуперируемой энергии. Современные исследования активных подвесок рассматривают исполнительную часть и алгоритмы управления как единую мехатронную систему, причем практическая реализация определяется не только законом управления, но и характеристиками привода и его интеграцией в архитектуру транспортного средства [8].

Особое значение для быстроходной машины имеет предиктивный контур активного управления, использующий информацию от передних подвесочных узлов, датчиков ускорений и скорости, а в перспективе – и от средств обзора профиля пути. Следовательно, система управления должна одновременно решать две задачи: локально формировать требуемые силовые характеристики электромашин и глобально обеспечивать согласованное пространственное поведение корпуса. Эффективность такой системы

определяется снижением вертикальных и угловых ускорений, уменьшением амплитуд колебаний, повышением допустимой скорости движения по неровному профилю, ограничением динамических нагрузок на элементы ходовой части и более полным использованием энергетического потенциала бортовой сети. Для таких систем существенными параметрами являются доступное время упреждения, точность оценки профиля дороги и быстродействие исполнительного привода, поскольку они непосредственно влияют на достижимую эффективность предиктивного управления [9].

5. Заключение

В работе предложена концепция электромеханической подвески быстроходной гусеничной машины с вращающимся электродвигателем, в которой сохранен штатный упругий элемент, а в силовую цепь введен модифицированный буферно-демпфирующий узел, за основу которого взята структура *SBDS* [6]. В отличие от схем с прямым применением линейного электропривода, рассматриваемый вариант ориентирован на использование вращающейся электрической машины и может быть адаптирован к существующим компоновкам подвесок с рычажно-лопастным амортизатором.

Научная новизна предлагаемой концепции заключается в совместном применении вращающегося электромеханического привода, буферно-демпфирующей структуры типа *SBDS* [6] и механизма ее блокировки. Такое построение направлено на частичное снижение негативного влияния инерционных масс ротора и элементов передаточного механизма на динамические характеристики подвески и на расширение диапазона ее эффективной работы.

К основным достоинствам предлагаемой схемы относятся возможность сохранения пассивной упругой части подвески, снижение нагрузки на электромеханический привод в ряде режимов, сохранение ограниченной работоспособности ходовой части при отказе электропривода, а также потенциальная возможность рекуперации энергии колебаний.

Вместе с тем предлагаемая конструкция имеет ряд ограничений. Введение электромеханического привода, дополнительных передаточных звеньев и буферно-демпфирующего узла приводит к усложнению конструкции, увеличению стоимости и предъявляет более высокие требования к надежности, тепловому режиму, системе электропитания и алгоритмам управления. Эффективность предложенной схемы в настоящее время обоснована на

концептуальном уровне и требует дальнейшей расчетной и экспериментальной проверки.

Дальнейшее совершенствование конструкции связано с определением параметров электромашины и передаточного механизма, выбором характеристик буферно-демпфирующего узла и закона его блокировки, разработкой алгоритмов активного и предиктивного управления, а также проведением имитационного моделирования и стендовых испытаний.

Список использованных источников

1. Bose “Beyond Sound” Experience During CES 2017 [Электронный ресурс]. – Bose, 2017. – 5 January. – URL: https://www.bose.com/pressroom/bose-beyond-sound-experience-during-ces-2017 (дата обращения: 12.03.2026).
2. *Дядченко М. Г., Котиев Г. О., Сарач Е. Б.* Конструкция и расчет подвесок быстроходных гусеничных машин: учебное пособие. Ч. 1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – ISBN 978-5-7038-3093-2.
3. *Kovnat A. R.* Electromechanical Actuators for Active Suspension Systems. – Warren, MI: U.S. Army Tank-Automotive Research, Development and Engineering Center, 1996. – Technical Report 13703.
4. *Добрецов Р. Ю., Забродкин Е. О., Матросов С. И.* Принципы построения электромеханической подвески в варианте модернизации системы подрессоривания с лопастным амортизатором // Транспортные системы: сборник трудов V Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 196–203.
5. *Добрецов Р. Ю., Забродкин Е. О., Матросов С. И.* Методика определения значения кинематического передаточного отношения в электромеханической подвеске транспортной машины при несоосном расположении ротора и верхней головки балансира // Транспортные системы: сборник трудов V Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 258–266.
6. *Song H., Zhao T., Wang X., Gu L.* Research on the configuration of electromechanical suspension based on inertial force attenuation structure // Advances in Mechanical Engineering. – 2024. – Vol. 16. – No. 9. – Pp. 1–22. – DOI: 10.1177/16878132241284371.
7. *Zhao T., Li D., Ye L., Guo B., Li Z., Ma T.* Design and Performance Analysis of a New Lightweight Rotor Adaptive Electromagnetic Shock Absorber for Armored Vehicles // International Journal of Automotive Technology. – 2023. – Vol. 24. – No. 3. – Pp. 643–654. – DOI: 10.1007/s12239-023-0054-1.
8. *Yu M., Evangelou S. A., Dini D.* Advances in Active Suspension Systems for Road Vehicles // Engineering. – 2024. – Vol. 33. – Pp. 160–177. – DOI: 10.1016/j.eng.2023.06.014.
9. *Theunissen J., Tota A., Gruber P., Dhaens M., Sorniotti A.* Preview-based techniques for vehicle suspension control: a state-of-the-art review // Annual Reviews in Control. – 2021. – Vol. 51. – Pp. 206–235. – DOI: 10.1016/j.arcontrol.2021.03.010.

CONCEPT OF AN ELECTROMECHANICAL SUSPENSION FOR A HIGH-SPEED TRACKED VEHICLE

Egor O. Zabrodkin,
Maksim D. Ozhigin,
Roman Yu. Dobretsov, D. Sc.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: zabrodkin.eo@edu.spbstu.ru, ozhigin.md@edu.spbstu.ru, dr-idpo@yandex.ru

Abstract. A concept of an electromechanical suspension for a high-speed tracked vehicle with a rotary electric drive and a modified buffering and damping unit is proposed. The unit layout, damping-unit locking, and the operating principles of the control system are considered. The damping unit is intended to reduce the effect of inertial masses on the electric motor and improve suspension performance in the high-frequency range.

Keywords: electromechanical suspension; high-speed tracked vehicle; active suspension; electromagnetic shock absorber.

УДК 621.869.3:004.94
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-700

НАГРУЖЕННОСТЬ ОПОРНЫХ КАТКОВ И ТРАКОВ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ БУЛЬДОЗЕРА ПРИ РАБОТЕ В РЕЖИМЕ КОПАНИЯ ГРУНТА

Игорь Вадимович Лесковец, канд. техн. наук
Белорусско-Российский университет
Беларусь, 212000, Могилев, пр-т Мира, 43
E-mail: leskovets1966@mail.ru

Алексей Андреевич Грачев, канд. техн. наук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: springbird@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования нагрузок, действующих на элементы гусеничного движителя бульдозера (опорные катки и траки) в режиме копания грунта. Выполнен анализ современных отечественных и зарубежных работ, посвящённых моделированию взаимодействия гусеничного движителя с опорной поверхностью, динамическим нагрузкам и усталостной долговечности. Представлены математические модели взаимодействия опорного катка с грунтом и трака с катком и грунтом, учитывающие упруго-диссипативные свойства подвески и шарнирных соединений. На основе имитационного моделирования получены характеристики сил, нагружающих катки и траки, для различных толщин стружки. Установлено, что максимальные вертикальные нагрузки возникают на катках, расположенных ближе к рабочему оборудованию, а также в моменты наезда катков на траки. Коэффициенты динамичности для траков достигают значений 60–70, что существенно превышает традиционно принимаемые статические коэффициенты.

Ключевые слова: гусеничный бульдозер; гусеничный движитель; опорный каток; трак; математическая модель; имитационная модель; динамические нагрузки; коэффициент динамичности.

1. Введение

Гусеничные бульдозеры являются основными машинами для послойной разработки грунтов в строительстве, горном деле и мелиорации. Наиболее тяжёлые условия работы соответствуют режиму копания, когда отвал внедряется в грунт, формируется и транспортируется призма волочения. В это время гусеничный движитель испытывает значительные динамические нагрузки, которые действуют на элементы ходовой системы неравномерно

и значительно зависят от стадии рабочего процесса, свойств грунта и конструктивных параметров машины.

Анализ современного состояния исследований показывает, что определение нагрузок на опорные катки и траки является сложной многодисциплинарной задачей. В работах [1 – 3] предлагаются подходы на основе многотельной динамики для оценки общих силовых факторов, действующих на движитель. Авторы [4, 5] используют метод конечных элементов (МКЭ) для анализа напряжённо-деформированного состояния траков и катков. В публикациях [6 – 8] применяется метод дискретных элементов для моделирования взаимодействия траков с грунтом, что позволяет учесть несплошность среды. Однако большинство исследований либо рассматривают элементы движителя изолированно, либо не учитывают циклический характер нагружения при копании.

В работах [9, 10] показано, что статические расчёты дают погрешность до 30 – 40 % по сравнению с экспериментальными данными, а использование усреднённых коэффициентов динамичности не отражает реальных пиковых нагрузок. Исследования российских авторов [11, 12] предлагают методики натурных тензометрических испытаний, но они дорогостоящи и могут быть проведены лишь на поздних стадиях проектирования. Зарубежные работы [13, 14] демонстрируют перспективность комбинированных подходов MBS–FEA и MBS–DEM–FEA, позволяющих передавать нагрузки между уровнями моделирования и получать внутренне согласованные результаты.

Таким образом, актуальной является разработка имитационных моделей, которые на этапе функционального проектирования позволяют определять динамические нагрузки на все элементы гусеничного движителя с учётом их взаимного влияния и реальных условий эксплуатации.

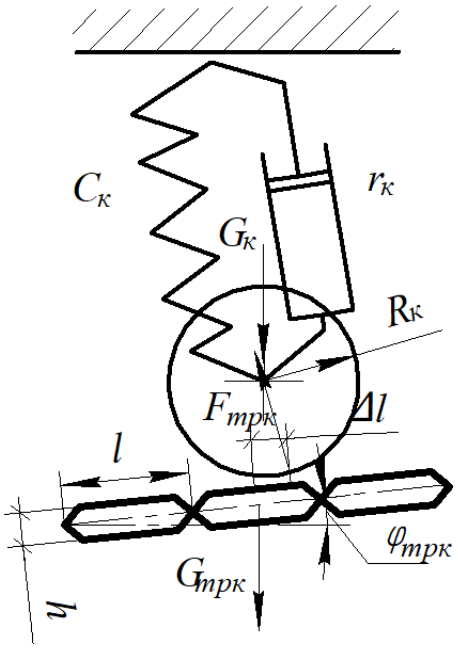
2. Постановка задачи

Целью данной работы является определение нагрузок, действующих на опорные катки и траки гусеничного движителя бульдозера при работе в режиме копания грунта, на основе комплексного имитационного моделирования, учитывающего взаимодействие систем «движитель – подвеска – грунт», а также выявление закономерностей изменения силовых факторов в зависимости от толщины стружки и положения элементов в гусеничном обводе.

3. Математические модели и методы

3.1. Модель взаимодействия опорного катка с грунтом

Динамическая модель опорного катка (рис. 1) основана на системном подходе, учитывающем вертикальные перемещения катка относительно рамы и деформации грунта под траками. В локальной системе координат гусеничного движителя каток может перемещаться только в вертикальном направлении, так как рассматривается свечная подвеска.



C_k – коэффициент жесткости подвески, r_k – коэффициент демпфирования подвески, G_k – масса колеса с подвеской, R_k – радиус колеса, $F_{трк}$ – сила взаимодействия между траком и колесом, Δl – расстояние от центра трака до точки контакта с колесом, l – длина трака, h – высота трака, $G_{трк}$ – сила тяжести трака, $\varphi_{трк}$ – угол наклона трака

Рис. 1. Динамическая модель опорного катка

Уравнение движения катка имеет вид:

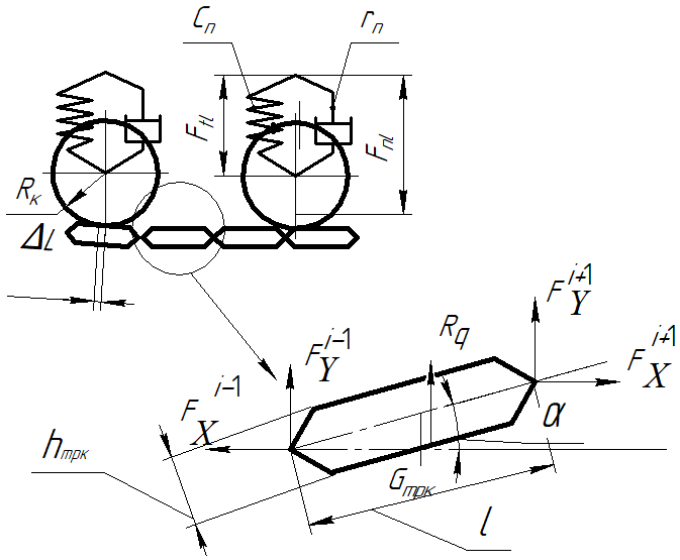
$$m_k \ddot{y}_k + c_p(y_k - y_t) + r_p(\dot{y}_k - \dot{y}_t) + F_{gr} = 0, \quad (1)$$

где m_k – масса катка, c_p – коэффициент жёсткости подвески, r_p–коэффициент демпфирования, y_k и y_t – вертикальные перемещения катка и трака соответственно, F_{gr} – сила реакции грунта, определяемая по модели упругого основания (линейная зависимость от глубины внедрения трака).

Взаимодействие катка с траком моделируется через контактную силу, пропорциональную взаимному перемещению и скорости (модель Кельвина – Фойгта).

3.2. Модель взаимодействия трака с катком и грунтом

Для описания сил, действующих на отдельный трак, разработана математическая модель, в которой трак рассматривается как твёрдое тело, соединённое с соседними звеньями упруго-диссипативными шарнирами. Схема сил представлена на рис. 2.



C_n – коэффициент жесткости подвески, r_n – коэффициент демпфирования подвески, R_k – радиус колеса, F_{tl} – текущая длина подвески, F_{nl} – начальная длина подвески, Δl – расстояние между центром трака и точкой контакта с колесом, $h_{трк}$ – высота трака, F_X^{i-1} – усилие взаимодействия с предыдущим траком вдоль оси абсцисс, F_Y^{i-1} – усилие взаимодействия с предыдущим траком вдоль оси ординат, R_q – усилие взаимодействия трака с опорной поверхностью, $G_{трк}$ – сила тяжести трака, F_Y^{i+1} – усилие взаимодействия трака с последующим траком вдоль оси ординат, F_X^{i+1} – усилие взаимодействия трака с последующим траком вдоль оси абсцисс, l – длина трака

Рис. 2. Схема сил, действующих на трак

Уравнения движения трака в декартовой системе координат записываются следующим образом:

$$\begin{cases} m_t \ddot{x} = F_{x.prev} + F_{x.next} - F_{fr} + F_{trac} \\ m_t \ddot{y} = F_{y.prev} + F_{y.next} - m_t g + N_{roller} + N_{soil} \\ I_t \ddot{\alpha} = M_{prev} + M_{next} + M_{roller} \end{cases}, \quad (2)$$

где m_t – масса трака, I_t – его момент инерции, $F_{x,prev}$, $F_{y,prev}$ – силы от предыдущего трака, $F_{x,next}$, $F_{y,next}$ – от последующего, F_{fr} – сила трения о грунт, F_{trac} – касательная сила тяги, N_{roller} и N_{soil} – нормальные реакции со стороны катка и грунта, M – моменты в шарнирах. Силы в шарнирах

определяются через относительные перемещения и скорости с использованием коэффициентов жёсткости C_t и демпфирования r_t. Контакт с грунтом описывается моделью Беккера – Вонга [15] с учётом дискретности гусеницы.

3.3. Имитационная модель бульдозера

На основе представленных математических моделей разработана имитационная модель бульдозера, реализованная в виде специализированного программного обеспечения. Модель включает системы двигателя внутреннего сгорания, трансмиссии, рабочего оборудования, ходовой системы.

Для проведения вычислительных экспериментов приняты параметры грунта второй категории (угол внутреннего трения 28°, сцепление 25 кПа, плотность 1200 кг/м³). Моделируется режим работы: положение рычага акселератора 80 %, включена передача с суммарным передаточным числом 175, время полного включения сцепления 1 с. Бульдозер разгоняется до скорости 1 м/с, затем отвал опускается до образования заданной толщины стружки (100, 150 или 200 мм), призма волочения набирается до полной высоты, и процесс копания длится 10 с.

4. Результаты численного моделирования

4.1. Нагрузки на опорные катки

В ходе экспериментов регистрировались вертикальные силы в подвесках каждого из пяти катков. На рис. 3 приведены временные характеристики для каждого катка при толщине стружки 150 мм.

Анализ результатов имитационных экспериментов показывает, что наибольшие нагрузки испытывают катки, расположенные ближе к отвалу – средние значения превышают 14 кН, а также последний каток, на котором значения сил превышают 13 кН. Катки в средней части нагружены меньше – в среднем 12 кН. Это объясняется перераспределением веса машины при копании грунта: передняя часть машины испытывает большие нагрузки при заглублении отвала, и появлении процесса самозатягивания отвала в грунт.

На основе анализа статистических характеристик сил, действующих на опорные катки установлено, что коэффициенты динамичности для разных катков варьируются от 1,27 до 1,54, причём наибольшие значения соответствуют первому катку (1,40 – 1,54) и пятому (1,39 – 1,40). Это свидетельствует о том, что даже при относительно плавном процессе копания

динамические колебания значительны и должны учитываться при проектировании подвесок.

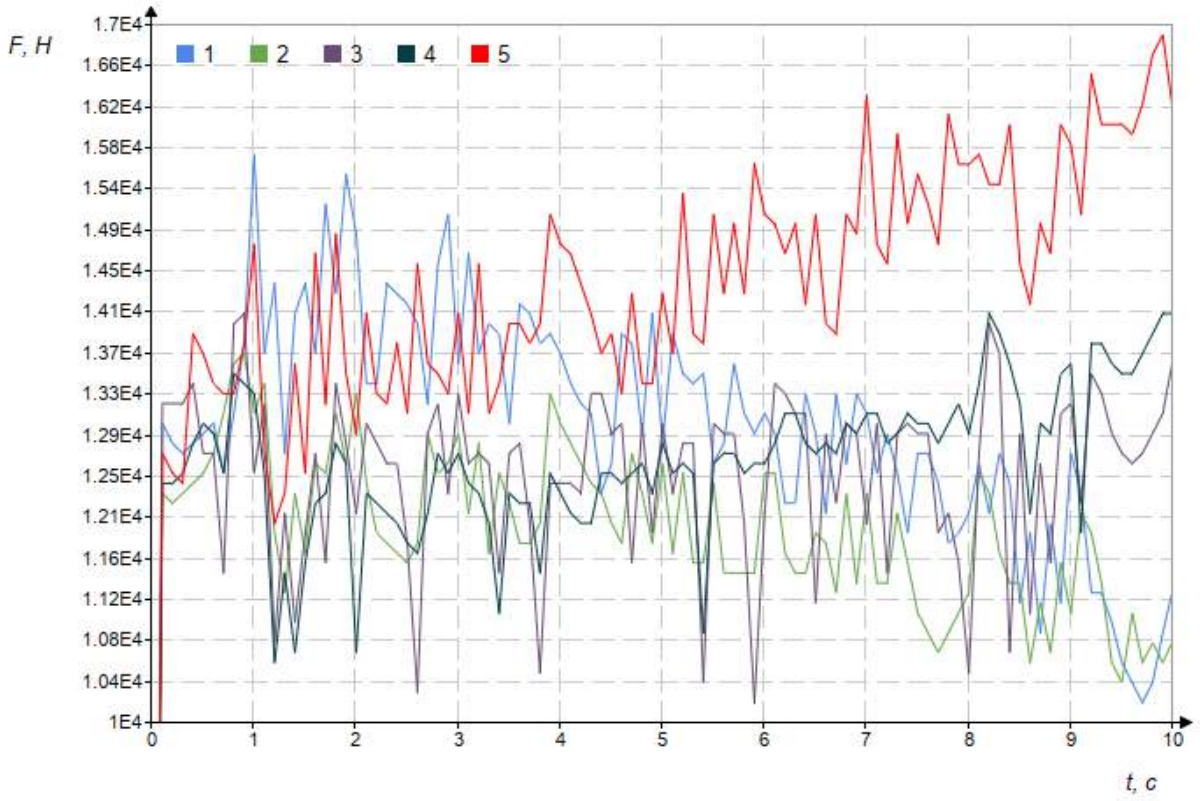


Рис. 3. Характеристики сил, действующих в подвесках опорных катков при толщине стружки 150 мм

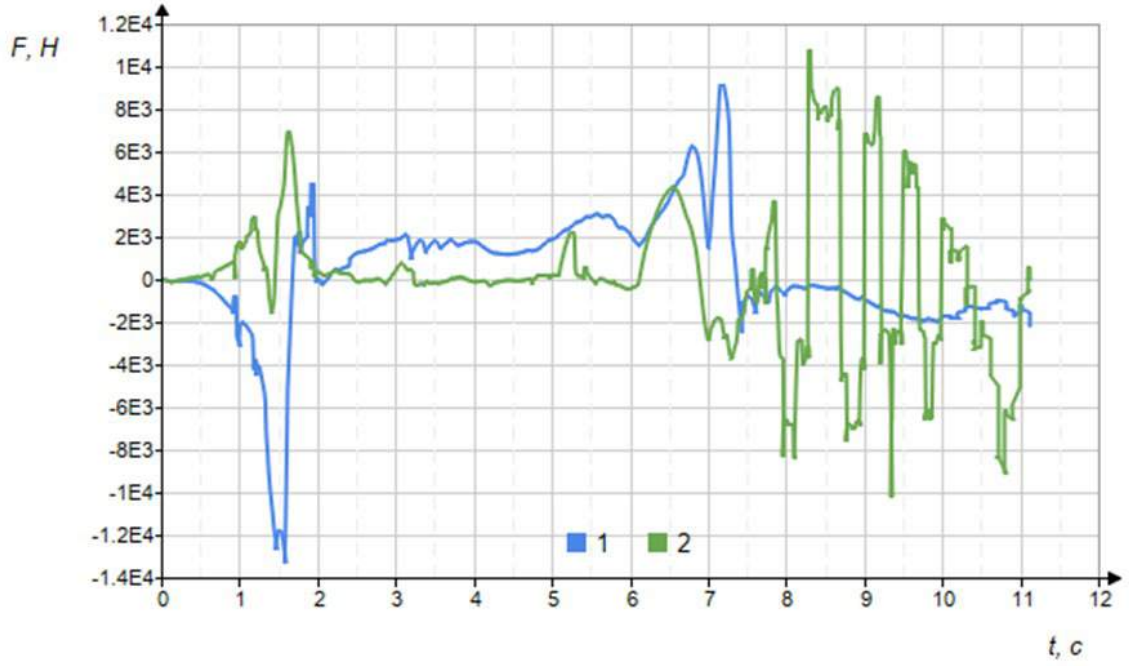
4.2. Нагрузки на траки

Для исследования нагрузок на траки был выбран трак, который в начальный момент находится под первым опорным катком, а затем последовательно проходит через все элементы гусеничного обвода. На рис. 4 представлены графики сил вдоль осей абсцисс и ординат при копании грунта с толщиной стружки 150 мм и транспортировании полной призмы волочения.

Видно, что силы имеют ярко выраженный колебательный характер с частотами 50 – 100 Гц, обусловленными упругими свойствами шарниров и дискретным контактом с опорной поверхностью.

Наибольшие вертикальные нагрузки (ось Y) возникают в моменты наезда опорных катков на трак – пиковые значения достигают 10 – 11 кН, что в десятки раз превышает средние (около 0,2 – 0,3 кН). Горизонтальные нагрузки (ось X) максимальны при прохождении трака через ведущее и направляющее колёса (пики до 13 кН). Средние значения горизонтальных сил составляют 0,2 – 0,3 кН, однако размах колебаний очень велик.

Коэффициенты динамичности для вертикальных сил достигают 60 и более, для горизонтальных – 50 и более, что значительно превышает значения, полученные для катков. Это объясняется ударным характером взаимодействия трака с катком и шарнирными связями.



1 – силы на выбранном траке вдоль оси ординат;
2 – силы на выбранном траке вдоль оси абсцисс

Рис. 4. Силы, действующие на выбранный трак в декартовой системе координат при толщине стружки 150 мм

5. Заключение

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

– разработанные математические модели взаимодействия опорного катка с грунтом и трака с катком и грунтом, учитывающие упруго-диссипативные свойства подвески, шарниров и деформируемость поверхности, адекватно описывают динамику нагружения элементов гусеничного движителя в режиме копания.

– имитационное моделирование подтверждает, что распределение нагрузок по каткам существенно неравномерно: крайние катки (передний и задний) воспринимают на 10 – 15 % большие средние силы, чем средние, а пиковые нагрузки на траки могут в десятки раз превышать средние значения.

– коэффициенты динамичности, полученные для траков (до 68), значительно превышают нормативные значения, что требует пересмотра

подходов к выбору коэффициентов запаса прочности при проектировании гусеничных цепей и шарниров.

– применение имитационных моделей на стадии функционального проектирования позволяет без дорогостоящих натурных экспериментов получить достоверные спектры нагружения, что сокращает сроки и стоимость разработки, а также повышает надёжность машин.

Список использованных источников

1. *Wong J. Y., Huang W.* "Paths to the Future": The Evolution of Track Systems and the Analysis of Roadwheel Loads // Journal of Terramechanics. 2020. № 91. P. 1-15.
2. *Liu C., Zhang J., Wang P.* Dynamic Load Prediction for Track Rollers of Heavy Tracked Vehicles Based on Multi-body Dynamics Simulation // International Journal of Vehicle Design. 2022. Vol. 88, № 1-4. P. 64-83.
3. *Ma Z., Li Y., Liu X.* Experimental and Numerical Study on the Dynamic Load Characteristics of Track Rollers for a Large Crawler Crane // Journal of Mechanical Science and Technology. 2021. Vol. 35, № 8. P. 3465-3475.
4. *Корж А. А., Волков А. В.* Исследование НДС опорного катка методом конечных элементов // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 4. С. 306-315. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-306-315.
5. *Петров К. С., Сидоров А. А.* Моделирование контактного взаимодействия звена гусеничной цепи с опорным катком транспортно-технологической машины // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 103. С. 154-165.
6. *Ding L., Gao H., Deng Z., Li Y.* A Novel Method for Modeling and Simulation of Track-Terrain Interaction Dynamics for Tracked Vehicles // Mechanism and Machine Theory. 2019. Vol. 140. P. 123-145.
7. *Zhang W., Wang C., Sun P.* Numerical and Experimental Study on the Contact Stress Distribution and Wear Behavior of Track Shoe under Different Terrains // Wear. 2022. Vol. 498-499. Art. 204317.
8. *Serban R., Freeman J. S., Taylor R. L.* A High-Fidelity Contact Model for Tracked Vehicle Simulation: Application to Roller Load Analysis // Nonlinear Dynamics. 2023. Vol. 111, № 1. P. 717-738.
9. *Запрягаев В. В., Филь А. А.* Определение нагрузок на подвеску и опорные катки гусеничного трактора при движении по микрорельефу // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 7. С. 41-46.
10. *Федоренко Р. В., Лебедев А. Т.* Оценка долговечности опорных катков с учетом спектра циклических нагрузок, полученного при имитационном моделировании // Тяжелое машиностроение. 2021. № 5-6. С. 35-40.
11. *Симонов В. Г.* Исследование нагрузочных режимов опорных катков гусеничного движителя специальной техники на основе полигонных испытаний // Строительные и дорожные машины. 2019. № 10. С. 18-24.

12. *Павлов В. А., Сергеев Н. И., Тихонов А. А.* Методика экспериментального определения динамических нагрузок на опорные катки горного самосвала // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 5 (156). С. 25-31.
13. *Yang Y., Li L., Liu G.* Dynamic Load Prediction and Stress Analysis of Track Link for a Heavy-Duty Tracked Vehicle Based on Multi-body Dynamics // Journal of Terramechanics. 2023. Vol. 105. P. 1-12.
14. *Park W., Lee J., Choi B.* Design Optimization of Track Roller for Minimizing Dynamic Loads Using Response Surface Method // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2022. Vol. 65, № 3. P. 85.
15. *Wong J. Y.* Theory of Ground Vehicles. 4th ed. – Wiley, 2008. – 592 p.

LOADING OF SUPPORT ROLLERS AND TRACK LINKS OF THE CRAWLER UNDERCARRIAGE OF A BULLDOZER DURING SOIL DIGGING

Igor V. Leskovets, Ph. D.
Belarusian-Russian University
Republic of Belarus, Mogilev, Mira Ave., 43
E-mail: leskovets1966@mail.ru

Alexey A. Grachev, Ph. D.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: springbird@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of a study of loads acting on the elements of a bulldozer tracked undercarriage (support rollers and track links) in the soil digging mode. An analysis of modern domestic and foreign works devoted to modeling the interaction of the tracked undercarriage with the supporting surface, dynamic loads and fatigue life is carried out. Mathematical models of the interaction of a support roller with the ground and a track link with the roller and ground are developed, taking into account the elastic-dissipative properties of the suspension, hinge joints and deformability of the supporting surface. Based on simulation modeling, time characteristics of forces loading the rollers and track links are obtained for various chip thicknesses (100, 150, 200 mm). It is established that maximum vertical loads occur on the rollers located closer to the working equipment, as well as at the moments when the rollers run onto the track links. Dynamic coefficients for track links reach values of 60–70, which significantly exceeds the traditionally accepted static coefficients.

Keywords: crawler bulldozer; tracked undercarriage; support roller; track link; mathematical model; simulation model; dynamic loads; dynamic coefficient.

УДК 629.1.03
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-701

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ПОВОРОТА ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

Алексей Александрович Луковников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: Leksey2006@rambler.ru

Аннотация. Поддержание «идеальной» траектории движения гусеничной машины при повороте путем лишь воздействия водителем на органы управления – задача сложная, требующая высокой квалификации водителя и больших усилий от него, что приводит к усталости, ошибкам, снижает эффективность работы машины и снижает безопасность движения. Для нивелирования указанных недостатков требуется внедрение системы управления, которая будет помогать поддерживать требуемую траекторию движения. В рамках данной статьи проанализированы трудности, сопряженные с разработкой такой системы, рассмотрены некоторые исследования и разработки в указанном направлении. Предложено использование во вспомогательной системе скользящего режима управления, который обеспечит робастность системы и применение которого не потребует существенного изменения конструкции машины.

Ключевые слова: гусеничная машина; гусеничный движитель; поворот; радиус поворота; система управления поворотом; скользящий режим управления.

1. Введение

Поворот гусеничной машины обеспечивается на тракторах – за счет разницы сил тяги (силовое управление) забегающего и отстающего бортов, на машинах с двухпоточной трансмиссией – за счет разницы скоростей вращения гусениц (кинематическое управление) [1], что реализуется путем применения механизмов поворота различных типов и конструкций. Управление поворотом осуществляется воздействием водителем на органы управления – рычаги и педали (наиболее распространены), джойстик (трактор ТС10) или штурвал.

Помимо органов управления, система управления поворотом гусеничной машины включает в себя также и входящие в состав трансмиссии механизмы поворота [2]. В основном применяют несколько разновидностей механизмов поворота [3, 4]:

– бортовые (независимые) (бортовой фрикцион, одноступенчатый планетарный механизм поворота, двухступенчатый планетарный механизм поворота, бортовая коробка передач);

– дифференциальные (простой дифференциал, двойной дифференциал, многопоточные дифференциальные механизмы поворота с механической или гидростатической связью между бортами);

– механизмы передачи и поворота на основе несимметричных дифференциалов.

Использование гусеничных машин происходит, как правило, на сложных грунтах, характеризуемых низкой несущей способностью, существенным разбросом значений коэффициента сцепления, неоднородным рельефом поверхности. Такие условия эксплуатации связаны как со спецификой типа шасси, которое обеспечивает лучшее (в сравнении с колесным движителем) распределение веса по площади контакта и снижение удельного давления на грунт, так и законодательными ограничениями (приказ Министерства транспорта РФ от 31 октября 2023 г. N 361). В силу специфики опорных поверхностей, на которых происходит эксплуатация гусеничных машин, в процессе движения могут происходить изменения сцепных свойств системы с существенной динамикой. Это, а также психофизиологические особенности водителя приводят к отклонению фактической траектории движения гусеничной машины от желаемой при использовании классических подходов к системе управления поворотом. Отсюда возникает интерес в создании системы управления, которая была бы способна корректировать в реальном времени управляющее воздействие, подаваемое на исполнительные механизмы при повороте, с целью достижения гусеничной машиной «идеальной» траектории движения в повороте. Для определения «идеальной» траектории такой системе управления требуются данные о характеристиках гусеничной машины, а также текущие параметры движения, которые представляется возможным получать с датчиков, интегрированных в механизмы и размещенных в корпусе машины.

Целью исследования является повышение управляемости и устойчивости гусеничной машины с минимальными конструктивными изменениями выпускаемых серийно и применяемых в настоящее время механизмов поворота путём построения эффективных алгоритмов управления. Задачами, рассмотренными в рамках данной статьи, являются:

– анализ особенностей бортового поворота, влияния их на качество управления;

– выбор алгоритма управления поворотом, на основе которого могла бы быть создана система управления.

2. Кинематика поворота гусеничной машины

На рис. 1 приведена схема поворота гусеничной машины без учета юза и буксования гусениц [4, 5].

На данной схеме: $V_{пр}$ – скорость прямолинейного движения гусеничной машины; V_1 – линейная скорость отстающего борта; V_c – линейная скорость центра масс гусеничной машины; V_2 – линейная скорость забегающего борта; C – центр масс машины; O – центр поворота; $O_{п1}$ – полюс поворота отстающего борта; $O_{п2}$ – полюс поворота забегающего борта; $y_м$ – плечо выноса точки, сохраняющей скорость прямолинейного движения в повороте; R – радиус поворота машины; B – колея машины; L – база (длина опорной поверхности) машины; ω – угловая скорость поворота машины [4, 5].

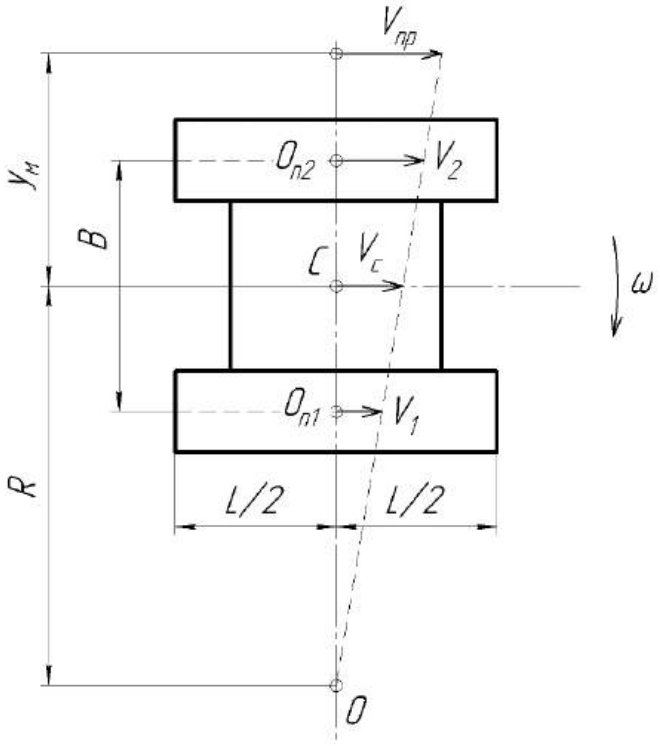


Рис. 1. Кинематическая схема поворота гусеничной машины [4, 5]

При теоретическом рассмотрении задач поворота гусеничной машины используют понятие относительного радиуса поворота [5]:

$$\rho = \frac{R}{B}. \qquad (1)$$

Важной характеристикой движения машины в повороте является отношение скорости забегающего борта к скорости отстающего, которое называют передаточным отношением механизма поворота [5]:

$$u = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\rho + 0{,}5}{\rho - 0{,}5}. \quad (2)$$

Линейная скорость машины в повороте является средним арифметическим скоростей движения ее бортов [5]:

$$V_{пр} = \frac{V_1 + V_2}{2}. \quad (3)$$

Зависимость угловой скорости поворота машины от линейных скоростей имеет вид:

$$\omega = \frac{V_{пр}}{R} = \frac{V_2 - V_1}{B}. \quad (4)$$

Еще одним важным параметром является кинематический параметр механизма поворота $q_м$ – отношение плеча выноса $y_м$ к колее машины B [4, 5]:

$$q_м = \frac{y_м}{B}. \quad (5)$$

С помощью этого параметра можно связать линейную скорость движения машины с линейными скоростями центра масс машины и бортов [4]:

$$\begin{cases} V_c = V_{пр} \dfrac{\rho}{\rho + q_м}; \\ V_1 = V_{пр} \dfrac{\rho - 0{,}5}{\rho + q_м}; \\ V_2 = V_{пр} \dfrac{\rho + 0{,}5}{\rho + q_м}. \end{cases} \quad (6)$$

По значению кинематического параметра производится классификация механизмов поворота [4, 5]:

– $q_м = 0$: скорость прямолинейного движения сохраняется в центре масс машины ($V_c = V_{пр}$) (характерно для дифференциальных механизмов);

– $q_м = 0{,}5$: скорость прямолинейного движения сохраняется в полюсе поворота $O_{п2}$ ($V_2 = V_{пр}$) (характерно для бортовых механизмов);

– $q_м > 0{,}5$: гусеничная машина снижает скорость при совершении поворота, позволяя преодолевать дополнительное сопротивление повороту ($V_2 < V_{пр}$); (характерно для механизмов на основе несимметричных дифференциалов, которые на практике в настоящее время не используются).

Как отмечалось ранее, приведенная выше схема не учитывает юз и пробуксовку гусениц. При юзе и буксовании полюса поворота $O_{п1}$ и $O_{п2}$ смещаются, фактический радиус поворота машины $R_д$ увеличивается по сравнению с расчетным, а фактическая угловая скорость поворота машины $\omega_д$ уменьшается [4, 5]. Для определения $R_д$ и $\omega_д$ используют формулы [5, 6]:

$$R_д \approx R\frac{L}{B}, \tag{7}$$

$$\omega_д = \frac{V_{1(2)д}}{R_д \mp 0{,}5B}. \tag{8}$$

Формулы (7), (8) получены эмпирически. В знаменателе (8) знак «–» используется при вычислении угловой скорости машины по скорости движения отстающего борта V_1, знак «+» – по скорости забегающего борта V_2. Это объясняется тем, что радиус поворота отстающего борта определяется как $R_1 = R - B/2$, а забегающего – $R_2 = R + B/2$ (см. рис. 1).

Таким образом, система управления при наличии информации о колее и базе машины и о положении органов управления может вычислять требуемую траекторию движения гусеничной машины. По данным же о текущей скорости каждого из бортов возможно определение текущей линейной и угловой скоростей машины. Поскольку при определенных условиях и параметрах движения (например, низкий коэффициент сцепления с опорной поверхностью, малый радиус поворота) существует вероятность срыва гусениц в пробуксовку или, наоборот, их юза, рационально установить датчики линейной и угловой скоростей в корпусе гусеничной машины для более точного определения текущих параметров движения.

3. Сопротивление движению гусеничной машины при повороте

В процессе движения гусеничной машины присутствует сопротивление грунта, которое можно описать выражением (для каждой из гусениц) $f\frac{G}{2}$, где G – вес машины, f – коэффициент сопротивления продольному движению [5].

При повороте же дополнительно возникает сопротивление повороту, характеризуемое коэффициентом сопротивления повороту μ, который определяют эмпирическим путем. С 40-х годов прошлого столетия формулы для определения коэффициента сопротивления повороту были выведены несколькими исследователями: Е. Г. Исаевым, Л. К. Крыловым,

А. К. Заверняевым и др [6]. Однако наиболее широкое распространение получила формула, выведенная эмпирическим путем А. О. Никитиным [4 – 7]:

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{a + b\dfrac{R}{B}}, \qquad (9)$$

где *a, b* – эмпирические коэффициенты ($R = R_2$, то $a = 0{,}85$; если R выбран по центру машины и $R_{min} = B/2$, то $a = 0{,}925$); $b = 0{,}15$ в обоих случаях. μ_{max} определялся при $R = 0{,}5$.

Из (9) следует, что при уменьшении радиуса поворота коэффициент сопротивления повороту увеличивается (рис. 2).

Как для коэффициента сопротивления продольному движению, так и для коэффициента сопротивления повороту исследователями выведены экспериментальные значения для разных видов опорной поверхности. Однако стоит отметить, что, например, для формулы Никитина эти коэффициенты не имеют физического смысла, а также заданы в виде некоторых весьма существенных интервалов. То есть при расчете системой управления текущих параметров системы с использованием этих данных будет присутствовать неопределенность, которая может приводить к существенным погрешностям и, следовательно, снижению эффективности ее функционирования.

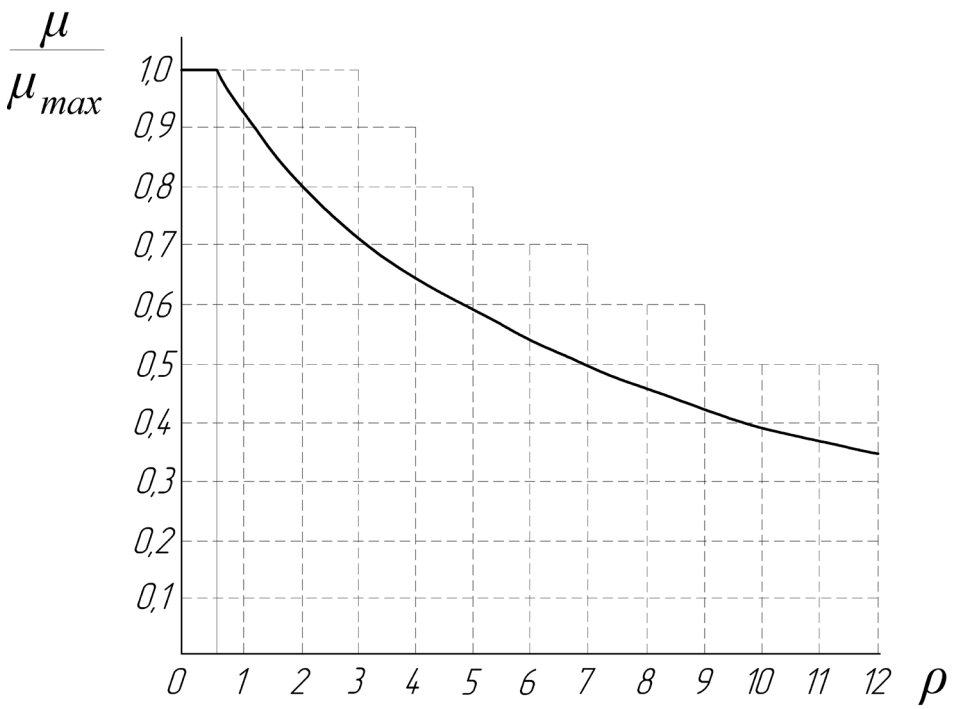


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления повороту и относительного радиуса поворота [5]

Помимо указанных параметров, неопределенность также вносит и коэффициент сцепления гусениц с опорной поверхностью φ. Отсюда следует, что система управления должна обладать робастностью к таким неопределенностям.

4. Предложенные методы улучшения параметров поворота гусеничной машины

Существует ряд исследований, посвященных проблеме поворота гусеничной машины. В этих исследованиях рассмотрены различные механизмы поворота, способы управления и методы определения параметров процесса движения:

– применение гидрообъемного привода со штурвальным органом управления и автоматизацией управления с использованием микропроцессорной техники для уменьшения запаздывания реакции системы на управляющее воздействие и нивелирования человеческого фактора (ограниченное быстродействие водителя, его усталость и т. д.) [8];

– предложение использования системы телеметрического измерения коэффициента сопротивления уводу (установка датчика боковой силы на балансире), блока коррекции траектории движения для обеспечения устойчивого движения по заданной траектории и повышения скорости движения машины [9];

– использование замкнутой системы управления поворотом с плавной регулировкой буксования пакета дисков во фрикционном управляющем элементе за счет использования широтно-импульсной модуляции в гидрораспределителе [10];

– предложена структурная схема системы управления поворотом с широтно-импульсной модуляцией давления и штурвальным управлением, использующая блок управления от двигателей внутреннего сгорания и способная работать с высокой частотой (порядка 10 Гц); реализация данной схемы требует минимальных доработок традиционной системы управления поворотом и обеспечивает свободную компоновку органов управления за счет связи штурвала с блоком управления посредством кабелей [2];

– выведена уточненная математическая модель поворота гусеничной машины с учетом бокового скольжения, позволяющая охватить явление частичного и полного заноса [11];

– разработаны новые схемы механизма поворота на основе существующих узлов и агрегатов автомобилей и математические модели поворота

гусеничной машины на основе предложенных схем, учитывающие потери мощности в трансмиссии и ходовой части и достоверность которых подтверждена результатами испытаний [12].

5. Применение скользящего режима управления

В процессе поворота гусеничной машины ряд параметров не может быть измерен точно, в системе присутствуют динамически меняющиеся факторы, вмешательство водителя с целью удержания машины на заданной траектории сопровождается временными задержками и вероятностью перерегулирования. Для минимизации воздействия указанных проблем на качество поворота машины предлагается рассмотреть один из алгоритмов управления, известный своей робастностью к динамически изменяющимся параметрам системы и неучтённым возмущениям системы – скользящий режим управления.

Данный алгоритм управления формирует управляющий сигнал, состоящий из двух компонент – эквивалентного U_e, ответственное за нахождение системы на так называемой поверхности скольжения при отсутствии неучтённых возмущений, и разрывное U_h, за счёт которого осуществляются достижение системой поверхности скольжения и компенсация неучтённых возмущений:

$$U = U_e + U_h. \tag{10}$$

Эквивалентная составляющая управляющего сигнала U_e образуется из функции динамики системы, описывающей взаимосвязь между измеряемыми и контролируемыми параметрами; её можем получить из кинематического и силового анализа процесса поворота машины.

Разрывную составляющую U_h можно задать в виде экспоненциального закона, имеющего вид:

$$U_h = -\eta\theta(s) - Ks, \tag{11}$$

где $\eta > 0$ – коэффициент скорости достижения системой поверхности скольжения; $\theta(s)$ – функция насыщения, минимизирующая колебания системы при нахождении её вблизи поверхности скольжения; $K > 0$ – коэффициент усиления управления.

Поверхность скольжения s в самом простом случае представляет собой разницу между текущим и эталонным состоянием системы. При повороте гусеничной машины за ключевой параметр системы разумно принять

относительный радиус поворота ρ. Тогда поверхность скольжения будет иметь вид:

$$s = \rho_{факт} - \rho_{расч}, \tag{12}$$

где $\rho_{факт}$ и $\rho_{расч}$ – фактический и эталонный относительные радиусы поворота машины соответственно. Обе эти величины представляется возможным определить через передаточное отношение механизма поворота u [5]:

$$\rho = \frac{1}{2} \cdot \frac{u+1}{u-1}. \tag{13}$$

Расчёт по формуле (13) фактического радиуса поворота $\rho_{факт}$ предлагается проводить путём вычисления фактического передаточного отношения механизма поворота $u_{факт}$ с использованием данных об угловой скорости ведущих колёс забегающего ω_2 и отстающего ω_1 бортов, получаемых с датчиков (например, тахогенераторов) [5]:

$$u_{факт} = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \tag{14}$$

Другим способом определения фактического относительного радиуса поворота представляется использование информации с датчиков скорости и угла поворота, установленных в корпусе машины.

Эталонный относительный радиус поворота $\rho_{расч}$ рассчитывается по формуле (13) через расчётное (желаемое) передаточное отношение механизма поворота $u_{расч}$, определяемое по положению органов управления (рычагов, штурвала и т.д.).

Преимуществом использования скользящего режима управления является тот факт, что разрывной составляющей сигнала управления U_h компенсируются присутствующие в эквивалентной составляющей U_e неопределённости, связанные с отсутствием в текущий момент времени точной информации о сцепных свойствах системы и их нелинейностью, погрешностью датчиков, высокой динамикой изменения параметров системы. Обратная связь в предлагаемой системе управления реализована по скоростям ведущих колёс бортов или по скорости поворота машины. Управление поворотом осуществляется за счёт изменения давления в гидравлической магистрали фрикционного элемента управления, отвечающего за поворот гусеничной машины.

6. Заключение

В представленной статье описаны основы кинематики поворота гусеничной машины, перечислены существующие разновидности механизмов поворота, отмечены недостатки традиционной системы управления процессом поворота. Также указан ряд трудностей, связанных с неопределенностями при определении параметров процесса поворота. Помимо этих параметров неопределенности также связаны с отсутствием точной информации о текущей способности передачи момента фрикционным элементом управления, вызванной, в том числе, изменением коэффициента трения при изменении температуры пар трения. Система управления, нацеленная на помощь водителю в поддержании желаемой траектории движения машины в повороте и снижению нагрузки на него, должна обеспечивать, в идеальном случае, робастность ко всем отмеченным неопределенностям в параметрах системы.

В качестве алгоритма управления такой системой предложено использовать скользящий режим управления, обеспечивающий робастность к высокой динамике параметров системы и неучтённым возмущениям. Этот подход требует минимальных конструктивных изменений, что является ещё одной положительной стороной разработки вспомогательной системы.

Список использованных источников

1. *Забавников Н. А.* Основы теории транспортных гусеничных машин. – М.: «Машиностроение», 1975, 448 с.
2. *Артемьев А. В., Лозин А. В., Добрецов Р. Ю.* Концепция замкнутой системы управления поворотом гусеничной машины с использованием широтно-импульсной модуляции давления // Транспортные системы : Сборник трудов V Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–17 октября 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. – С. 232-237. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id25-586. – EDN TWIHCK.
3. *Носов Н. А., Галышев В. Д., Волков Ю. П., Харченко А. П.* Расчет и конструирование гусеничных машин. – Л.: «Машиностроение», 1972, 560 с.
4. *Добрецов Р. Ю.* Теория движения наземных транспортных систем. Поворот гусеничного трактора : конспект лекций / Р. Ю. Добрецов, Г. П. Поршнев. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011, 31 с.
5. *Шеломов В. Б.* Теория движения многоцелевых гусеничных и колесных машин. Тяговый расчет криволинейного движения : учеб. пособие / В. Б. Шеломов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 92 с.
6. *Никитин А. О., Сергеев Л. С.* Теория танка. – М.: Издание военной академии бронетанковых войск, 1962, 584 с.

7. *Павлов В. В.* Формула А. О. Никитина – революционный прорыв в теории поворота гусеничных машин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. : МАДИ. – 2016. – №4(10). – EDN XILWAF.
8. *Держанский В. Б., Волков А. А., Тараторкин И. А.* Система управления движением быстроходной гусеничной машины // Вестник КГУ, серия «Технические науки», выпуск 10. – 2015. – №3.
9. *Волков А. А.* Повышение скорости движения в повороте быстроходной гусеничной машины на основе совершенствования алгоритмов управления движением : автореф. дис. … к-та техн. наук / А. А. Волков. – Курган: Курганский государственный университет, 2018.
10. *Галышев Ю. В., Григорьев А. П., Добрецов Р. Ю., Лозин А. В.* Замкнутые системы управления поворотом гусеничных машин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – №3(202). – С. 201-208.
11. *Шеломов В. Б., Добрецов Р. Ю.* Уточнение модели поворота гусеничной машины // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2012. – №1. – С. 123-127.
12. *Гмыря Н. Г., Шарипов В. М., Щетинин Ю. С., Денисов А. В., Маринкин А. П., Баулина Е. Е.* Создание гусеничных транспортеров особо легкой категории по массе на базе узлов и агрегатов автомобилей // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – №2(16), т. 1. – С.23-33.

ANALYSIS OF THE TRACKED VEHICLE TURNING PROCESS FEATURES

Aleksey A. Lukovnikov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: Leksey2006@rambler.ru

Abstract. Maintaining the “ideal” trajectory of the tracked vehicle motion during the turning by only influencing the controls by the driver is a difficult task that requires highly qualified drivers and great efforts from them which leads to fatigue, errors, reduces the efficiency of the vehicle and reduces traffic safety. To offset these shortcomings, it is necessary to implement a control system that will help maintain the required trajectory. Within the framework of this article the difficulties associated with the development of such a system have been analyzed and some research and development in this direction has been considered. Using of a sliding mode control in the ancillary system has been proposed which will provide a system robustness and the implement of which won’t require serious changes in the construction of the vehicle.

Keywords: tracked vehicle; tracked propulsion; turn; turning radius; turning control system; sliding mode control.

УДК 631.372:681.5+629.3:004.896
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-702

АДАПТИВНОЕ ГИБРИДНОЕ ТРАЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАКТОРОМ НА ОСНОВЕ LQR–PURE PURSUIT С НЕЙРОСЕТЕВОЙ НАСТРОЙКОЙ ВЕСОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Бо Ню
Роман Юрьевич Добрецов, д-р техн. наук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
E-mail: niubo74@gmail.com, dr-idpo@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача траекторного слежения беспилотного трактора при чередовании длинных прямолинейных рабочих проходов и разворотов на краю поля. Для согласования точности, быстроты сходимости и плавности рулевого управления предложен адаптивный гибридный контроллер, в котором LQR-регулятор и алгоритм Pure Pursuit параллельно формируют кандидаты угла поворота передних колёс, а многослойная нейронная сеть определяет вес их объединения по кривизне траектории, ошибкам слежения, скорости движения и запасу рулевого управления. Весовой коэффициент ограничивается по скорости изменения и сглаживается, а итоговая команда ограничивается по углу и скорости поворота. Метод исследован численным моделированием и сопоставлен с вариантами «Только PP», «Только LQR», «Жёсткое переключение» и «Фиксированное смешивание». Для варианта «Гибридная НС» среднеквадратическая поперечная ошибка на установившемся участке составила 0,0098 м, время сходимости к $|e_y| < 0,05$ м – 2,25 с, а доля высокочастотной энергии поперечной ошибки – 0,0015 %. Результаты показывают, что предложенная схема обеспечивает устойчивый многокритериальный компромисс между точностью, ошибкой курса, плавностью управления и соблюдением ограничений исполнительного механизма.

Ключевые слова: беспилотный трактор; траекторное слежение; LQR; Pure Pursuit; нейронная сеть; гибридное управление; адаптивное управление.

1. Введение

Развитие беспилотных мобильных энергетических средств требует высокой точности движения, снижения перекрытий и пропусков, а также согласованной работы навигации, регулятора и рулевого привода [1 – 4]. Сельскохозяйственные маршруты чередуют длинные прямолинейные проходы и развороты: на прямой важны малая поперечная ошибка и плавность, на развороте – быстрое согласование курса и кривизны.

LQR системно учитывает ошибки слежения и управляющее воздействие, но зависит от линеаризации модели и весовых матриц; при переменной кривизне фиксированная настройка остаётся компромиссной [5]. Pure Pursuit проще и непосредственно использует геометрию маршрута, а адаптация расстояния упреждения повышает качество слежения [6 – 8]. Современные работы развивают адаптивную настройку параметров: оптимизация расстояния упреждения и нейросетевая настройка весов обеспечивают адаптацию к текущему состоянию движения [9, 10]. Для сельскохозяйственных машин также важны геометрические и кинематические ограничения разворота [11, 12].

Цель представленной статьи – разработать адаптивный гибридный метод, непрерывно изменяющий вклад LQR и Pure Pursuit с помощью нейронной сети и сохраняющий качество управления на прямолинейных и криволинейных участках с учётом ограничений рулевого привода.

2. Методика исследования

2.1. Модель траекторной ошибки и базовые регуляторы

В качестве объекта управления рассматривается беспилотный трактор с передними управляемыми колёсами и кинематической схемой Аккермана. Положение машины задаётся координатами центра масс, углом курса φ и продольной скоростью v. Относительно ближайшей точки опорной траектории определяются поперечная ошибка e_y и ошибка курса e_φ. Для низкоскоростного движения принято допущение об отсутствии бокового скольжения; скорость на одном шаге дискретизации считается постоянной. Такой уровень модели позволяет анализировать собственно механизм согласования контроллеров, не смешивая его эффект с параметрической неопределённостью шин и грунта.

Для LQR используется дискретная линейная модель ошибок $x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$ и квадратичный функционал качества

$$J = \sum \left(x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k \right), \quad u_k = -Kx_k. \tag{1}$$

Управляющее воздействие LQR преобразуется в кандидат угла поворота передних колёс δ_{LQR} с учётом упреждающей составляющей, связанной с кривизной заданной траектории. Такой подход обеспечивает корректирующее воздействие одновременно по поперечной ошибке и ошибке ориентации. Аналогичные LQR-схемы применяются в задачах траекторного слежения беспилотных колёсных тракторов [5].

Второй базовый контроллер – Pure Pursuit. Расстояние упреждения задаётся как $L_d = L_{d0} + k_v v$, а кандидат угла поворота вычисляется по геометрическому соотношению

$$\delta_{PP} = \operatorname{arctg}\left(\frac{2L\sin\alpha}{L_d}\right), \tag{2}$$

где L – колёсная база, α – угол на точку упреждения. В отличие от LQR, этот регулятор непосредственно опирается на геометрию маршрута. В работе его параметры фиксированы для всех сравниваемых вариантов, чтобы различия результатов отражали именно способ объединения контроллеров, а не индивидуальную перенастройку каждого метода.

2.2. Адаптивное объединение LQR и Pure Pursuit

На каждом шаге моделирования оба базовых регулятора рассчитывают свои управляющие команды. Итоговый угол формируется непрерывной взвешенной комбинацией

$$\delta_{hyb,k} = \alpha_k \delta_{LQR,k} + (1-\alpha_k)\delta_{PP,k}, \quad 0 \le \alpha_k \le 1. \tag{3}$$

В отличие от схемы «Жёсткое переключение», где выбор регулятора происходит дискретно, коэффициент α_k является непрерывным и формируется многослойной нейронной сетью. Входной вектор содержит кривизну опорной траектории и скорость её изменения, поперечную ошибку и её производную, ошибку курса и её производную, скорость движения и запас до ограничения рулевого угла. Таким образом, сеть получает признаки, характеризующие как геометрию маршрута, так и текущее состояние траекторного слежения. Использование нейросетевого механизма для адаптации весов согласуется с современными подходами к весовой настройке траекторных контроллеров [10].

$$\alpha_k^* = \sigma\left(f_\theta(z_k)\right), \tag{4}$$

где $f_\theta(\cdot)$ – нейронная сеть, $\sigma(\cdot)$ – сигмоидальная функция. Для исключения скачкообразной перестройки коэффициента применяется ограничение скорости его изменения, после чего выполняется экспоненциальное сглаживание. Команда рулевого управления дополнительно насыщается по максимальному углу $\delta_{\max}$ и ограничивается по скорости изменения. Благодаря этому нейронная сеть определяет требуемое соотношение LQR и Pure Pursuit, но не может сформировать физически нереализуемую команду.

Обучение рассматривается как многокритериальная задача. Функция потерь включает ошибку траекторного слежения, штраф за резкие изменения угла и веса, штраф за нарушение ограничений и регуляризационный член:

$$L = w_e L_e + w_s L_s + w_c L_c + w_r L_r. \quad (5)$$

В компоненте L_e совместно учитываются e_y и e_φ; в L_s – приращения δ и α. Такая постановка позволяет избежать ситуации, когда минимизация только поперечной ошибки достигается ценой чрезмерно частого или интенсивного руления. Для беспилотного трактора этот аспект особенно важен из-за ограниченной скорости рулевого привода и влияния резких управляющих действий на устойчивость технологического процесса.

2.3. Вычислительный эксперимент

Исследование выполнено численным моделированием движения по сельскохозяйственной траектории, состоящей из повторяющихся прямолинейных проходов и разворотов на краю поля. Использованы: шаг дискретизации $T = 0,05$ с, скорость $v = 2$ м/с, колёсная база $L = 2,5$ м, максимальный угол поворота передних колёс 30° и максимальная скорость его изменения 60°/с. Начальное поперечное отклонение составляло 1 м. Для всех методов применялись одинаковые исходные условия и ограничения.

Сравнивались пять вариантов: «Только PP»; «Только LQR»; «Жёсткое переключение» (LQR–PP) по кривизне; «Фиксированное смешивание» с постоянным весом $\alpha = 0,5$; «Гибридная НС» – предложенный вариант. Критериями служили RMSE и MAE поперечной ошибки, RMSE ошибки курса, время сходимости к $|e_y| < 0,05$ м, стандартное отклонение угла поворота, максимальный угол, максимальная скорость руления, доля активации ограничения по скорости и доля высокочастотной энергии поперечной ошибки. Подобный набор позволяет оценивать не только геометрическую точность, но и динамическую реализуемость управления. Для сельскохозяйственных транспортно-технологических систем оценка криволинейного движения и ограничений исполнительных механизмов является принципиальной [12].

3. Результаты

На рис. 1 показана полная опорная траектория, а на рис. 2, а и б – увеличенные фрагменты прямолинейного и криволинейного участков соответственно.

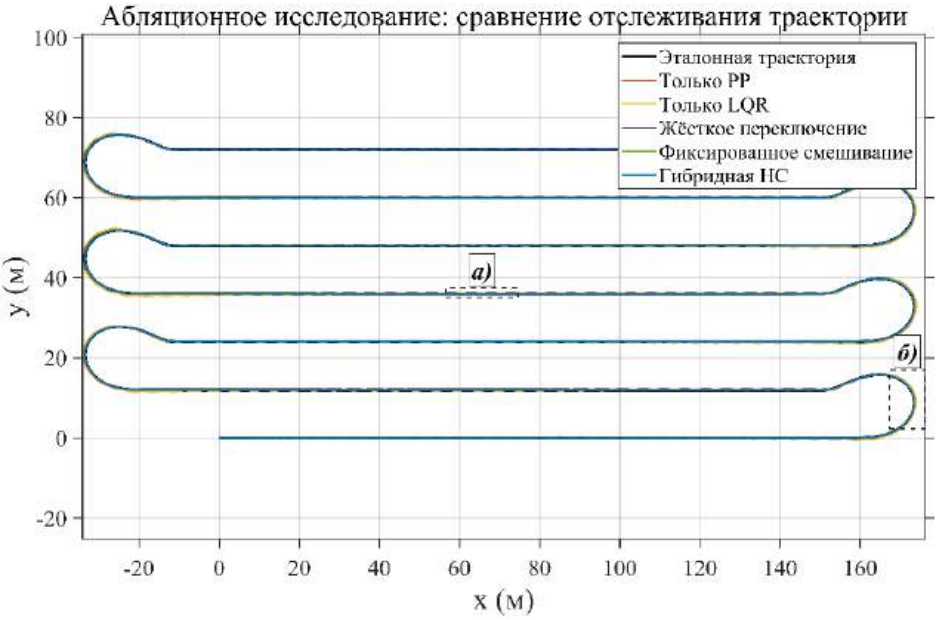


Рис. 1. Сравнение траекторного слежения пяти методов на полной траектории; метками *а)* и *б)* обозначены области локального увеличения

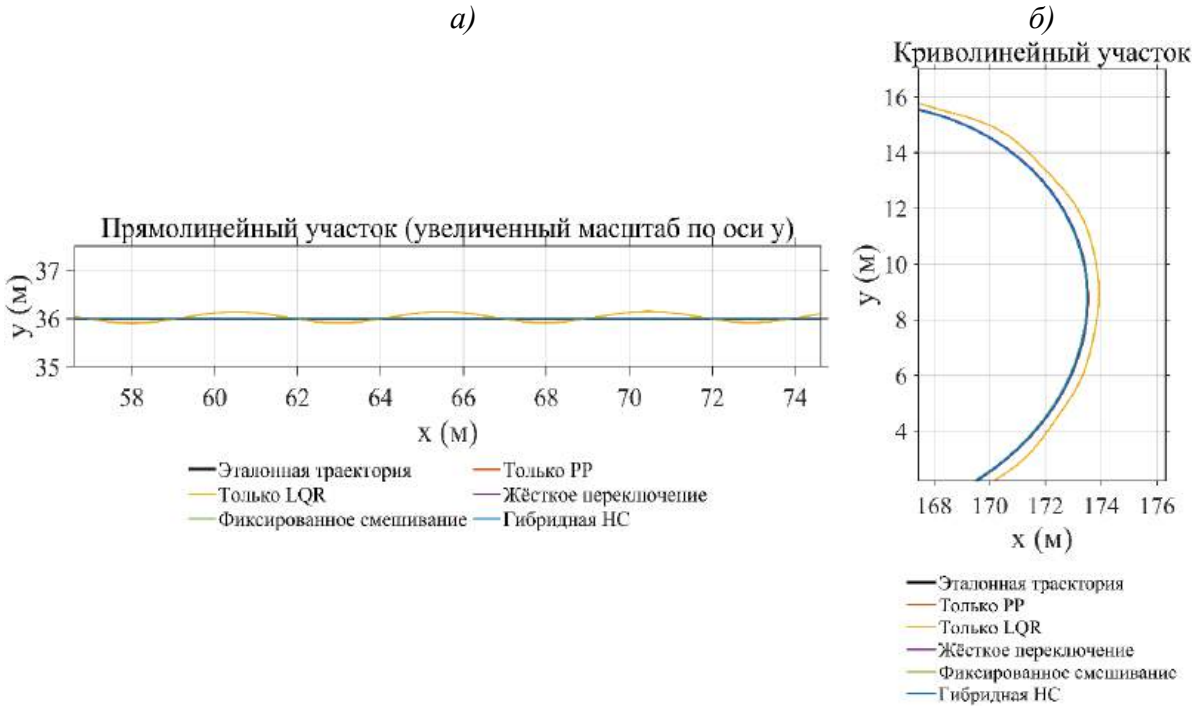


Рис. 2. Увеличенные фрагменты траектории:
а) – прямолинейный участок; *б)* – криволинейный участок

Основные результаты приведены в таблице. На установившемся участке RMSE поперечной ошибки для варианта «Гибридная НС» составила 0,0098 м; меньшее значение показал только вариант «Только PP» (0,0074 м), уступивший по времени сходимости и ошибке курса. На участке повышенной кривизны ошибка «Гибридной НС» составила 0,0204 м, что близко к

варианту «Жёсткое переключение» (0,0210 м) и ниже значений «Фиксированного смешивания» и «Только LQR».

Показатели точности траекторного слежения и сходимости

Метод	**RMSE e_y, уст., м**	**RMSE e_y, крив., м**	**RMSE e_φ, уст., °**	**RMSE e_φ, крив., °**	**Сходимость, с**
Только PP	0,0074	0,0149	0,259	0,547	3,40
Только LQR	0,2224	0,3523	6,175	5,261	409,55
Жёсткое переключение	0,0881	0,0210	1,963	0,548	77,40
Фиксированное смешивание	0,0419	0,0336	0,237	0,411	19,90
Гибридная НС	0,0098	0,0204	0,184	0,378	2,25

Время первоначального захвата траектории для «Гибридной НС» составило 2,25 с против 3,40 с у «Только PP», 19,90 с у «Фиксированного смешивания», 77,40 с у «Жёсткого переключения» и 409,55 с у «Только LQR». RMSE ошибки курса равнялась 0,184° на установившемся и 0,378° на криволинейном участке. Рис. 2 подтверждает малое отклонение от опорной траектории на обоих типах участков.

Ограничения рулевого управления выполнялись: для «Гибридной НС» максимальный угол составил 24,36° при допустимых 30°, а максимальная скорость его изменения – 51,95°/с при ограничении 60°/с. Ограничение по скорости активировалось в 0,43 % случаев против 8,69 % у «Жёсткого переключения» и 72,91 % у «Только LQR».

Доля высокочастотной энергии поперечной ошибки для «Гибридной НС» составила 0,0015 %, как и у «Только PP», и была ниже, чем у «Жёсткого переключения» (0,0206 %) и «Фиксированного смешивания» (0,0247 %). Вес «Гибридной НС» изменяется непрерывно вблизи участков повышенной кривизны, тогда как «Фиксированное смешивание» использует постоянный вес, а «Жёсткое переключение» – дискретный выбор.

4. Обсуждение результатов

Вариант «Гибридная НС» не является лучшим по каждому отдельному показателю: в рассматриваемом низкоскоростном режиме «Только PP» обеспечивает минимальную установившуюся поперечную ошибку, что соответствует известным преимуществам геометрического слежения [6 – 9].

Однако качество управления определяется также ошибкой курса, временем сходимости, плавностью руления и соблюдением ограничений исполнительного механизма.

Слабый результат «Только LQR» объясняется фиксированными параметрами линейного регулятора на траектории переменной кривизны и влиянием насыщения рулевого привода, что обосновывает адаптацию параметров или весов [5, 10]. «Жёсткое переключение» вызывает скачки управления, а «Фиксированное смешивание» не учитывает текущий режим. «Гибридная НС» адаптивно изменяет вес при сохранении непрерывности команды.

На разворотах необходимо учитывать геометрические и кинематические ограничения [11, 12], поэтому в признаки сети включён запас по углу поворота. Ограничения исследования – кинематическая модель без бокового скольжения и одна скорость 2 м/с; не учитывались неоднородность контакта «колесо–почва», задержки привода и навигационные ошибки. Дальнейшая работа должна охватить разные скорости и сцепление, возмущения, аппаратные и натурные испытания.

5. Заключение

Предложен адаптивный гибридный метод траекторного слежения беспилотного трактора, объединяющий LQR и Pure Pursuit с нейросетевой настройкой веса. Метод непрерывно перераспределяет вклад регуляторов по геометрии траектории, ошибкам слежения, скорости и запасу рулевого управления.

Имитационное сравнение пяти вариантов показало, что вариант «Гибридная НС» обеспечивает устойчивый многокритериальный компромисс. На установившемся участке RMSE поперечной ошибки составила 0,0098 м, RMSE ошибки курса – 0,184°, время сходимости к $|e_y| < 0{,}05$ м – 2,25 с. Максимальный угол 24,36° и максимальная скорость его изменения 51,95°/с не превышили заданные ограничения 30° и 60°/с. Доля высокочастотной энергии поперечной ошибки составила 0,0015 %.

Предложенная схема может использоваться как модуль согласования контроллеров беспилотных тракторов и других низкоскоростных транспортно-технологических машин. Для практического применения требуется экспериментальная проверка при изменении скорости, боковом скольжении, возмущениях и навигационных ошибках.

Список использованных источников

1. *Старостин И. А., Ещин А. В., Годжаев Т. З., Давыдова С. А.* Концептуальные направления развития беспилотных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. – 2024. – Т. 91. – №1. – С. 23–38. – DOI: 10.17816/0321-4443-567812.
2. *Wang Q., He J., Lu C., Wang C., Lin H., Yang H., Li H., Wu Z.* Modelling and Control Methods in Path Tracking Control for Autonomous Agricultural Vehicles: A Review of State of the Art and Challenges // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – Issue 12. – Art. 7155. DOI: 10.3390/app13127155.
3. *Bai Y., Zhang B., Xu N., Zhou J., Shi J., Diao Z.* Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: A review // Computers and Electronics in Agriculture. – 2023. – Vol. 205. – Art. 107584. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107584.
4. *Галиуллин Р. Р.* Аппаратно-программный комплекс для системы параллельного вождения машинно-тракторного агрегата // Тракторы и сельхозмашины. – 2025. – Т. 92. – №1. – С. 49–56. – DOI: 10.17816/0321-4443-633037.
5. *Fan X., Wang J., Wang H., Yang L., Xia C.* LQR Trajectory Tracking Control of Unmanned Wheeled Tractor Based on Improved Quantum Genetic Algorithm // Machines. – 2023. – Vol. 11. – Issue 1. – Art. 62. DOI: 10.3390/machines11010062.
6. *Hu C., Ru Y., Li X., Fang S., Zhou H., Yan X., Liu M., Xie R.* Path tracking control for brake-steering tracked vehicles based on an improved pure pursuit algorithm // Biosystems Engineering. – 2024. – Vol. 242. – Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.04.006.
7. *Macenski S., Singh S., Martín F., Ginés J.* Regulated pure pursuit for robot path tracking // Autonomous Robots. – 2023. – Vol. 47. – Issue 6. – Pp. 685–694. DOI: 10.1007/s10514-023-10097-6.
8. *Kim S., Lee J., Han K., Choi S. B.* Vehicle Path Tracking Control Using Pure Pursuit With MPC-Based Look-Ahead Distance Optimization // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2024. – Vol. 73. – Issue 1. – Pp. 53–66. DOI: 10.1109/TVT.2023.3304427.
9. *Tang X., Shi L., Wang B., Cheng A.* Weight Adaptive Path Tracking Control for Autonomous Vehicles Based on PSO-BP Neural Network // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – Issue 1. – Art. 412. DOI: 10.3390/s23010412.
10. *Peng C., Wei P., Fei Z., Zhu Y., Vougioukas S. G.* Optimization-based motion planning for autonomous agricultural vehicles turning in constrained headlands // Journal of Field Robotics. – 2024. – Vol. 41. – Pp. 1984–2008. DOI: 10.1002/rob.22374.
11. *Gao G., Guo H., Zhang J., Zhang Z.* An efficient headland-turning navigation system for a safflower picking robot // Journal of Agricultural Engineering. – 2023. – Vol. 54. – Issue 3. – Art. 1539. DOI: 10.4081/jae.2023.1539.
12. *Евсеев К. Б.* Законы управления криволинейным движением полуприцепного гусеничного поезда для внедорожных перевозок грузов // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. – Т. 89. – №4. – С. 263–276. – DOI: 10.17816/0321-4443-111978.

ADAPTIVE HYBRID TRAJECTORY TRACKING CONTROL OF AN UNMANNED TRACTOR BASED ON LQR–PURE PURSUIT WITH NEURAL-NETWORK WEIGHT TUNING

Bo Nyu,
Roman Yu. Dobretsov, D. Sc.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, 29 Polytechnicheskaya St.
E-mail: niubo74@gmail.com, dr-idpo@yandex.ru

Abstract. The paper addresses trajectory tracking of an unmanned tractor operating on agricultural routes that alternate between long straight passes and headland turns. An adaptive hybrid controller is proposed in which LQR and Pure Pursuit independently generate steering-angle candidates, while a multilayer neural network determines their blending weight using trajectory curvature, tracking errors, vehicle speed, and steering reserve. The weight rate is limited and exponentially smoothed, and the final command is constrained by steering-angle and steering-rate limits. The method was evaluated by numerical simulation against PP-only, LQR-only, HardSwitch LQR–PP, and FixedBlend. For Hybrid-NN, the steady-state lateral-error RMSE was 0.0098 m, convergence to $|e_y| < 0.05$ m took 2.25 s, and the high-frequency share of lateral-error energy was 0.0015%. The results indicate that the proposed method provides a stable multi-criteria compromise between tracking accuracy, heading stability, steering smoothness, and actuator constraints.

Keywords: unmanned tractor; trajectory tracking; LQR; Pure Pursuit; neural network; hybrid control; adaptive control.

УДК 629.113.07
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-703

ПОРТАТИВНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЯ

Александр Владимирович Юшкевич
Белорусско – Российский университет
Беларусь, 212000, Могилев, пр-т Мира, 43
E-mail: alex_bru@mail.ru

Аннотация. Описана основная проблема оперативного доступа к диагностической информации электронных систем управления современных автомобилей. Проведён анализ существующих решений в области портативной автомобильной диагностики, выявлены их основные ограничения и недостатки. Предложена архитектура портативного устройства на базе микроконтроллера ESP32 WROOM, TFT-дисплея и CAN-трансивера TJA1050.

Ключевые слова: диагностика; CAN-шина; OBD-II; ESP32; ILI9341; CAN-трансивер TJA1050; мониторинг параметров; электронные системы автомобиля; диагностические коды неисправностей (DTC).

1. Введение

Современный автомобиль состоит из множества электронных блоков управления, которые обмениваются информацией между собой используя внутреннюю сеть. Количество электронных блоков в среднестатистическом автомобиле до 50 штук, а в премиальных моделях достигает 100 и более. При этом доступ к диагностической информации этих систем открывает широкие возможности: от мониторинга параметров двигателя и трансмиссии в реальном времени до выявления скрытых неисправностей на ранних стадиях, согласно ГОСТ Р ИСО 11898-1-2019.

Существующие устройства для доступа к CAN-шине автомобиля имеют ряд существенных ограничений. Заводские диагностические сканеры обладают высокой стоимостью и имеют привязку к конкретным маркам автомобилей, мультимарочные универсальные устройства на базе ELM327, несмотря на доступную цену, ограничены по скорости опроса данных и не позволяют работать с нестандартными CAN-идентификаторами, согласно ГОСТ Р ИСО 15765-4-2014. Профессиональные многоканальные мультимарочные устройства, обеспечивают высокую производительность, но их

стоимость и габариты делают их недоступными для повседневного использования автолюбителям [1].

Цель: создание портативного устройства для мониторинга параметров электронных систем автомобиля, способного работать с нестандартными CAN-идентификаторами, при этом обладать невысокой стоимостью, компактность, универсальность и возможность работы в реальном времени без подключения к внешним вычислительным устройствам является актуальным в настоящее время.

2. Анализ существующих устройств

Профессиональные диагностические устройства, такие как сканеры Bosch, Launch или Autel, обеспечивает полный доступ ко всем блокам управления автомобиля, включая чтение и очистку кодов неисправностей, адаптацию компонентов и программирование [1]. Однако они обладают высокой стоимостью, а их программное обеспечение часто требует регулярного обновления и привязано к конкретным маркам автомобилей.

Наиболее массовым решением являются адаптеры ELM327, подключаемые к OBD-II разъёму и передающие данные по Bluetooth или Wi-Fi на внешние вычислительные устройства [2]. Такие адаптеры имеют низкую стоимость и поддерживают широкий спектр автомобилей. Однако они имеют существенные ограничения [3], а именно:

– работает через последовательный интерпретатор команд, который ограничивает частоту обновления команд, в результате чего получается низкая скорость опроса до 5 Гц [2];

– имеют ограниченный доступ к CAN-идентификаторам, а именно адаптер работает только с OBD-II PID, не позволяя читать произвольные CAN-сообщения;

– при использовании Bluetooth или Wi-Fi передачи возникают дополнительные задержки, что является критичным для мониторинга в реальном времени.

На данный момент получили широкое распространение DIY-решения на базе ESP32, Raspberry Pi и Arduino. Проекты, такие как CAN-DAQ и ESP32-OBD2-Logger [4, 5], демонстрируют принципиальную возможность создания недорогих портативных диагностических устройств, но при этом, большинство из них либо требуют подключения к внешнему дисплею или компьютеру, либо имеют ограниченный пользовательский интерфейс [6].

3. Проблема создания портативных диагностических устройств

CAN-шина автомобиля работает с дифференциальными уровнями сигнала, в то время как микроконтроллеры оперируют логическими уровнями 3.3 В или 5 В, отсюда возникает проблема согласования уровней напряжения. Для согласования требуется внешний CAN-трансивер, такой как TJA1050 или SN65HVD230 [6]. Неправильный выбор или подключение трансивера могут привести к повреждению микроконтроллера или невозможности установить связь с шиной [7].

Для защиты диагностического оборудования от возможных перенапряжений в бортовой сети автомобиля желательно использовать гальваническую развязку. Это усложняет схему устройства и увеличивает его стоимость.

Портативное устройство должно работать от бортовой сети автомобиля 12 В или от встроенного аккумулятора, также необходимо обеспечить стабилизацию питания и защиту от импульсных помех, которые характерны для автомобильной бортовой сети [7].

Большинство современных автомобилей используют CAN-шину с диагностическим протоколом ISO 15765-4 (DoCAN), также существуют различия в скорости передачи данных (125, 250 или 500 кбит/с) и в наборе поддерживаемых OBD-II PID согласно ISO 11898-1:2015. Универсальное устройство должно автоматически определять параметры шины либо предоставлять возможность ручной настройки.

Каждый производитель автомобилей использует собственные CAN-идентификаторы для передачи одних и тех же параметров. Например, в автомобилях KIA/Hyundai обороты двигателя передаются по ID 0x0C, в VW/Audi – по ID 0x280, а в BMW – по ID 0x0A0 [7]. Универсальное устройство должно поддерживать различные профили автомобилей или предоставлять средства для их настройки, согласно ISO 11898-1:2015.

Стандарт OBD-II определяет запрос Mode 03 для чтения сохранённых кодов ошибок. Однако некоторые производители используют расширенные режимы диагностики (Mode 22, Mode 23), что требует дополнительной реализации согласно ГОСТ Р ИСО 14229-1-2020.

Портативное устройство должно обеспечивать удобное отображение большого объёма данных на ограниченной площади экрана [6]. Требуется продуманный интерфейс с интуитивной навигацией, также необходимо минимизировать количество действий и использовать крупные, контрастные элементы интерфейса [7].

4. Архитектура и устройство портативного устройства

В отличие от адаптеров ELM327, требующих подключения к внешнему вычислительному устройству, портативное устройство со встроенным дисплеем является полностью автономным, что в свою очередь, упрощает его использование.

Выбор ESP32 обусловлен наличием встроенного CAN-контроллера Two-Wire Automotive Interface (TWAI), поддержкой SPI для работы с дисплеем и достаточной вычислительной мощностью для обработки данных в реальном времени. Использование микроконтроллера ESP32, сочетают в себе высокую производительность при доступной цене. Также микроконтроллер может получать прямой доступ к CAN-шине через встроенный контроллер TWAI, при этом ESP32 позволяет достичь частоты опроса до 1 кГц, что значительно превосходит возможности ELM327 [6]. Наряду с этим, открытая архитектура позволяет легко модифицировать прошивку под конкретные задачи: добавлять новые параметры, изменять интерфейс, интегрировать дополнительные датчики [8].

Портативное устройство построено на базе следующих компонентов:

– основной вычислительный модуль построен на микроконтроллере ESP32 WROOM, который дополнительно управляет дисплеем и обрабатывает нажатия кнопок;

– для отображения информации дисплей с разрешением 320×240 пикселей;

– для согласования уровней CAN используется CAN-трансивер TJA1050, при этом сигналы CAN_H и CAN_L поступают на трансивер, который через линии TXD и RXD соединяется с микроконтроллером [9];

– навигация и управление интерфейсом состоит из шести тактовых кнопок, UP/DOWN для перемещения по пунктам меню, LEFT/RIGHT для изменения параметров, SELECT для входа в подменю, BACK для возврата на предыдущий уровень;

– для преобразования бортового напряжения используется преобразователь питания DC-DC 12 В –> 5 В.

Для обеспечения универсальности в устройстве реализована система профилей автомобилей. Каждый профиль содержит набор CAN-идентификаторов для основных параметров: название профиля, ID сообщения с оборотами, ID сообщения со скоростью, ID сообщения с температурой, ID сообщения с топливом, ID сообщения с передачей, ID сообщения с напряжением, а также флаг использования OBD-II запросов.

Поддерживаются следующие профили: универсальный OBD-II, KIA/Hyundai (RPM ID 0x0C, Speed ID 0x0D, Temp ID 0x05, Fuel ID 0x2F, Gear ID 0x1A, Vbat ID 0x1B), VW/Audi (RPM ID 0x280, Speed ID 0x2A0, Temp ID 0x188) и BMW (RPM ID 0x0A0, Speed ID 0x0A2, Temp ID 0x0A5). Пользователь может переключать профиль в настройках без перекомпиляции прошивки. Для автомобилей, отсутствующих в списке, предусмотрен универсальный OBD-II режим, использующий стандартные запросы PID.

Во всех случаях устройство успешно устанавливало соединение с CAN-шиной, считывало параметры двигателя и отображало их на экране. Время отклика при обновлении данных не превышало 100 мс.

Измеренные характеристики устройства: время инициализации CAN составляет менее 500 мс, частота обновления данных достигает 10 Гц, потребляемый ток в режиме ожидания равен 120 мА, в активном режиме 180 мА, габаритные размеры устройства 85×55×25 мм.

5. Заключение

Проведён сравнительный анализ четырёх классов существующих решений в области автомобильной диагностики: заводских сканеров, адаптеров ELM327, портативных осциллографов и DIY-решений на микроконтроллерах. Установлено, что ни один из рассмотренных классов не обеспечивает одновременного сочетания низкой стоимости, автономности, высокой скорости опроса и поддержки прямого доступа к CAN-идентификаторам. На основании выявленных ограничений предложена архитектура устройства на базе ESP32 WROOM, TFT-дисплея ILI9341 и CAN-трансивера TJA1050.

Стоимость компонентов не превышает 2000 рублей, что в 10-50 раз дешевле заводских сканеров и сопоставимо с адаптерами ELM327 при существенно большей функциональности. Автономность обеспечивается встроенным дисплеем и кнопочным интерфейсом, тогда как ELM327 требует подключения смартфона или ноутбука. Частота опроса данных достигает 10 Гц, что вдвое превосходит возможности ELM327, ограниченные 5 Гц. Универсальность достигается за счёт системы профилей автомобилей и универсального OBD-II режима, что позволяет работать с автомобилями различных марок без перекомпиляции прошивки.

Разработанное устройство может найти применение в нескольких сценариях. Для автолюбителей оно предоставляет доступ к диагностической информации без необходимости приобретения дорогостоящего оборудования. Для небольших автосервисов устройство может служить вспомогательным

инструментом экспресс-диагностики. Для образовательных учреждений открытая архитектура и доступная компонентная база позволяют использовать устройство в качестве учебного стенда по изучению CAN-шины и протоколов OBD-II.

Дальнейшие направления развития включают интеграцию беспроводной передачи данных (Wi-Fi/Bluetooth) для удалённого мониторинга, поддержку расширенных диагностических протоколов (UDS), а также добавление функции логирования данных на SD-карту.

В результате выполнения работы была достигнута поставленная цель – разработано портативное устройство для мониторинга параметров электронных систем автомобиля, отвечающее требованиям доступности, автономности и универсальности. Проведённое исследование позволило сформулировать следующие выводы.

Список использованных источников

1. *Вершинин Е. В., Поляков Я. А.* Разработка алгоритма сбора и обработки данных с автомобиля // Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе : материалы Региональной научно-технической конференции, Калуга, 15–17 апреля 2025 года : в 2 т. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2026. – Т. 2. – С. 83–85.
2. *Тихомиров М. В., Овчинников С. В., Хрящев Ю. Е.* Разработка диагностического комплекса для электронной системы управления отечественных автомобильных дизелей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2015. – № 1. – С. 144.
3. CAN-шина в ESP32 – максимально подробно все аспекты [Электронный ресурс] // Microkontroller.ru. – Режим доступа: https://microkontroller.ru/esp32-projects/can-shina-v-esp32-maksimalno-podrobno-vse-aspekty (дата обращения: 09.09.2026).
4. WiCAN Pro – OBD-сканер на базе ESP32-S3 для диагностики транспортных средств [Электронный ресурс] // CNX-Software.ru. – 2024. – 31 августа. – Режим доступа: https://cnx-software.ru (дата обращения: 09.09.2026).
5. Разработка своего автономного OBD-сканера на ESP32: ухожу от ELM327 и сторонних приложений [Электронный ресурс] // VC.ru. – Режим доступа: https://vc.ru/dev/2979465-razrabotka-avtonomnogo-obd-skannera-na-esp32 (дата обращения: 09.09.2026).
6. OBD-II： ESP32 PlatformIO CAN （ISO 15765-4） [Электронный ресурс] // CSDN Blog. – 2026. – 20 февраля. – Режим доступа: https://blog.csdn.net (дата обращения: 09.09.2026).
7. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (дата обращения: 09.09.2026).

8. Плата ESP32 CAN подключается к OBD-II и поддерживает автоматическое выключение [Электронный ресурс] // CNX-Software.ru. – 2022. – 4 января. – Режим доступа: https://cnx-software.ru (дата обращения: 09.09.2026).
9. NXP Semiconductors. TJA1050 Datasheet: High-speed CAN transceiver [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.nxp.com/products/TJA1050 (дата обращения: 09.09.2026).

PORTABLE DEVICE FOR MONITORING OPERATIONAL PARAMETERS OF VEHICLE ELECTRONIC SYSTEMS

Aleksandr V. Yushkevich
Belarusian-Russian University
Belarus, 212000, Mogilev, 43 Mira Ave.,
E-mail: alex_bru@mail.ru

Abstract. The paper outlines the key challenge of obtaining rapid access to diagnostic information from the electronic control systems of modern vehicles. An analysis of existing solutions in the field of portable automotive diagnostics is conducted, identifying their primary limitations and drawbacks. An architecture for a portable device based on the ESP32 WROOM microcontroller, a TFT display, and the TJA1050 CAN transceiver is proposed.

Keywords: diagnostics; CAN bus; OBD-II; ESP32; ILI9341; TJA1050 CAN transceiver; parameter monitoring; automotive electronic systems; diagnostic trouble codes (DTCs).

УДК 629.1
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-704

РАЗВОРОТ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С НУЛЕВЫМ РАДИУСОМ КАК ПРЕДЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ ТЯГОВОГО РАСЧЕТА

Дмитрий Сергеевич Неверовский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: neverovskij@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен разворот двухгусеничной машины с нулевым радиусом как особый предельный режим бортового поворота. Показано, что при перемещении мгновенного центра поворота внутрь колеи изменяется направление скорости внутренней гусеницы, а при нулевом радиусе центр масс машины не имеет поступательной скорости при движущихся в противоположных направлениях гусеницах. Систематизированы причины, затрудняющие применение традиционных тяговых расчетов к этому режиму: неопределенность момента сопротивления повороту, зависимость результата от распределения нормальных реакций, изменение знаков сил и скоростей по бортам, а также внутренние потери в движителе. По результатам анализа отечественных и зарубежных работ сформулированы кинематические, силовые и энергетические граничные условия, которым должна удовлетворять перспективная методика расчета разворота на месте.

Ключевые слова: гусеничная машина; бортовой поворот; нулевой радиус поворота; разворот на месте; тяговый расчет; сопротивление повороту; энергозатраты.

1. Введение

Поворот гусеничной машины сопровождается возникновением момента сопротивления повороту, из-за чего тяговый расчет поворота существенно отличается от расчета прямолинейного движения. Большинство методологий тягового расчета поворота гусеничных машин разработаны для случая установившегося движения по дуге конечного радиуса [1]. Методика А. О. Никитина является наиболее распространенной. В его методике сопротивление повороту зависит от относительного радиуса поворота, что позволяет выполнять расчет при небольшом количестве исходных данных [2]. Достоинство данной методики состоит в простоте применения, однако, она корректно может применяться лишь при относительном радиусе поворота (R) равном или большем, чем половина ширины колеи машины (B). Уточнения классических моделей учитывают скольжение и смещение полюсов поворота [3], а исследования показывают

сильную зависимость результата от принятых гипотез о взаимодействии гусеницы с основанием [4, 5].

Современные гидрообъемные и электромеханические трансмиссии позволяют реализовать независимое управление гусеницами, что открывает возможность разворота гусеничной машины с нулевым радиусом. Особенностью, уменьшения радиуса поворота $R < B/2$ выступает переход направления движения внутреннего борта в обратное направление относительно внешнего. Поэтому разворот с нулевым радиусом нельзя рассматривать только как формальную подстановку нулевого радиуса в зависимость, полученную для движения по дуге.

Цель работы – определение особенностей разворота гусеничной машины с нулевым радиусом, как предельного режима бортового поворота и формулирование требований к его тяговому и энергетическому расчету.

2. Кинематика поворота гусеничной машины

При установившемся повороте, без учета продольного буксования, скорости гусениц пропорциональны расстояниям от соответствующих гусениц до мгновенного центра поворота. Так же примем допущения аналогичные допущениям методики А. О. Никитина [6]:

– равномерное распределение нормальных реакций по опорной поверхности;

– центр тяжести машины совпадает с геометрическим центром опорной поверхности;

– поворот производится равномерно без проскальзывания и сноса гусениц.

Соответственно, можно составить четыре характерных области движения гусеничной машины в повороте, данные режимы представлены на рисунке 1.

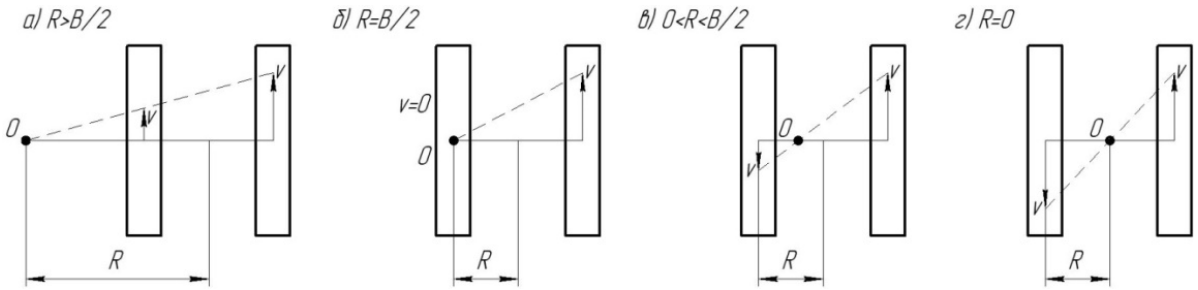


Рис. 1. Характерные кинематические режимы поворота гусеничной машины

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: O – положение мгновенного центра поворота; v – скорость движения гусеницы.

Рассмотрим принятые на рисунке 1 области поворота:

а) при $R > B/2$ обе гусеницы движутся в одном направлении, центр поворота находится вне опорной поверхности машины;

б) при $R = B/2$ мгновенный центр поворота совпадает с продольной осью внутренней гусеницы, поэтому ее идеальная скорость равна нулю;

в) в диапазоне $0 < R < B/2$ гусеницы двигаются в противоположных направлениях с неравными по модулю скоростями, центр поворота находится внутри опорной поверхности;

г) при $R = 0$ скорости гусениц становятся равными по модулю и противоположными по знаку, центр поворота совпадает с геометрическим центром машины.

Следовательно, поворот вокруг полностью остановленной гусеницы ($R = B/2$) является кинематической границей, после которой расчет должен явно учитывать изменение направления движения внутреннего борта. Эта смена направления принципиальна и для энергетического баланса. При движении гусениц в одинаковых направлениях отрицательное тяговое усилие характеризует тормозную работу борта; после перехода центра поворота внутрь колеи отрицательной становится уже сама скорость. Поэтому направление потока мощности следует определять по знаковому произведению усилия и скорости. При $R = 0$ поступательная скорость центра тяжести равна нулю, хотя обе гусеницы имеют ненулевые скорости, что исключает использование в качестве единственного энергетического показателя произведения суммарной продольной силы на скорость центра масс.

3. Силовые факторы и энергозатраты при развороте на месте

Разворот на месте рассматривается в отечественных исследованиях как самостоятельная задача. В. В. Павлов приводит теоретические и экспериментальные результаты для машины с гидрообъемной передачей механизма поворота [7]. Р. А. Закиров с соавторами исследуют разворот гусеничного трактора с дифференциальным механизмом поворота [8]. Эти работы показывают, что при $R = 0$ необходимо одновременно учитывать внешний силовой баланс и режим работы трансмиссии.

Для установившегося разворота с нулевым радиусом главным внешним силовым фактором является момент сопротивления повороту (M_c), который

возникает в результате скольжения, сдвига и деформации в контакте гусениц с опорной поверхностью. Тяговые усилия гусениц преодолевают возникающие сопротивления. В идеальном случае, при принятых допущениях, тяговые усилия равны по модулю и противоположны по направлению. Одновременно противоположны и скорости гусениц, поэтому мощности бортов складываются, а не взаимно уничтожаются.

Конечно, определение потребной мощности для совершения такого маневра нельзя ограничивать только внешним моментом. В балансе необходимо разделять работу на взаимодействие с основанием, потери в гусеничном движителе и потери в трансмиссии. Энергетические показатели механизмов поворота рассматриваются в [9]. Дополнительные потери при малых радиусах могут формироваться внутри ходовой части; в частности, в [10] исследовано трение реборд опорных катков о гребни гусениц. Для электромеханической трансмиссии распределение мощности по бортам и возможный режим рекуперации отдельных электрических машин дополнительно влияют на общий энергетический баланс машины [11].

Отдельная проблема связана с выбором критерия энергоемкости. При $R = 0$ длина траектории движения центра масс за конечный угол поворота равна нулю, поэтому энергия на единицу пути центра масс математически неприменима. Для сопоставления разворотов на месте целесообразно использовать суммарную мощность по бортам, энергию полного маневра на заданный угол либо энергию на единицу угла поворота машины. Такой показатель сохраняет физический смысл независимо от отсутствия поступательного перемещения центра масс.

4. Ограничения существующих подходов

Простые эмпирические методы удобны для предварительного проектирования, но при переходе к $R < B/2$ зачастую перестают корректно работать. Отечественные модели, учитывающие скольжение и положение полюсов поворота [3–5], повышают физическую осмысленность, однако увеличивают число параметров необходимых для расчета. Что может быть критично на ранних стадиях разработки транспортных средств.

Подходы, непосредственно посвященные развороту на месте [7, 8], хорошо отражают работу исследованных механизмов поворота, но связаны с конкретными трансмиссионными схемами. В зарубежной теории авторами J. Y. Wong и C. F. Chiang описана модель установившегося поворота на твердой поверхности с учетом зависимости касательных

напряжений в контакте гусеницы с поверхностью от величины перемещения [12]. J. Morales с соавторами предложили экспериментально проверенные модели энергоэффективности гусеничного мобильного робота на жестком основании [13].

Таким образом, модели тягового расчета поворота для гусеничных машин продолжают развиваться. В литературе представлены различные подходы к задаче определения тяговых параметров поворота гусеничных машин. Тем не менее, для разворота с нулевым радиусом по-прежнему требуется разработка модели тягового расчета, без излишнего усложнения исходных данных.

5. Рекомендации для разработки методики тягового расчета

При разработке такой методики, на основании проведенного анализа, предлагается использовать пять условий физической непротиворечивости

Первое условие – при $R = B/2$ непрерывный кинематический переход с последующим изменением знака скорости внутренней гусеницы.

Второе условие – симметрия при развороте с нулевым радиусом. Согласно принятым допущениям, на горизонтальной поверхности при $R = 0$ скорости бортов должны быть равны по модулю и противоположны по направлению. Аналогичная симметрия ожидается для тяговых усилий. Асимметрия должна возникать только при наличии физической причины: смещения центра масс, неоднородности поверхности по бортам или неодинаковых параметров приводов.

Третье условие – явное определение момента сопротивления повороту при $R = 0$. Расчет должен содержать либо предельный коэффициент сопротивления повороту, либо контактную модель, позволяющую вычислять M_c.

Четвертое условие – разделение внешнего сопротивления и внутренних потерь. Тяговые усилия определяются внешним силовым балансом, тогда как мощность привода должна дополнительно учитывать потери в гусенице и трансмиссии. Для эластичных полотен существенны деформационные и гистерезисные потери; для металлических гусениц – потери в шарнирах и зацеплении. Объединение этих факторов в один коэффициент снижает переносимость результатов между различными конструкциями.

Пятое условие – возможность параметрической идентификации. Неизвестные параметры поверхности и движителя должны, по возможности, определяться ограниченным числом установившихся

испытаний. Сочетание малого числа идентифицируемых параметров с указанными граничными условиями представляется рациональной основой для дальнейшей разработки инженерной методики.

6. Заключение

Разворот с нулевым радиусом является отдельным кинематическим и энергетическим режимом поворота гусеничной машины. При $R < B/2$ внутренняя гусеница меняет направление движения; при $R = 0$ центр масс не имеет поступательной скорости. Поэтому применение классических методик тягового расчета поворота, для изученных режимов поворота недопустимо.

Анализ существующих исследований показал, что известные подходы либо имеют ограничения по диапазону рассматриваемых радиусов, либо требуют значительного количества исходных параметров. Поэтому актуальной остается разработка методики тягового расчета, обеспечивающей непрерывное описание перехода от поворота вокруг заторможенной гусеницы к развороту на месте и позволяющей определять тяговые и энергетические параметры при ограниченном наборе исходных данных. Сформулированные требования к разрабатываемым методикам тягового расчета могут быть применены при построении и экспериментальной проверке.

Список использованных источников

1. *Трояновская И. П.* История развития теории поворота гусеничных машин // Вестник машиностроения. – 2010. – № 7. – С. 90–94.
2. *Павлов В. В.* Формула А. О. Никитина – революционный прорыв в теории поворота гусеничных машин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2016. – № 4 (10). – С. 1–6.
3. *Шеломов В. Б., Добрецов Р. Ю.* Уточнение модели поворота гусеничной машины // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Машиностроение. – 2012. – № 1 (142). – С. 123–127.
4. *Кондаков С. В., Харлапанов Д. В., Вансович Е. И.* Достоверность моделей описания сопротивления повороту быстроходной гусеничной машины // Вестник машиностроения. – 2015. – № 10. – С. 3–7.
5. *Стадухин А. А*. Исследование границ применимости классического тягового расчета поворота гусеничной машины и метод его уточнения с применением нейронной сети // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2020. – № 4 (131). – С. 127–140. – DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_127.

6. *Неверовский Д. С.* Уточнение расчетной модели бортового поворота транспортной гусеничной машины / Д. С. Неверовский // Вестник Вологодского государственного университета. Серия : Технические науки. – 2025. – № 3 (29). – С. 73–75.
7. *Павлов В. В.* Вопросы поворота гусеничной машины на месте // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2011. – № 2 (25). – С. 14–17.
8. *Закиров Р. А., Землянский Ю. М., Кондаков С. В., Поджиботова И. А.* Теоретическое обоснование разворота на месте гусеничного трактора с дифференциальным механизмом поворота при нейтрали в коробке передач // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 11 (96). – С. 52–58. – DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-52-58.
9. *Добрецов Р. Ю., Поршнев Г. П.* К определению параметров энергоэффективности механизма поворота шасси транспортных и технологических гусеничных машин // Вестник ПНИПУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 1. – С. 42–55.
10. *Падалкин Б. В.* Теоретическое исследование потерь в движителе при повороте гусеничной машины // Транспортные системы. – 2021. – № 1 (19). – С. 11–15. – DOI: 10.46960/62045_2021_1_11.
11. *Кузнецова В. Н., Романенко Р. В.* Результаты исследования криволинейного движения быстроходной гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – № 2 (96). – С. 164–179.
12. *Wong J. Y., Chiang C. F.* A general theory for skid steering of tracked vehicles on firm ground // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2001. – Vol. 215, no. 3. – P. 343–355. – DOI: 10.1243/0954407011525683.
13. *Morales J., Martínez J. L., Mandow A., García-Cerezo A. J., Pedraza S.* Power Consumption Modeling of Skid-Steer Tracked Mobile Robots on Rigid Terrain // IEEE Transactions on Robotics. – 2009. – Vol. 25, no. 5. – P. 1098–1108. – DOI: 10.1109/TRO.2009.2026499.

ZERO-RADIUS TURN OF A TRACKED VEHICLE AS A LIMITING MODE OF TRACTION CALCULATION

Dmitriy S. Neverovsky
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: neverovskij@yandex.ru

Abstract. The zero-radius turn of a two-track vehicle is considered as a special limiting mode of skid steering. It is shown that when the instantaneous center of rotation moves inward into the track gauge, the direction of the inner-track velocity changes, and with a zero radius, the vehicle's center of mass has no translational speed when the tracks are moving in opposite directions. The reasons that hinder the application of traditional traction calculations to this mode are systematized: the uncertainty of the turning-resistance torque, the dependence of the result on the distribution of normal reactions, the change in the signs of forces and velocities along the sides, as well as international losses in propulsion system. Based on analysis of domestic and international studies, kinematic, force and energy boundary conditions have been formulated that a promising methodology for calculating a turn in place must satisfy.

Keywords: tracked vehicle; side-to-side turn; zero turning radius; turn in place; traction calculation; turning resistance, energy consumption.

УДК 621.873:004.94
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-705

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРЕЛОВОГО УСТРОЙСТВА ПОРТАЛЬНОГО КРАНА С УЧЕТОМ ОТКЛОНЕНИЯ ГРУЗОВОГО КАНАТА ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Максим Валерьевич Пичугин,
Иван Андреевич Васильев, канд. техн. наук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: pichugin_mv@spbstu.ru, vassilyev.ivan.iv@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена аналитическая модель шарнирно-сочлененного стрелового устройства (ШССУ) портального крана, предназначенная для работы в составе цифрового двойника (ЦД) системы мониторинга технического состояния (СМТС). По измеряемым данным: ходу рейки механизма изменения вылета, натяжению грузового каната и углу его отклонения от вертикали модель определяет положение звеньев, включая звенья противовесной системы, усилия в оттяжке, шарнире хобота и рейке, а также изгибающий момент в сечении стрелы у шарнира рейки. Показано, что влияние отклонения каната на нагруженность стрелы и механизма изменения вылета выражается через кинематические передаточные функции конца хобота. Расчет для масштабной модели крана показал, что отклонение каната на 3° изменяет усилие в рейке на 0,21–0,55 веса груза, и в средней части диапазона вылетов это приращение превышает составляющую усилия от вертикальной нагрузки.

Ключевые слова: портальный кран; шарнирно-сочлененное стреловое устройство; цифровой двойник; система мониторинга; отклонение грузового каната; кинематическая передаточная функция; механизм изменения вылета.

1. Введение

Цифровой двойник – это модель объекта, непрерывно синхронизируемая с данными его датчиков, которая все чаще применяется для контроля состояния промышленного оборудования [1]. Для грузоподъемных машин его основная задача это определение напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкции в текущий момент времени и накопление истории нагружения. В известных решениях связь показаний датчиков с напряжениями устанавливается суррогатными моделями, построенными по результатам конечно-элементных расчетов, – для стрелы крана [2], главных балок мостового крана [3] и металлоконструкции козлового крана [4]. Такие

модели обладают высоким быстродействием, но требуют большого объема предварительных расчетов и перестроения при изменении расчетной схемы.

Шарнирно-сочлененное стреловое устройство (ШССУ) портального крана является рычажным механизмом, для которого положения звеньев и усилия в шарнирах выражаются в явном виде. Модели системы изменения вылета на основе кинематических передаточных функций известны давно [5], современные работы посвящены синтезу параметров ШССУ [6], уравновешивающих устройств [7] и анализу движущих сил механизма изменения вылета [8]. Эти модели ориентированы на проектирование и оперируют расчетными нагрузками, а не измеряемыми величинами.

Существенное влияние на усилия, которые приходятся на стреловое устройство, оказывает отклонение грузового каната от вертикали при раскачивании груза во время пусков и торможений механизмов [9], а также при возникновение ветровых нагрузок, сопровождающееся дополнительными усилиями в металлоконструкции [10, 11]. Штатные ограничители грузоподъемности и регистраторы параметров фиксируют массу груза и вылет, но не угол отклонения каната, хотя его измерение возможно, в том числе с помощью инерциальных MEMS-датчиков [12, 13] и алгоритмов комплементарной фильтрации [14].

Цель разработать аналитическую модель ШССУ с учетом отклонения грузового каната, пригодную для расчета в реальном времени в составе цифрового двойника системы мониторинга, и оценить влияние этого отклонения на усилия в элементах стрелового устройства.

2. Аналитическая модель стрелового устройства

Расчетная схема ШССУ приведена на рис. 1. Стрела 1 поворачивается относительно шарнира O_1 и приводится в движение рейкой 4 механизма изменения вылета, конец которой закреплен в шарнире B. Хобот 2 соединен со стрелой шарниром C и удерживается оттяжкой 3 с опорным шарниром O_2; грузовой канат сходит с головки хобота D. Звенья принимаются абсолютно жесткими, шарниры – идеальными, движение – плоским. Входным параметром служит ход рейки s, измеряемый энкодером, так что длина части приводной рейки между шарниром стрелы и приводной шестерней равна

$$l_{AB}(s) = l_{AB0} + s. \qquad (1)$$

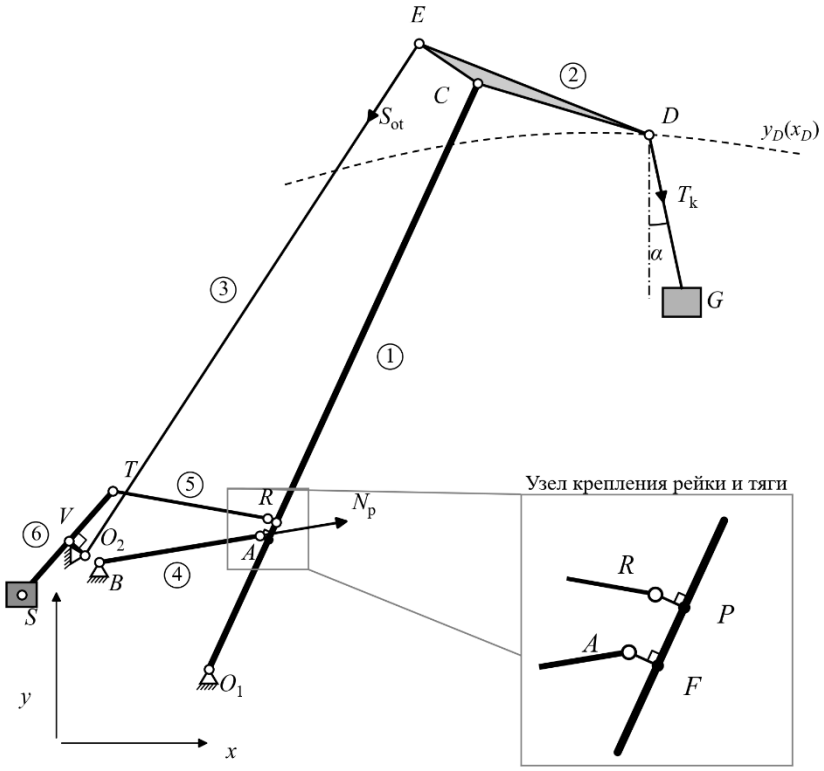


Рис. 1. Расчетная схема ШССУ: 1 – стрела; 2 – хобот; 3 – оттяжка; 4 – рейка; 5 – тяга противовеса; 6 – коромысло с противовесом

Угол наклона стрелы к горизонту φ определяется из треугольника O_1AB по теореме косинусов:

$$\beta(s) = \arccos\frac{l_{O_1A}^2 + l_{O_1B}^2 - l_{AB}^2(s)}{2l_{O_1A}l_{O_1B}}, \quad \varphi(s) = \pi - \gamma_1 - \gamma_2 - \beta(s), \tag{2}$$

где $\gamma_1 = \text{arctg}(l_{AF}/l_{O1F})$ – угол между осью стрелы и отрезком O_1A; F – проекция шарнира A на ось стрелы; γ_2 – угол наклона отрезка O_1B к горизонту.

Радиус-векторы шарниров стрелы в неподвижной системе координат xy при $\mathbf{e}(\vartheta) = [\cos\vartheta, \sin\vartheta]^T$:

$$\mathbf{r}_A = \mathbf{r}_{O_1} + l_{O_1A}\mathbf{e}(\varphi + \gamma_1), \quad \mathbf{r}_C = \mathbf{r}_{O_1} + l_{O_1C}\mathbf{e}(\varphi). \tag{3}$$

Положение хобота находится из замкнутого контура O_1O_2EC с помощью углов

$$\theta_2 = \arccos\frac{l_{O_1O_2}^2 + l_{O_2C}^2 - l_{O_1C}^2}{2l_{O_1O_2}l_{O_2C}}, \quad \theta_3 = \arccos\frac{l_{O_2C}^2 + l_{O_2E}^2 - l_{CE}^2}{2l_{O_2C}l_{O_2E}}, \tag{4}$$

$$\theta_4 = \arccos\frac{l_{CE}^2 + l_{O_2E}^2 - l_{O_2C}^2}{2l_{CE}l_{O_2E}}, \quad \psi = \frac{\pi}{2} + \gamma_3 - \theta_2 - \theta_3, \tag{5}$$

где $l_{O2C} = |\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_{O2}|$; γ_3 – угол наклона отрезка O_1O_2 к горизонту; γ_4 – угол при вершине E треугольника CED хобота; ψ – угол наклона оттяжки к вертикали. Радиус-векторы шарнира E и головки хобота D при $\chi = \theta_4 + \gamma_4 - \psi$:

$$\mathbf{r}_E = \mathbf{r}_{O_2} + l_{O_2E}\left[\sin\psi, \cos\psi\right]^T, \quad \mathbf{r}_D = \mathbf{r}_E + l_{ED}\left[\sin\chi, -\cos\chi\right]^T. \tag{6}$$

Противовесная система образует вторую четырёхзвенную цепочку: тяга RT соединяет шарнир R на стреле с коромыслом TS. Коромысло вместе с жёсткой связью O_2V, всегда перпендикулярной ему, образует одно тело, вращающиеся относительно шарнира O_2, поэтому расстояние от O_2 до шарнира T постоянно. Масса противовеса сосредоточена в точке S. Шарнир R смещён от оси стрелы так же, как шарнир рейки A, поэтому положения точек T, V и S определяются тем же ходом рейки s. Координаты R, T и S находятся из условий постоянства длин звеньев аналогично (2)–(6).

Для масштабной модели крана (раздел 4) горизонтальная координата D хобота относительно шарнира O_1 при ходе рейки 0–188 мм изменяется от 160 до 1250 мм. Производные координат головки хобота по ходу рейки

$$u_x(s) = \frac{dx_D}{ds}, \quad u_y(s) = \frac{dy_D}{ds} \tag{7}$$

являются кинематическими передаточными функциями механизма [5]: u_x – передаточное отношение от хода рейки к вылету, u_y – наклон траектории груза. Так как координаты (6) заданы явно, производные (7) вычисляются аналитически либо методами численного дифференцирования без решения систем уравнений.

3. Учет отклонения грузового каната от вертикали

Сила, действующая на головку хобота со стороны свисающих ветвей каната при его отклонении от вертикали на угол α в плоскости качания стрелы,

$$\mathbf{P} = T_k\left[\sin\alpha, -\cos\alpha\right]^T, \tag{8}$$

где T_k – равнодействующая натяжений свисающих ветвей каната; $\alpha > 0$ соответствует отклонению груза в сторону увеличения вылета. Усилия от ветвей каната, проложенных вдоль хобота и стрелы, а также собственный вес звеньев и противовеса от α не зависят и учитываются по принципу суперпозиции.

Хобот нагружен силой $\mathbf{P}$, усилием оттяжки S_{ot}, направленным по единичному вектору $\mathbf{n}_E = (\mathbf{r}_{O2} - \mathbf{r}_E)/l_{O2E}$, и реакцией шарнира C. Из уравнения моментов относительно C

$$S_{ot} = -\frac{(\mathbf{r}_D - \mathbf{r}_C)\times \mathbf{P}}{(\mathbf{r}_E - \mathbf{r}_C)\times \mathbf{n}_E}, \quad \mathbf{F}_C = \mathbf{P} + S_{ot}\mathbf{n}_E, \tag{9}$$

где $\mathbf{F}_C$ – сила, передаваемая хоботом на стрелу. Уравнение моментов для стрелы относительно O_1 дает усилие в рейке $N_\text{р}$ (положительное при сжатии) и неуравновешенный грузовой момент M_{O1}:

$$N_p = -\frac{(\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_{O_1})\times \mathbf{F}_C}{(\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_{O_1})\times \mathbf{n}_{AB}}, \quad M_{O_1} = (\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_{O_1})\times \mathbf{F}_C, \tag{10}$$

где $\mathbf{n}_{AB} = (\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B)/l_{AB}$. Изгибающий момент от груза в сечении стрелы у шарнира рейки

$$M_F = \frac{l_{O_1C} - l_{O_1F}}{l_{O_1C}} M_{O_1}, \tag{11}$$

Выражения (9)–(11) проверены по принципу возможных перемещений: работа усилия в рейке на перемещении ds уравновешивает работу силы $\mathbf{P}$ на перемещении головки хобота, откуда с учетом (7), (8)

$$N_p = -\mathbf{P}\cdot\frac{d\mathbf{r}_D}{ds} = T_k\left(u_y\cos\alpha - u_x\sin\alpha\right), \tag{12}$$

Расхождение значений $N_\text{р}$ по (10) и (12) во всем диапазоне хода рейки при $|\alpha| \le 6°$ не превысило 10^{-5}. При отклонении каната, когда вес груза G уравновешен вертикальной составляющей натяжения ($T_k = G/\cos\alpha$), из (12) следует

$$N_p = G\left(u_y - u_x \operatorname{tg}\alpha\right), \quad \Delta N_p = -Gu_x\operatorname{tg}\alpha, \tag{13}$$

где $\Delta N_\text{р} = N_\text{р}(\alpha) - N_\text{р}(0)$. Так как $M_{O1} = N_\text{р}h_{AB}$ (h_{AB} – плечо рейки относительно O_1), а M_F пропорционален M_{O1}, те же соотношения справедливы для обоих моментов. Составляющая от вертикальной нагрузки определяется наклоном траектории груза u_y, приращение от отклонения каната – передаточным отношением u_x. ШССУ проектируется так, чтобы траектория груза была близка к горизонтальной ($u_y \approx 0$). Поэтому в хорошо уравновешенном по вертикальной нагрузке стреловом устройстве нагруженность рейки и стрелы определяется главным образом горизонтальной составляющей натяжения каната, которую штатные приборы безопасности не регистрируют.

Собственный вес звеньев и противовеса от угла отклонения каната не зависит, поэтому усилие в рейке представляется суммой двух составляющих:

$$N_p = N_p^{вес}(s) + N_p^{гр}(s,\alpha), \quad N_p^{вес}(s) = \sum_i m_i g\frac{dy_i}{ds}, \tag{14}$$

где m_i и y_i – масса и ордината центра тяжести i-го звена, включая противовес; суммирование ведется по всем звеньям механизма. Составляющая $N_{\text{р}}^{\text{вес}}$ вычисляется по тому же принципу возможных перемещений, что и (12), и определяется только положением механизма. Отсюда следует, что приращение (13) от отклонения каната не зависит от параметров противовесной системы: уравновешивание смещает уровень усилия в рейке, но не изменяет вклад горизонтальной составляющей натяжения каната.

4. Результаты расчета для масштабной модели крана

Расчет выполнен для масштабной модели портального крана, на которой тестируется разрабатываемая система мониторинга: l_{O1C} = 1355 мм, l_{O2E} = 1284 мм, l_{CE} = 150 мм, l_{CD} = 375 мм, l_{ED} = 520 мм, l_{O1F} = 300 мм, l_{AF} = 20 мм, l_{AB0} = 221,6 мм; координаты шарниров O_1(260; 0), O_2(0; 240), B(30; 225) мм.

С увеличением хода рейки функция u_x снижается с 10,6 до 4,0, а u_y уменьшается от 2,94 до –0,73 и меняет знак при $s \approx 98$ мм, т. е. при вылете 0,81 м (рис. 2, а). Высота головки хобота изменяется на 109 мм: траектория груза макета заметно отклоняется от горизонтали на малых вылетах. Зависимости относительного усилия в рейке от хода рейки приведены на рис. 2, б, числовые значения – в таблице.

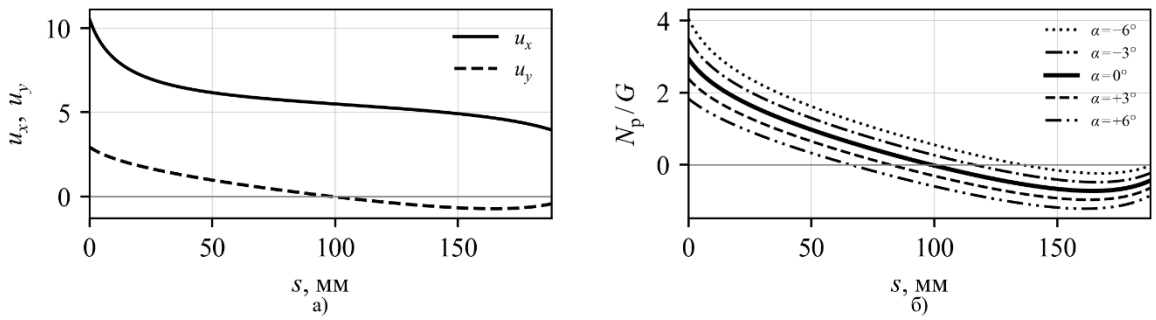


Рис. 2. Результаты расчета: а) передаточные функции; б) относительное усилие в рейке

Результаты расчета для масштабной модели крана

s, мм	**R, м**	**u_x**	**u_y**	**$N_{\text{р}}/G$ при α**			**M_F/G, м, при α**		
				–3°	**0°**	**3°**	**–3°**	**0°**	**3°**
0	0,160	10,55	2,937	3,490	2,937	2,384	0,787	0,662	0,537
47	0,508	6,23	1,039	1,366	1,039	0,713	0,298	0,227	0,155
94	0,783	5,56	0,075	0,366	0,075	–0,217	0,076	0,016	–0,045
141	1,033	5,05	–0,600	–0,336	–0,600	–0,864	–0,066	–0,118	–0,170
188	1,250	3,95	–0,441	–0,234	–0,441	–0,649	–0,043	–0,080	–0,118

Приращение усилия в рейке от отклонения каната составляет 0,21–0,55 G при $|\alpha| = 3°$ и 0,42–1,11 G при $|\alpha| = 6°$. На малых вылетах отклонение на 3° изменяет $N_р$ и M_F на ±19 %. При ходе рейки 82–115 мм (вылеты 0,72–0,90 м) приращение от отклонения на 3° превышает составляющую от вертикальной нагрузки, и усилие в рейке и изгибающий момент в стреле от груза меняют знак. Усилие в оттяжке и реакция шарнира хобота менее чувствительны: при $|\alpha| = 3°$ они изменяются не более чем на 11 и 8 % соответственно.

5. Реализация в системе мониторинга

Модель (1)–(13) составляет расчетное ядро цифрового двойника разрабатываемой системы мониторинга. Ход рейки s измеряется энкодером, натяжение каната T – тензометрическими датчиками в опорах барабана механизма подъема, угол α – инерциальным модулем (акселерометр и гироскоп) на канате у головки хобота с обработкой комплементарным фильтром [14]:

$$\alpha_k = K\left(\alpha_{k-1} + \omega_k \tau\right) + \left(1 - K\right)\alpha_{a,k}\ , \qquad (14)$$

где ω_k – угловая скорость по данным гироскопа; $\alpha_{a,k}$ – угол, найденный по проекциям ускорения; τ – период опроса; K – коэффициент фильтра. При интенсивном раскачивании собственные ускорения груза искажают $\alpha_{a,k}$, и целесообразен переход к фильтру Калмана с моделью маятника [12].

Расчет по (2)–(11) содержит несколько десятков тригонометрических операций и выполняется на каждом цикле опроса датчиков (80 Гц на макете) без обращения к конечно-элементной модели. Последовательности значений $N_р$, M_{O1} и M_F формируют историю нагружения расчетных зон стрелы, прежде всего зоны крепления рейки, для перехода к местным напряжениям и оценки накопленного повреждения. Из (13) следует требование к точности измерения угла отклонения каната:

$$\delta N_p \approx G u_x \delta\alpha\ . \qquad (15)$$

При погрешности измерения угла ±0,5°, достигнутой на макете, $\delta N_р$ = (0,035–0,092) G, что в средней части диапазона вылетов сопоставимо с составляющей усилия от вертикальной нагрузки.

6. Заключение

Разработана аналитическая модель ШССУ портального крана, выражающая в явном виде положения звеньев, включая звенья противовесной

системы, усилия в оттяжке, шарнире хобота и рейке и изгибающий момент в стреле через ход рейки, натяжение и угол отклонения грузового каната.

Показано, что приращение усилия в рейке от отклонения каната равно Gu_x tg α, т. е. определяется передаточным отношением от хода рейки к вылету, а не наклоном траектории груза. Для масштабной модели крана отклонение каната на 3° изменяет усилие в рейке на 0,21–0,55 G и в диапазоне вылетов 0,72–0,90 м превышает составляющую от вертикальной нагрузки. Это обосновывает включение датчика угла отклонения каната в системы мониторинга кранов с ШССУ. Дальнейшие исследования связаны с учетом отклонения каната из плоскости качания стрелы, податливости звеньев и экспериментальной проверкой модели тензометрированием стрелы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–79-00289, https://rscf.ru/project/25-79-00289/.

Список использованных источников

1. *Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C.* Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15. – No. 4. – P. 2405–2415. – DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
2. *Lai X., He X., Wang S., Wang X., Sun W., Song X.* Building a Lightweight Digital Twin of a Crane Boom for Structural Safety Monitoring Based on a Multifidelity Surrogate Model // Journal of Mechanical Design. – 2022. – Vol. 144. – No. 6. – Art. 064502. – DOI: 10.1115/1.4053606.
3. *Huang B., Hui Y., Liu Y., Wang H.* Design of Twin Builder-Based Digital Twin Online Monitoring System for Crane Girders // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – No. 22. – Art. 9203. – DOI: 10.3390/s23229203.
4. *Liu M., Chen K., Xiao H., Zhu Z., Yan Y., Zhang J., Han Y., Zhu F.* Real-Time Structural Stress Monitoring of Gantry Cranes Utilizing Digital Twin Technology // Applied Sciences. – 2026. – Vol. 16. – No. 10. – Art. 4870. – DOI: 10.3390/app16104870.
5. *Васильев И. А., Пичугин М. В.* Система мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкции технологического оборудования // Строительные и дорожные машины. – 2026. – Т. 70. – № 5. – С. 42–50.
6. *Суглобов В. В., Михеев В. А., Тищенко Е. В.* Определение геометрических параметров стрелы и хобота шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – № 22. – С. 177–182.
7. *Суглобов В. В., Ракша С. В., Ткачук Е. В.* Определение варьируемых конструктивных параметров уравновешивающих устройств портальных кранов // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 4 (76). – С. 89–100. – DOI: 10.15802/stp2018/140555.
8. *Ловейкин В. С., Ромасевич Ю. А., Стехно А. В.* Параметрическая оптимизация механизма изменения вылета груза башенного крана с балочной стрелой // Синергия. – 2017. – № 2. – С. 116–124.

9. *Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N.* Dynamics and Control of Cranes: A Review // Journal of Vibration and Control. – 2003. – Vol. 9. – No. 7. – P. 863–908. – DOI: 10.1177/1077546303009007007.
10. *Kovalenko V., Kovalenko O., Stryzhak V., Stryzhak M., Ruzmetov A.* Determination of Dynamic Forces in the Metal Structure of a Tower Crane Based on the Multi-mass Model // International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. – 2023. – No. 14. – P. 248–256. – DOI: 10.17683/ijomam/issue14.29.
11. *Tomasi I., Solazzi L.* Dynamic Analysis of an Offshore Knuckle-Boom Crane Under Different Load Applications Laws // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15. – No. 14. – Art. 8100. – DOI: 10.3390/app15148100.
12. *Gao B., Zhu Z., Zhao J., Huang B.* A Wireless Swing Angle Measurement Scheme Using Attitude Heading Reference System Sensing Units Based on Microelectromechanical Devices // Sensors. – 2014. – Vol. 14. – No. 12. – P. 22595–22610. – DOI: 10.3390/s141222595.
13. *Grosinger P., Rybář J., Dunaj Š., Ďuriš S., Hučko B.* A New Payload Swing Angle Sensing Device and Its Accuracy // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – No. 19. – Art. 6612. – DOI: 10.3390/s21196612.
14. *Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.-M.* Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2008. – Vol. 53. – No. 5. – P. 1203–1218. – DOI: 10.1109/TAC.2008.923738.

ANALYTICAL MODEL OF A PORTAL CRANE BOOM SYSTEM ACCOUNTING FOR HOIST ROPE DEVIATION FOR MONITORING SYSTEM DIGITAL TWIN

Maxim V. Pichugin
Ivan A. Vasiliev, Ph. D
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: pichugin_mv@spbstu.ru, vassilyev.ivan.iv@yandex.ru

Abstract. The paper presents an analytical model of the articulated boom system of a portal crane intended to operate within the digital twin of a technical condition monitoring system. Using the measured stroke of the luffing rack, the hoist rope tension and the rope deviation angle from the vertical, the model determines the positions of the links, including the links of the counterweight system, the forces in the tie rod, jib hinge and rack, and the bending moment in the boom section at the rack joint. It is shown that the influence of rope deviation on the loading of the boom and the luffing mechanism is expressed through the kinematic transfer functions of the jib head. Calculations for a scale model of the crane show that a rope deviation of 3° changes the rack force by 0.21–0.55 of the load weight, and in the middle part of the outreach range this increment exceeds the rack force component caused by the vertical load.

Keywords: portal crane; articulated boom system; digital twin; monitoring system; hoist rope deviation; kinematic transfer function; luffing mechanism.

УДК 629.3.02:62-515
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-706

РАЗРАБОТКА РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯЖЁЛЫХ ПОЛНОПРИВОДНЫХ МАШИН С НЕЗАВИСИМОЙ ПОДВЕСКОЙ КОЛЁС

Алексей Игоревич Васильев,
Александр Георгиевич Семенов, канд. техн. наук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: angel.777@mail.ru, 00.agent.007@mail.ru

Аннотация. Разработана и предложена оригинальная конструкция рулевого управления транспортного средства, преимущественно грузовых и других тяжёлых машин высокой проходимости с независимой подвеской колёс. Рулевое управление содержит рулевую колонку с рулём и валом, рулевой механизм и рулевой привод, как совокупность взаимосвязанных тяг, рычагов и шарниров, с гидроусилителем. Рулевой механизм установлен непосредственно на раме транспортного средства под рулевой колонкой, а рулевой вал идёт непосредственно в рулевой механизм. Достигается улучшение технико-эксплуатационные характеристики рулевого управления и машины в целом. Разработка имеет мировую новизну и признана изобретением.

Ключевые слова: автомобильный транспорт; тяжёлые машины; поворот; независимая подвеска колёс; рычажные механизмы.

1. Введение

Разработка *относится* к транспортному машиностроению, конкретно – к рулевому управлению колёсных транспортных средств (ТС). Основное назначение – для грузовых и др. тяжёлых машин с полным приводом и независимой подвеской колёс.

Рулевое управление колёсного ТС, как правило, содержит рулевую колонку с валом (слева ТС при левостороннем движении и справа – при правостороннем), рулевой механизм и рулевой привод, как совокупность взаимосвязанных тяг, рычагов и шарниров, предпочтительно с гидроусилителем (ГУ), с возможностью передачи усилия от руля с ГУ к управляемым колёсам и их дифференцированного поворота на заданные углы [1, 2]. Рулевые управления ТС с зависимой и независимой подвеской управляемых колёс имеют свои компоновочные особенности.

Специализированность рулевых приводов проявляется и в этом.

Примером устройства для ТС с независимой подвеской можно выставить рулевое управление для автомобилей с независимой подвеской управляемых колёс, описанное в источнике [3].

Близким аналогом можно считать рулевое управление ТС колёсного типа с независимой подвеской, содержащее рулевую колонку с валом, рулевой механизм и рулевой привод, как совокупность взаимосвязанных тяг, рычагов и шарниров, с рулевыми ГУ и возможностью передачи усилия от руля с ГУ к управляемым колёсам и их дифференцированного поворота на заданные углы [4].

Устройство разработано для тяжелого многоосного ТС с выраженным дифференцированием поворота колёс не только в пределах одного моста, но и всей многоосной схемы. Соответственно, и само устройство (от кинематической схемы до конструкции включительно) представляется избыточно сложным. Кроме того, кинематическая схема устройства недостаточно рациональна с позиций минимизации средств (цилиндров рулевого ГУ) для обеспечения достаточного усилия для поворота колёс. Дополнительно следует отметить наличие длинной цепочки звеньев от рулевой колонки до рулевого привода.

Представляют интерес и др. отечественные и зарубежные разработки [5 – 10]. Актуален ряд сведений из журнальных статей из перечня ВАК, опубликованных последние годы [11 – 13].

Наиболее близким по назначению и совокупности существенных признаков объектом сравнения (*прототипом*) является рулевое управление колёсного ТС («Рулевой привод транспортного средства с регулируемой кинематикой»), содержащее рулевую колонку с валом, рулевой механизм и рулевой привод, как совокупность взаимосвязанных тяг, рычагов и шарниров, с возможностью передачи усилия от руля к управляемым колёсам и их дифференцированного поворота на заданные углы [14].

Недостатки объекта сравнения:

во-первых, не приспособлен для установки на раме транспортного средства под рулевой колонкой, что имеет значение при независимой подвеске колёс;

во-вторых, рулевой вал (в рулевой колонке) нуждается в промежуточных звеньях к рулевому механизму;

в-третьих, не предусмотрено гидравлическое серводействие (рулевой ГУ или усилитель руля);

в-четвёртых, в условиях желательности реализации конструкторских принципов универсальности, взаимозаменяемости и модульности, концепция слабо адаптирована к этому.

По совокупности перечисленного, прототип имеет недостаточно удовлетворительные технико-эксплуатационные характеристики (ТЭХ).

Это обусловливает *проблему* и, соответственно, постановку *задачи* – разработать рулевое управление колёсного ТС, лишенное описанных недостатков, т.е. с удовлетворительными, лучшими ТЭХ, включая наличие гидравлического серводействия, возможность установки рулевого управления на раме ТС под рулевой колонкой, что имеет значение, в частности, при независимой подвеске колёс, отсутствие промежуточных звеньев между рулевым валом (в рулевой колонке) и рулевым механизмом, а также повышенный уровень универсальности, взаимозаменяемости и модульности концепции, в свете идеи универсального рулевого управления для ТС с зависимой и независимой подвесками колёс.

2. Результаты разработки и их анализ

2.1. Устройство

Рулевое управление содержит (см. рис. 1-3) рулевую колонку 2 с рулем 1 (рулевым колесом, «баранкой») и валом (2), рулевой механизм (2) и рулевой привод, как совокупность взаимосвязанных тяг (4, 6, 9, 11), рычагов (3, 5, 8, 10, 12) и шарниров, с рулевым ГУ 7. При этом предусмотрена возможность передачи усилия от руля 1 с рулевым ГУ 7 к управляемым колёсам $13_л$ и $13_п$ и их дифференцированного поворота на заданные углы $Ф_л$ и $Ф_п$ (см. рис. 3).

Рулевой механизм установлен непосредственно на раме ТС под рулевой колонкой 2 (см. рис.1). При этом рулевой вал (2) идет непосредственно в рулевой механизм.

Рулевой привод включает в себя (см. рис.1-3) последовательно связанные шарнирами сошку 3, боковую тягу 4, маятниковый изогнутый рычаг 5, поперечную тягу 6, маятниковый боковой фигурный рычаг 8, передний конец которого шарнирно связан со штоком гидроцилиндра 7 рулевого ГУ (7) с поперечным расположением, задний конец, посредством промежуточной тяги $11_п$, – с концом маятникового изогнутого рычага $12_п$ (в совокупности с полуосью) управляемого колеса 13 одного из бортов (здесь – правого $13_п$) ТС, а средняя часть, посредством поперечной тяги-перемычки 9, – со средней частью продольного изогнутого маятникового рычага 10,

промежуточной тягой $11_л$ и изогнутым маятниковым рычагом $12_л$ (в совокупности с полуосью) управляемого колеса 13 другого борта (здесь – левого 13 л) ТС, зеркально повторяющих, относительно продольной вертикальной плоскости ТС, описанную часть привода за шарнирным креплением маятникового бокового фигурного рычага 8 на раме ТС. С возможностью использования рулевого управления на ТС как с независимой, так и зависимой подвеской.

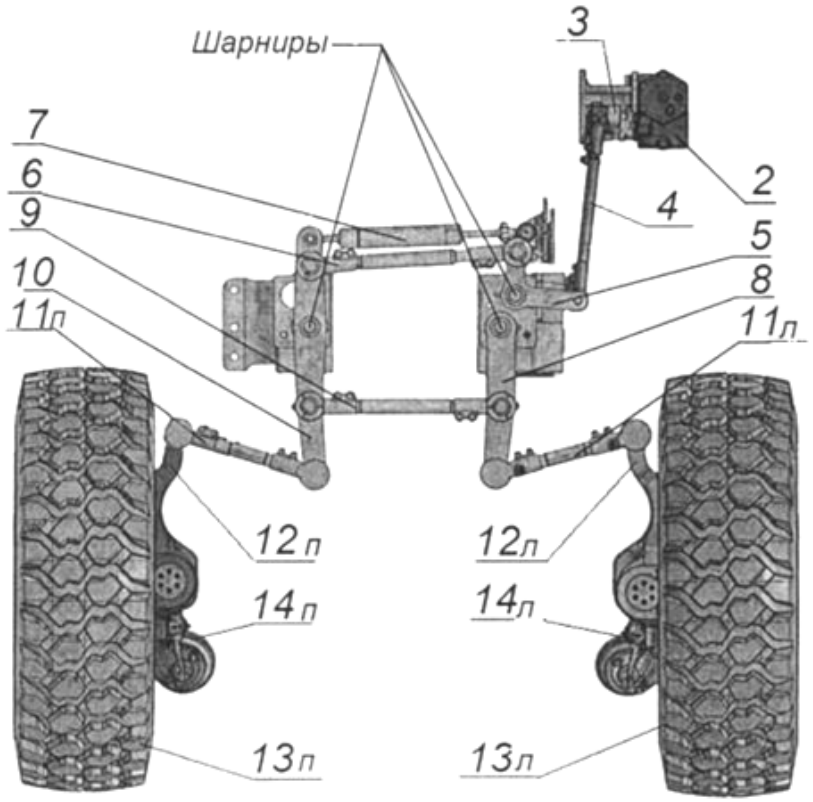


Рис. 1. 3*D*-изображение конструкции (пример) рулевого управления, смонтированного по модульной схеме непосредственно на раме ТС, в исходном положении (при нулевом угле поворота руля), вид снизу

Предусмотрены дополнительные конструктивные признаки устройства. Так, рулевые шарниры могут быть выполнены шаровыми (сферическими), как более надежными и долговечными в условиях перекосов в большой линейной цепи звеньев привода, а корпус (картер) рулевого механизма 2, шарниры рычагов и гидроцилиндр 7 могут быть установлены на раме транспортного средства посредством множественной перфорации продольных элементов рамы ТС. С возможностью подбора компонентов рулевого управления по модульному принципу, с реализацией широких возможностей принципа «конструктора».

2.2. Работа устройства

Монтаж устройства на раме ТС (продольных перфорированных элементах рамы) осуществляют, в зависимости от конкретных компонентов как модулей, по технологии «конструктор», посредством соответствующих отверстий упомянутой множественной перфорации, под рулевым механизмом под рамой (см. рис.1). «Конкретика» компонентов допускает и задействование узлов и деталей других ТС, включая машины с зависимой подвеской колёс.

В исходном положении (прямолинейное движение ТС) углы $\Phi_л$ и $\Phi_п = 0$ (см. рис. 2).

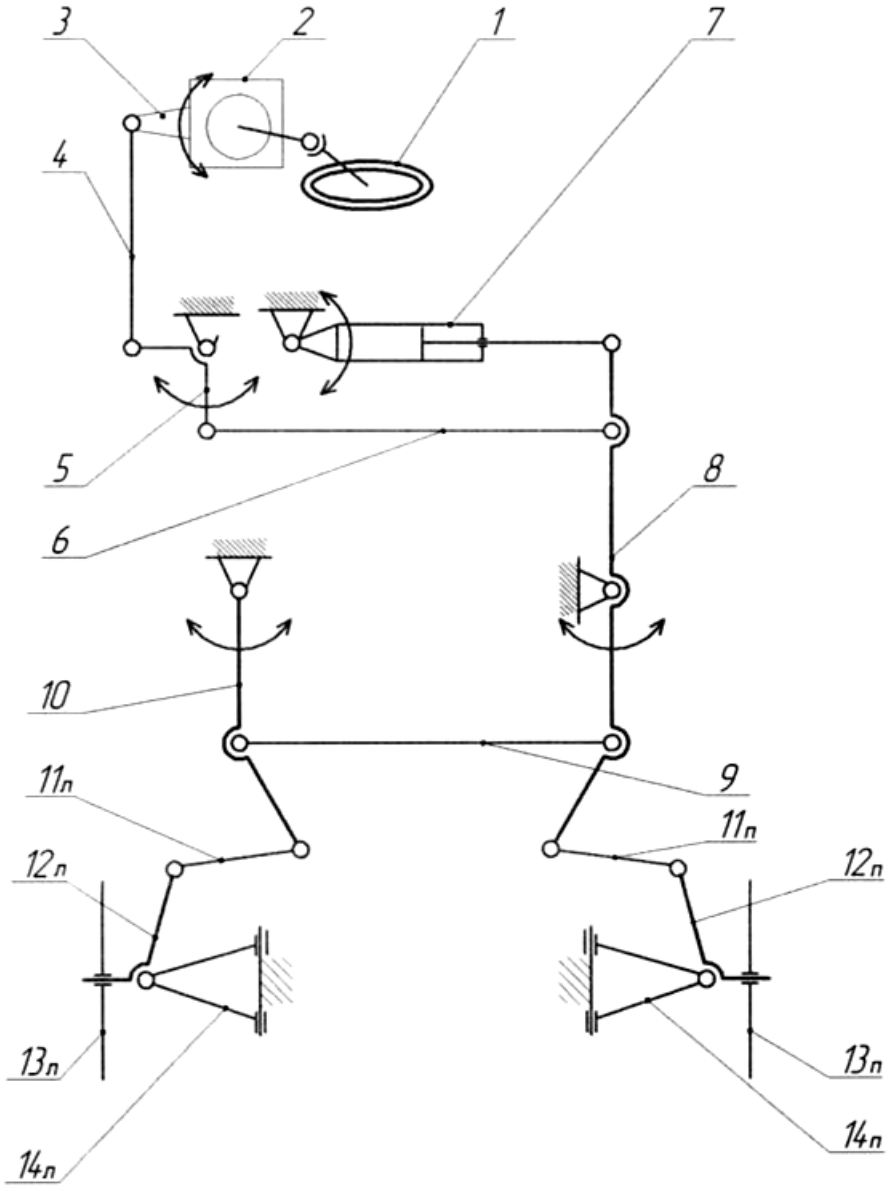


Рис. 2. Кинематическая схема рулевого управления (пример),
в исходном положении (при нулевом угле поворота руля), вид сверху

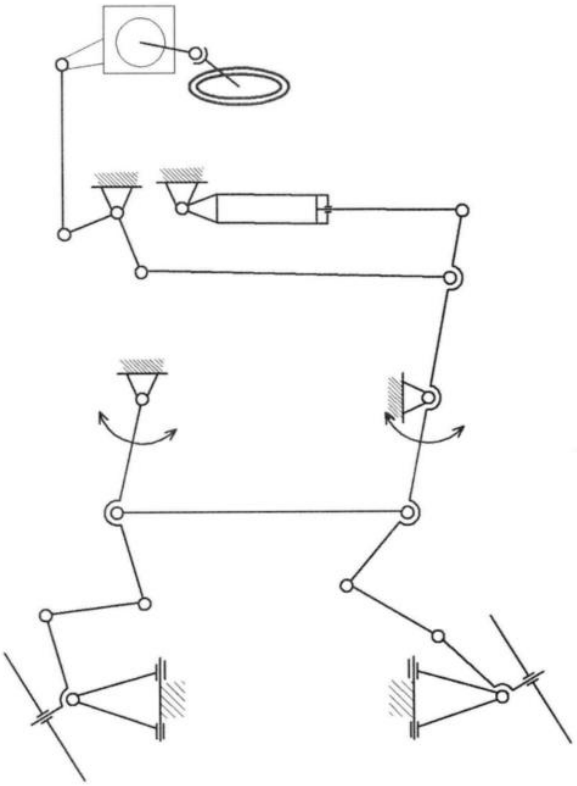


Рис. 3. Кинематическая схема рулевого управления (пример),
при повороте руля налево (при ненулевом угле поворота руля):
$Ф_л$ и $Ф_п$ – углы синхронного поворота соответственно
левого и правого поворотных колёс ТС при работе рулевого управления

Для поворота ТС, например, налево (см. рис. 3), руль (рулевое колесо) 1 поворачивают налево на необходимый угол (соответствующий потребным углам $Ф_л$ и $Ф_п$). Тогда, благодаря постоянной кинематической цепочки звеньев устройства (см. рис. 3), усилие передается очевидным образом, последовательно и в параллель по бортам ТС, всеми звеньями 2-11 на рычаги 12, которые уже непосредственно поворачивают (дифференцированно, за счёт подбора геометрических размеров и взаимного положения звеньев) управляемые колёса 14. При этом давлением масла в гидроцилиндре 7 шток дополнительно толкает, с усилием серводействия, передний шарнирный конец рычага 8, а от него и рычага 10 (один гидроцилиндр 7 на серводействия по обеим бортовым ветвям рулевого привода).

За счёт регулировки длин тяг 1, 2, 3 весь привод адаптируют под другие колёсные базы грузового ТС. При изменении длин тяг изменяются углы поворота внутреннего (($14_л$) и внешнего ($14_п$) колеса (см. рис. 3), обеспечивается необходимый угол Аккермана -– угол установки рулевых рычагов, при

котором в повороте обеспечивается необходимая разница в углах поворота передних колёс).

Использование предлагаемого устройства позволяет улучшить ТЭХ рулевого управление (и, соответственно, всего ТС).

В том числе:

- обеспечить возможность установки рулевого управления на раме ТС под рулевой колонкой, что имеет значение, в частности, при независимой подвеске колёс;

- исключить промежуточные звенья между рулевым валом (в рулевой колонке) и рулевым механизмом;

- организовать серводействие («усилитель руля») и использованием всего одного гидроцилиндра рулевого ГУ;

- повысить уровень универсальности, взаимозаменяемости и модульности концепции, в свете идеи универсального рулевого управления для ТС с зависимой и независимой подвесками колёс (в частности, компоненты рулевого управления ТС с зависимой подвеской могут быть «пересажены» на ТС с независимой подвеской.

Разработка признана изобретением и запатентована в России [15].

3. Заключение

Разработана и запатентована как изобретение и предложена к внедрению оригинальная конструкция рулевого управления. Рулевое управление содержит рулевую колонку с рулём и валом, рулевой механизм и рулевой привод, как совокупность взаимосвязанных тяг, рычагов и шарниров, с ГУ. Рулевой механизм установлен непосредственно на раме ТС под рулевой колонкой, а рулевой вал идёт непосредственно в рулевой механизм. Достигается улучшение ТЭХ рулевого управления и машины в целом.

Список использованных источников

1. Автомобиль: Основы конструкции/ Учебник для вузов / Н. Н. Вишняков и др.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1986. – 304 с.
2. *Раймпель Й.* Шасси автомобиля: Рулевое управление / Пер. с нем. В. Н. Пальянова; под ред. А. А. Гальбрейхера. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
3. Авт. свид. № 143670 A1 СССР (SU). МПК B62D 7/18, B62D 7/20. Рулевое управление для автомобилей с независимой подвеской управляемых колёс / Р. А. Акопян, К. М. Атоян, Э. Ф. Гомма. Приоритет 22.03.1961, заявка № 722852. Опубл. 00.00.1961.
4. Патент № 2634738 C2 Российская Федерация (RU). МПК B62D 3/14, B62D 5/06, B62D 7/00. Система рулевого управления и тяжёлое транспортное средство колёсного типа

с независимой подвеской. / Дин Хунган, Ван Джифан, Юньван Ма и др.; СЮЙЧЖОУ ХЭВИ МАШИНЕРИ КО, ЛТД (CN). Приоритет 20.05.2014, заявка № 2015141800. Опубл. 03.11.2017. Бюл. № 31.

5. Авт. свид. 1150141 A1 СССР (SU). МПК B62D 7/10, B60B 35/10. Рулевой привод транспортного средства с регулируемой колеёй / А. А. Артёменко, С. А. Артёменко; СЮЙЧЖОУ ХЭВИ МАШИНЕРИ КО, ЛТД. Приоритет 29.06.1983, заявка № 3611991. Опубл. 15.04.1985.
6. Патент № 2593776 C2 Российская Федерация (RU). МПК B62D 7/10. Компоновочная схема рулевого управления / Джозеф Бютнер, Люти Бёме; САФ-ХОЛЛАНД ГМБХ (DE). Приоритет 31.05.2013, заявка № 2014148252/11. Опубл. 10.08.2016. Бюл. № 22.
7. Патент № 2596061 C1 Российская Федерация (RU). МПК B62D 5/06, B62D 3/14, B62D 7/06, Следящая система рулевого управления многоосного автомобильного подъемного крана и многоосный автомобильный подъемный кран / Пейлэй Цао, Чжифан Ван, Гуангуан Цао и др.; СЮЙЧЖОУ ХЭВИ МАШИНЕРИ КО, ЛТД (CN). Приоритет 10.05.2013, заявка № 2015118345. Опубл. 27.08.2016. Бюл. № 24.
8. Патент № 1877846 U Германия (DE). B62D 7/08. Steering arrangement for tractors [Рулевое управление для тракторов] / THE FRANK G.HOUGH COMPANY. Приоритет 1960. Опубл. 14.08.1963.
9. Патент № 2900622 A1 Франция (FR). B62D 7/09. Motor vehicle with direction a cremaillere [Автомобиль, движущийся в направлении крематория] / Andre Rey; REY ANDRE. Приоритет 05.05.2006. Опубл. 09.11.2007.
10. Патент № 11958557 B2 США (US). B60B 35/1054. Bi-directional actuated shaft assembly with enhanced durability [Вал с двунаправленным приводом в сборе с повышенной прочностью] / BOMAG GMBH. Приоритет 09.04.2018. Опубл. 16.04.2024.
11. *Павлюк А. С., Сафронов С. В.* Влияние конструктивных параметров рулевого привода на поворот управляемых колес мобильной машины // Ползуновский вестник, 2013, № 4/3. – С. 181-184. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-konstruktivnyh-parametrov-rulevogo-privoda-na-povorot-upravlyaemyh-koles-mobilnoy-mashiny/viewer(дата обращения: 30.07.2026).
12. *Скрыпников А. В., Кондрашова Е. В., Скворцова Т. В., Токарев Д. Е., Лобанов Ю. В.* Исследование работы рулевых управлений с гидроусилителями // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6; URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=15267 (дата обращения: 30.07.2026).
13. *Терещенко Е. С., Мурог И. А., Фадеев Д. Ю., Шабалин Д. В.* К вопросу о повышении эффективности рулевого управления автомобилей многоцелевого назначения // Омский научный вестник. 2013, № 2 (12). – С. 120-122.
14. Авт. свид. № 1745595 A1, СССР (SU). МПК B62D 3/12. Рулевой привод транспортного средства с регулируемой кинематикой / Д.М. Уплисашвили, Т.Э. Такттакишвили, А.С. Отаров; Грузинский политехн. ин-т. – Приоритет 04.09.1989, заявка № 4734265. Опубл. 07.07.1992.
15. Патент № 2866410C1, Российская Федерация, МПК B62D 7/00, B62D9/00. Рулевое управление колёсного транспортного средства / Васильев А.И., Семенов А.Г., заявители – авторы. – Приоритет 10.04.2026, заявка № 2026111293. – Опубл. 20.07.2026, Бюл. №. 20.

DEVELOPMENT OF STEERING CONTROL OF HEAVY ALL-WHEEL-DRIVE MACHINES WITH INDEPENDENT WHEEL SUSPENSION

Alexey I. Vasiliev,
Alexander G. Semenov, Ph. D
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: angel.777@mail.ru, 00.agent.007@mail.ru

Abstract. A unique design for a vehicle steering system, primarily for trucks and other heavy off-road vehicles with independent wheel suspension, has been developed and proposed. The steering system comprises a steering column with a steering wheel and shaft, a steering gear, and a steering drive consisting of interconnected rods, levers, and hinges, all with a hydraulic booster. The steering gear is mounted directly on the vehicle frame beneath the steering column, and the steering shaft connects directly to the steering mechanism. This improves the performance characteristics of the steering system and the vehicle as a whole. The development is a global first and is recognized as an invention.

Keywords: automotive transport; heavy machinery; steering; independent wheel suspension; linkage mechanisms.

УДК 681.511.26+681.587.2
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-707

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СУДОВОГО КРАНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ КАЧКИ

Иван Андреевич Васильев, канд. техн. наук,
Лев Максимович Федоров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: vassilyev.ivan.iv@yandex.ru, red2142@yandex.ru

Аннотация. Выполнение грузоподъёмных и монтажных операций судовыми кранами в условиях морского волнения сопровождается качкой судна, создающей дополнительные динамические нагрузки и ограничивающей безопасность работ. Для исследования данной проблемы и возможных решений в виде систем компенсации качки разработана математическая модель судового крана и упрощённая система активной компенсации качки, выполненная в среде MATLAB Simulink. Результаты моделирования подтверждают эффективность и перспективность предложенного метода. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшей разработке и исследовании систем активной компенсации качки, а также при проектировании судовых грузоподъёмных комплексов, оснащаемых такими системами.

Ключевые слова: судовой кран; системы компенсации качки; математическая модель; грузоподъёмные операции; кинематический анализ; силовой анализ; геометрический анализ; симуляция работы грузоподъёмного крана.

1. Введение

Динамическое волнение моря вызывает качку судна, которая напрямую влияет на безопасность грузоподъёмных операциях в условиях морского волнения [1]. Так, актуальна не только проблема точного позиционирования груза, но и вопрос прочности отдельных металлических конструкций судового крана.

В соответствии с требованиями «Правил разработки и проведения морских операций» Российского морского регистра судоходства (РМРС) при анализе нагрузок, действующих при транспортировке грузов, требуется учитывать коэффициент динамичности DAF (Dynamic Amplification Factor). Данный коэффициент позволяет учесть дополнительные нагрузки, вызванные качкой судна, на котором установлена грузоподъёмная машина.

Так, например, согласно таблице 3.4.2. описываемого документа, при работе грузом массой 100 т. в море в воздухе краном, установленным на

крановом судне, при расчёте динамической нагрузки на крюк следует принимать коэффициент DAF равный 1,3. Следовательно, динамическая нагрузка, может быть получена как результат произведения параметра SHL (статическая нагрузка на крюк, которая определяется как сумма веса поднятого груза и веса оснастки) на динамический коэффициент DAF.

Согласно документу PMPC, коэффициент динамичности может быть пересчитан в частном случае, что особенно актуально если на судне используется система компенсации качки. Данные системы по принципу действия разделяются на три вида: пассивные, активные и комбинированные [2 – 6].

Так, шарнирно-сочлененный кран Liebherr RL-K 7500 является судовым грузоподъёмным устройством, в котором представлен механизм активной системы компенсации качки. Особенностью такого устройства является то, что компенсация осуществляется при помощи штатного механизма крана – лебёдки [7].

Более подробно представлены и проанализированы подобные системы в публикации [8]. Согласно данной работе, применение большинства рассмотренных систем компенсации качки, накладывает ряд конструктивно-габаритных условий и требований к судну, что ограничивает их внедрение по экономическим и эксплуатационным показателям.

На основе вышесказанного было принято решение рассмотреть необходимость проектирования такой системы, которая будет компенсировать морское волнение за счёт штатных механизмов крана, иметь минимальный коэффициент DAF и требовать такие необходимые мощности, которые могут обеспечить большинство уже имеющихся судовых гидравлических крановых систем. Для достижения данной цели необходимо создать математическую модель судового крана и алгоритм компенсации качки, в дальнейшем, внедрённый в математическую модель для оценки результата.

2. Исходные предпосылки и допущения

В данной работе приняты следующие допущения:

- Механизм поворота в анализах и математической модели не рассматривается;
- Показания предиктивной системы (совокупности акселерометров, гироскопов, а также блока преобразования) взяты как разброс случайной величины по нормальному закону на основе упрощенного уравнения движения волны.

Конструкция устройства судового крана с активной системой компенсацией качки. Ниже описаны основные элементы конструкции самого судового крана:

Механизм изменения вылета – система гидроцилиндров, позволяющие изменить вылет стрелы;

Механизм подъёма груза – гидравлическая лебёдка, для вертикального перемещения груза;

Собственно элементы активной системы компенсации качки:

Трёхосевой акселерометр – устройство, установленное в основании крана для считывания линейных ускорений;

Трёхосевой гироскоп – устройство, установленное в основании крана для считывания угловых скоростей;

Датчик натяжения каната – устройство, измеряющее натяжение каната и необходимое для получения обратной связи в виде определения действительного положения груза в трёх координатах;

Блок управления – устройство, обрабатывающее все входящие сигналы и управляющее приводом.

Аналитическая модель крана. Для построения математической модели крана, расчетная схема которого представлена на рис. 1, требуется аналитическое описание его геометрии, кинематических и силовых зависимостей.

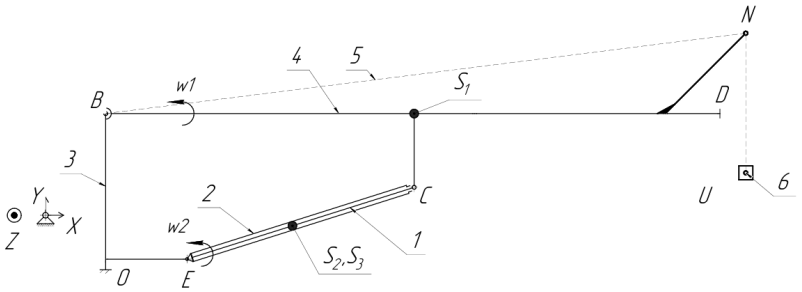


Рис. 1. Расчётная схема крана

1,2 – шток и гильза гидроцилиндра подъёма стрелы соответственно (отрезок EC); 3 – колонна крана (отрезок OB); 4 – Стрела (отрезок BD); 5 – Канат (отрезки BN и NU, пунктирная линия); 6 – груз (т. U); т. N – Блок; S1 – ц.м. стрелы; S2 и S3 – ц.м. штока и гильзы ГЦ соответственно.

В результате выполнения вышеописанных анализов были получены следующие результаты:

1. Координаты точки подвеса, полученные графическим методом (с помощью построенной аналитической схемы на рис. 1);

2. Зависимости кинематических параметров крана (скорости и ускорения элементов и узловых точек конструкции);

3. Зависимости силовых параметров крана (усилия в узловых точках и элементах конструкции).

Верификация полученных результатов проводилась сопоставлением их, при использовании разных методов. Так расхождения результатов геометрического анализа составляют менее 0,001 %, а расхождения кинематического и силового анализов менее 0,1 %.

3. Математическое моделирование конструкции крана

Математическое моделирование проводилось в среде MATLAB Simulink. Разработанная модель, представленная в виде блок-схемы, изображена на рис. 2.

Схема представляет собой систему управления крана с мониторингом необходимых значений (координаты, ускорения, коэффициент DAF и т. д.). В качестве исходных значений выступает масса поднимаемого груза (100 т.), а также все геометрические характеристики грузоподъёмного устройства.

Ниже представлено функции ключевых блоков схемы:

«Уравнение волны» – блок, на вход которого подаётся текущее время симуляции, а на выходе формируется гармонический сигнал высоты волны, имеющий запись:

$$y(t) = A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right),$$

где A – амплитуда волны, м (A = 3 м);

T – период, с (T = 10 с);

t – время симуляции, с.

Блоки «Управление подъёмом/опусканием стрелы/груза» выполняют роль управления скоростями приводов крана – грузовой лебёдкой и системой гидроцилиндров. Так, во время симуляции возможно в реальном времени изменять скорость того или иного элемента привода.

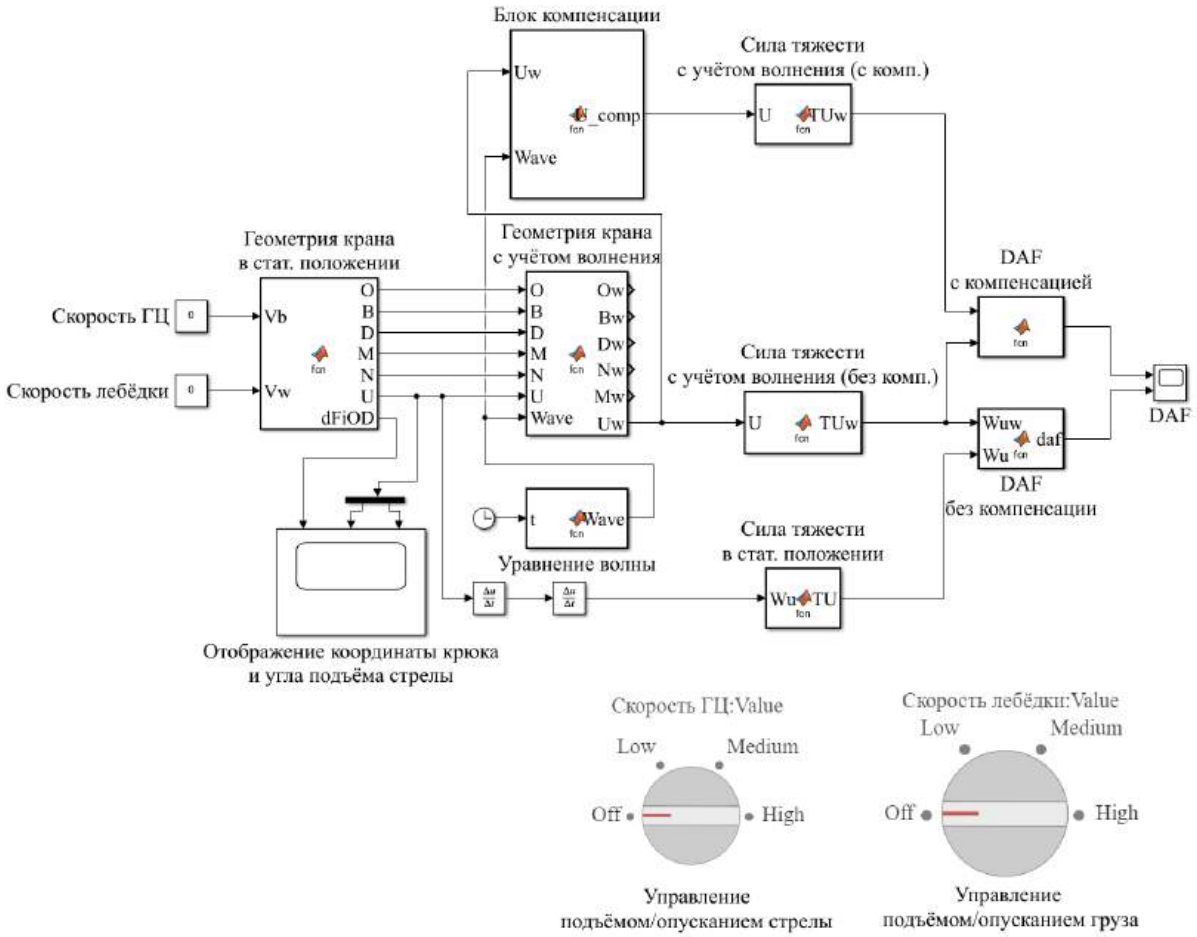


Рис. 2. Блок-схема, имитирующая работу крана
с возможностью мониторинга данных

«Геометрия крана в статическом положении» рассчитывает базовую кинематику в зависимости от входящих значений скоростей приводов. Его выходные координаты характерных точек крана, груза и угол наклона стрелы впоследствии используются и как эталон для сравнения, и как источник статической координаты груза для расчёта эталонной силы тяжести.

«Геометрия крана с учётом волнения» преобразует координаты крана с учётом морского волнения, получая на вход координаты крана в статическом положении и гармонический сигнал из блока «уравнение волны». Таким образом, координата груза изменяется по тому же закону, что и сама волна.

Центральным элементом системы является «блок компенсации», формирующий потребную скорость выдвижения гидроцилиндра стрелы. Внутри этого блока сигнал волны проходит через фильтр Калмана (см. рис. 3), устраняющий измерительный шум датчика, тем самым сглаживая и приближая полученные значения к показаниям реального явления [9, 10]. На рисунке синей линей изображено уже описанное уравнение движения волны,

линией зеленого цвета отображены «обработанные» данные с гироскопов и акселерометров, а линия фиолетового цвета отражает полученные данные, прошедшие через фильтр.

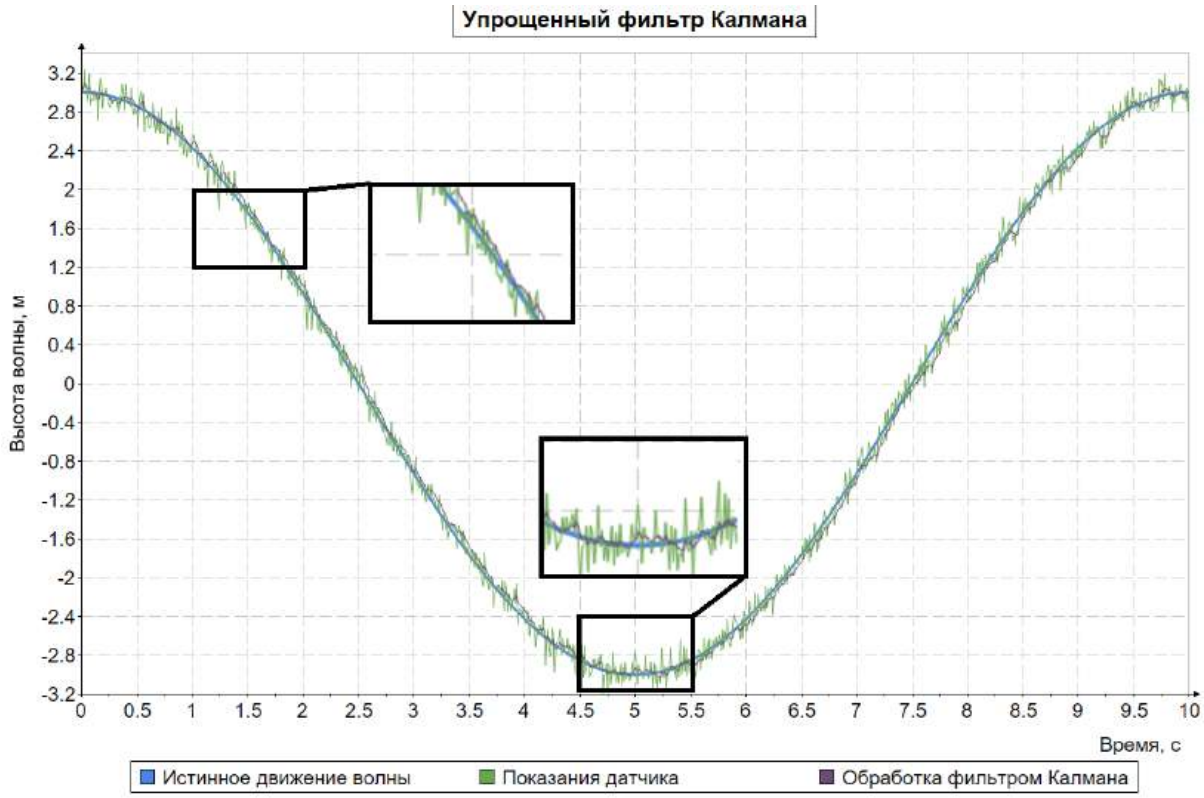


Рис. 3. Результат работы фильтра

После, в блоке компенсации, отфильтрованные значение сохраняются в буфере задержки. На основе сравнения текущего и задержанного значений формируется рассогласование, которое служит для формирования значения необходимой для выравнивания положения скорости гидроцилиндра.

Завершающим звеном модели являются блоки расчёта коэффициента динамического усиления «DAF с/без компенсации», вычисляющие отношение упрощенных динамических нагрузок к статическим отдельно для режимов с компенсацией и без неё.

Дополнительно в модели предусмотрены блоки визуализации, позволяющие отследить координаты груза и динамические коэффициенты в режиме настоящего времени во время симуляции.

Также, управление математической моделью возможно с помощью специального джойстика. Теоретически, если иметь всё необходимое оборудование для симуляции представляется возможным воссоздать работу оператора грузоподъёмного крана в условиях морского волнения.

4. Анализ результатов

На рис. 4 изображены два совмещенных графика коэффициента DAF.

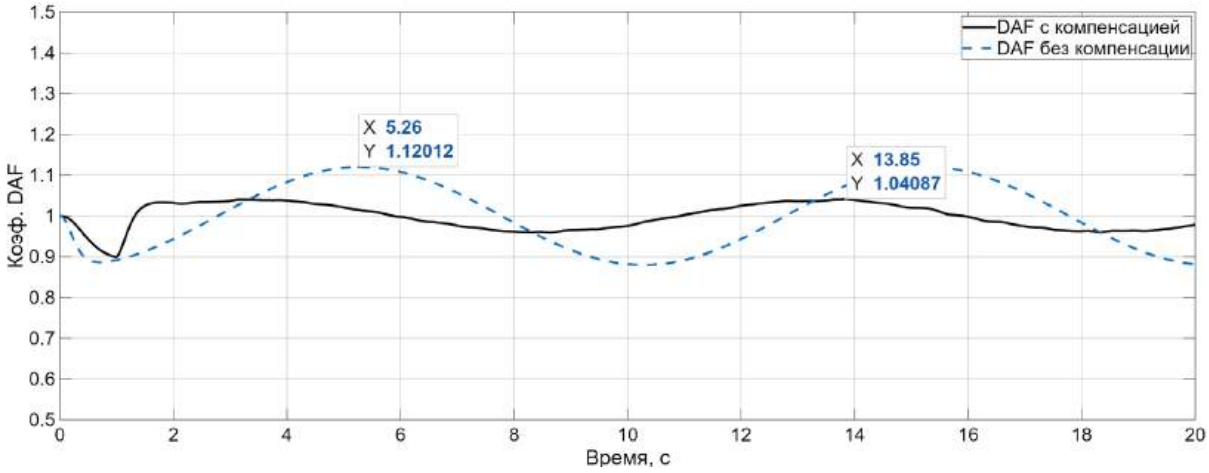


Рис. 4. Сравнение коэффициентов DAF

Можно заметить, что DAF без системы компенсации составляет 1,12, в то время как с внедрённой системой – 1,04. Данные значения говорят о следующем:

Во-первых, значение без учёта компенсации на 25 % меньше значения, рекомендованного нормативным документом PMPC (DAF = 1,3). Это отклонение подтверждает необходимость перерасчёта коэффициента.

Во-вторых, значение коэффициента с учётом системы на 7 % меньше, чем без системы, что говорит о повышении значения максимальной грузоподъёмности судового крана в условиях морского волнения.

5. Заключение

В работе рассмотрена проблема выполнения грузоподъёмных и монтажных операций судовыми кранами в условиях морского волнения. На основе анализа существующих решений и требований PMPC обоснована необходимость разработки системы компенсации качки, использующей штатные механизмы крана и обеспечивающей минимальный коэффициент динамичности.

Разработана математическая модель судового крана, включающая аналитическое описание геометрии, кинематических и силовых зависимостей его элементов. Погрешность геометрического анализа составила менее 0,001%, кинематического и силового менее 0,1 %. В среде MATLAB Simulink реализована упрощённая система управления крана и система активной компенсации качки.

Сравнение коэффициента динамичности DAF показало, что без компенсации его значение составляет 1,12, а с внедрённой системой – 1,04, что на 7 % снижает динамическую нагрузку и свидетельствует о повышении максимальной разрешённой грузоподъёмности крана в условиях волнения. Также, значение DAF без компенсации на 25 % ниже рекомендуемого нормативным документом PMPC, что подтверждает необходимость перерасчёта коэффициента.

Несмотря на принятые упрощения, полученные результаты подтверждают перспективность выбранного направления. Дальнейшая работа предполагает приближение модели к реальности: учёт механизма поворота, сил инерции, модернизацию алгоритма компенсации и решение пространственной задачи для полной оценки системы компенсации качки как средства точного позиционирования груза.

Список использованных источников

1. *Чижиумов С. Д.* Основы динамики судов на волнении : учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2010, 110 с.
2. *Большаков Д. Б., Косяков М. Д., Лыков Д. А.* Разработка инновационной адаптивной стабилизационной системы для морских судов на Северном морском пути в условиях экстремальных метеоусловий // Human Progress. 2024. Т. 10, № 11. С. 2. DOI: 10.46320/2073-4506-2024-11a-13.
3. Следящий привод стабилизации бортовой и килевой качки : пат. 2766552 Рос. Федерация. № 2021103322 ; заявл. 19.02.2020 ; опубл. 15.03.2022, Бюл. № 8. 3 с.
4. *Бурмистрова С. С., Савенков И. А.* Влияние системы стабилизации качки на безопасность и эффективность работы судов // Морские исследования на Дальнем Востоке — вопросы использования флота компании группы ПАО «Совкомфлот» : сб. докл. VI науч.-практ. конф., Владивосток, 23 нояб. 2023 г. Владивосток : Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2023. С. 113-117.
5. *Zhang Y., Shen W., Long Z., Zhang Y., Wang Z., Zhang Z., Zhu S., Stocchino A., Deng H., Zhu H.* Active Pendulation Control of Hoisting Systems of Ship-Mounted Cranes Under Ocean Wave Excitations: Principle and experimental study // Mechanical Systems and Signal Processing. 2025. Vol. 222. Article 111802. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111802.
6. *Chang Z., Zhang B., Li W., Ni P., Li J., Tang C., Zhang Y., Wang H.* Development of a marine 3-DOF folding jib crane for wave compensation // Journal of Mechanical Science and Technology. 2025. Vol. 39, № 4. P. 2223–2233. DOI: 10.1007/s12206-025-0343-x.
7. Глубоководные операции [Электронный ресурс] // Liebherr: сайт. URL: https://www.liebherr.com/ru-by/ (дата обращения: 17.09.2026).
8. *Федоров Л. М.* Обзор и оценка перспективных систем компенсации качки судовых кранов для строительства и снабжения оффшорных сооружений // Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании : сборник статей III

Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 14 ноября 2025 года. Брянск : РИСО БГУ, 2026. Т. 3. С. 283–289.
9. *Антонов Д. В.* Сравнительный анализ алгоритмов прогноза качки судна // Гироскопические системы на новых физических принципах для систем навигации и управления : сборник трудов семинара «Навигация и управление движением», Самара, 2020. С. 32–35.
10. *Лемешко О. В.* Фильтр Калмана. Теоретические основы и практическое применение // Вестник магистратуры. 2014. № 6 (33). Т. I. С. 5–8.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A SHIPBORNE CRANE FOR THE STUDY OF ACTIVE HEAVE COMPENSATION

Ivan A. Vasiliev, Ph. D,
Lev M. Fedorov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: vassilyev.ivan.iv@yandex.ru, red2142@yandex.ru

Abstract. Lifting and installation operations performed by ship cranes under sea wave conditions are accompanied by ship motions, which create additional dynamic loads and limit operational safety. To study this problem and possible solutions in the form of heave compensation systems, a mathematical model of a ship crane and a simplified active heave compensation system implemented in the MATLAB Simulink environment have been developed. Simulation results confirm the effectiveness and prospects of the proposed method. The obtained results can be used in further development and research of active heave compensation systems, as well as in the design of shipboard lifting complexes equipped with such systems.

Keywords: shipborne crane; heave compensation systems; mathematical model; lifting operations; kinematic analysis; force analysis; geometric analysis; crane operation simulation.

УДК 004.052.32+681.518.5
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-708

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ПОРТАЛЬНОГО КРАНА С ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННЫМ СТРЕЛОВЫМ УСТРОЙСТВОМ С КАЧАЮЩЕЙСЯ ОПОРОЙ ОТТЯЖКИ

Ростислав Валентинович Хабаров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: habaroffrostislav@yandex.ru

Аннотация. Предложено внедрение качающейся опоры оттяжки в конструкцию портального крана с шарнирно-сочлененным стреловым устройством. Представлены результаты исследования влияния на функциональные параметры работы стрелового устройства, показывающие снижение нагрузок при изменении вылета.

Ключевые слова: портальный кран; шарнирно-сочлененное стреловое устройство; система изменения вылета; качающаяся опора оттяжки.

1. Введение

Одним из основных направлений совершенствования портальных кранов является разработка рациональных конструкций стреловых устройств, обеспечивающих требуемые диапазоны изменения вылета и высоты подъема при минимальных габаритах и нагрузках на механизмы. Для шарнирно-сочлененных стреловых систем задача проектирования заключается в определении геометрических параметров звеньев и их взаимного положения с учетом заданных эксплуатационных характеристик. Существующие методы основаны на геометрическом и кинематическом синтезе, а также на определении силовых характеристик стрелового устройства [1 – 4]. В частности, разработаны методы синтеза по заданной траектории груза и определения рациональных параметров стрелы и хобота портального крана [1 – 3].

Дальнейшее развитие данных подходов связано с оптимизацией параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем. В качестве варьируемых параметров рассматриваются длины звеньев, координаты шарниров и положения элементов механизма изменения вылета, а критериями служат траектория движения груза, усилия в механизмах, масса конструкции и ее уравновешенность [4 – 8]. Для двухзвенных стреловых систем также учитывается упругая деформация элементов конструкции при выборе рациональных

параметров [5]. Оптимизация положения точки приложения тяги механизма изменения вылета позволяет дополнительно снизить возникающие в нем усилия [6].

Таким образом, существующие методы позволяют совершенствовать стреловые системы преимущественно путем изменения геометрических параметров звеньев и положения их неподвижных шарниров. Дополнительный резерв может быть связан с изменением кинематической структуры системы за счет введения подвижных элементов. В связи с этим представляет интерес применение качающейся опоры оттяжки, обеспечивающей дополнительную степень свободы при изменении положения звеньев стреловой системы.

Целью настоящей работы является исследование влияния качающейся опоры оттяжки на кинематические и силовые характеристики шарнирно-сочлененного стрелового устройства портального крана и определение возможности ее применения для совершенствования конструкции.

2. Результаты исследований

Для определения функциональных параметров системы изменения вылета при внедрении качающейся опоры оттяжки были построены две кинематические модели в среде Компас-3D.

Качание опоры оттяжки осуществляется за счет того, что она посредством шарнира крепится к устройству уравновешивания, которое было синтезировано для стандартной схемы и остается неизменным при работе модифицированного стрелового устройства. Первая модель создана на произвольном вылете R=33 м, координата конца оттяжки соответствует ее базовому положению. У второй модели на максимальном вылете координата конца оттяжки соответствует ее базовому положению. Осевые контуры полученных моделей представлены на рис. 1 (а, б).

Для каждой из схем были построены семь положений СУ со значениями вылета: $R_1 = R_{min}$ = 15 м; R_2 = 27,5 м; R_3 = 33 м; R_4 = 37,5 м; R_5 = 46 м; R_6 = 53,5 м; $R_7 = R_{max}$ = 60 м, которые представлены на рисунке 2.

Путем геометрических построений были определены вертикальные координаты груза согласно [9, 10]. Так же для определения грузового неуравновешенного момента были построены планы сил для каждого вылета, проведен силовой анализ согласно формуле:

$$M_q = N_q r_q, \quad (1)$$

где N_Q – усилие в шарнире стрела-хобот, создает относительно корня стрелы грузовой неуравновешенный момент на плече r_Q.

Сравнение графиков траектории движения груза и грузового неуравновешенного момента представлено на рисунках 3 и 4, где индексы *n* – базовая модель, *m* – первая модель, *mk* – вторая модель.

Продолжая силовой анализ, определим моменты, которые действуют на стрелу, от веса СУ, вызванные отклонение грузовых канатов от вертикали и от ветровой нагрузки.

Стреловой момент M_c веса стрелового устройства относительно оси качания стрелы определяется по формуле:

$$M_c = G_c r_c + P_x r_x, \qquad (2)$$

где r_c – плечо действия веса стрелы относительно корня стрелы, G_c – вес стрелы, P_x – вес хобота, r_x – плечо действия веса хобота относительно корня стрелы.

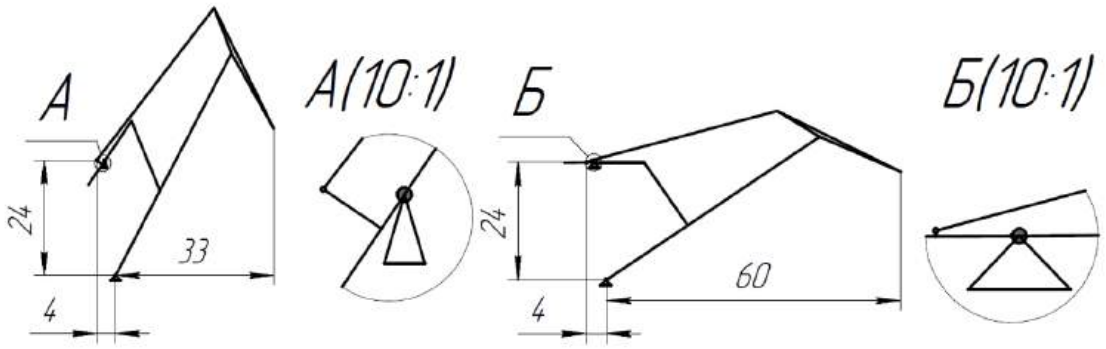


Рис. 1. Осевые контуры СУ, а – первой модели, б – второй модели

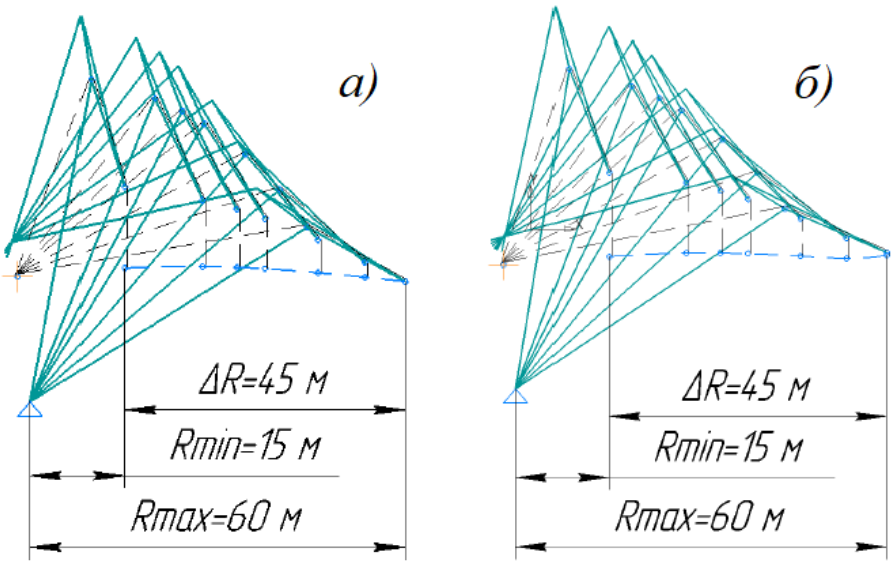


Рис. 2. Семь положений СУ (уравновешивающее устройство не показано):
а – первой модели, б – второй модели

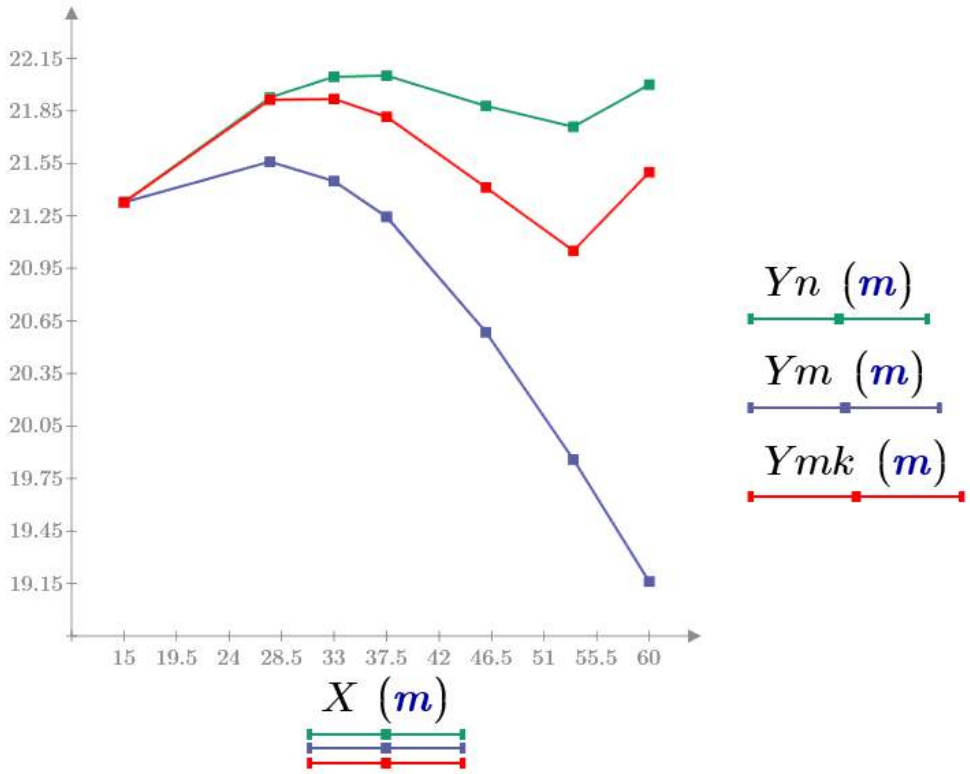


Рис. 3. Сравнительные графики траектории движения груза

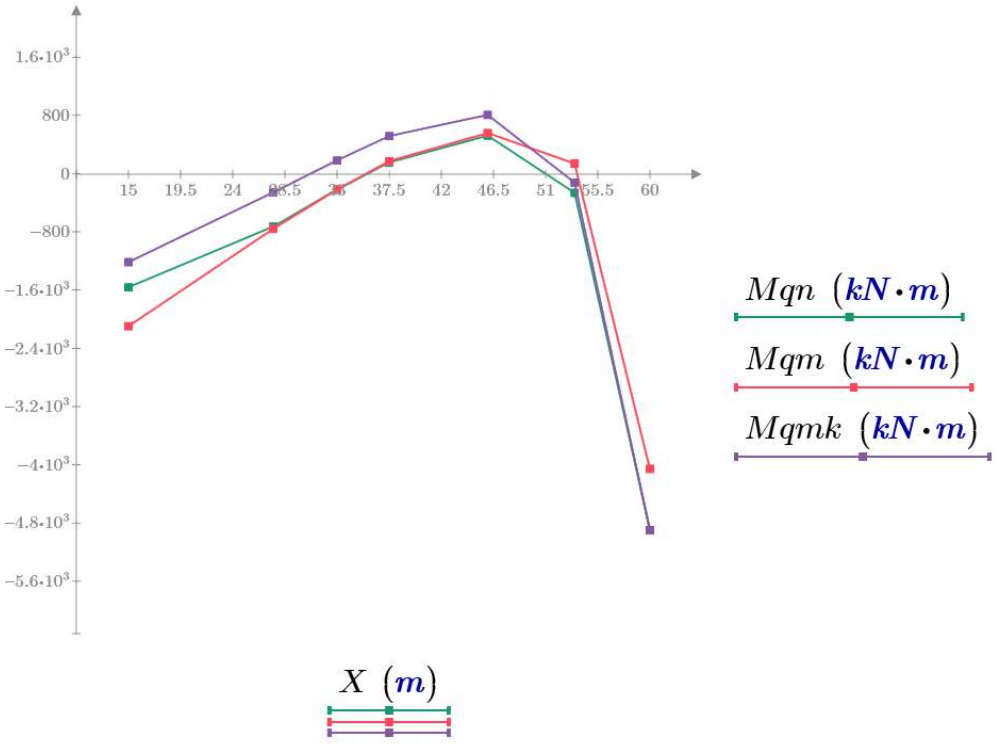


Рис. 4. Сравнительные графики грузового неуравновешенного момента

Момент относительно корня стрелы, возникающий из-за отклонения канатов от вертикали определяется по формуле:

$$M_{\alpha II} = P_{\alpha II} L_c, \qquad (3)$$

где $P_{\alpha II}$ – поперечная составляющая от результирующей силы, вызванной отклонением канатов, L_c – длина стрелы.

Момент от ветровой нагрузки определим по формуле:

$$M_B = M_{BГ} + M_{BX} + M_{BC}, \quad (4)$$

где $M_{BГ}$ – момент от ветровой нагрузки на груз с подвеской, M_{BX} – момент от ветровой нагрузки на хобот с учетом изменения наветренной площади, M_{BC} – момент от ветровой нагрузки на стрелу с учетом изменения наветренной площади и высоты приложения.

Сравнительные графики моментов относительно корня стрелы от весовой нагрузки СУ, нагрузки, вызванной отклонением грузовых канатов от вертикали, и ветровой нагрузки представлены на рисунках 4, 5 и 6.

В таблице представлены процентные различия значений грузовых неуравновешенных моментов, моментов от веса СУ, моментов, вызванных отклонением грузовых канатов от вертикали, и моментов, вызванных ветровой нагрузкой, для первой и второй модели по отношению к базовой.

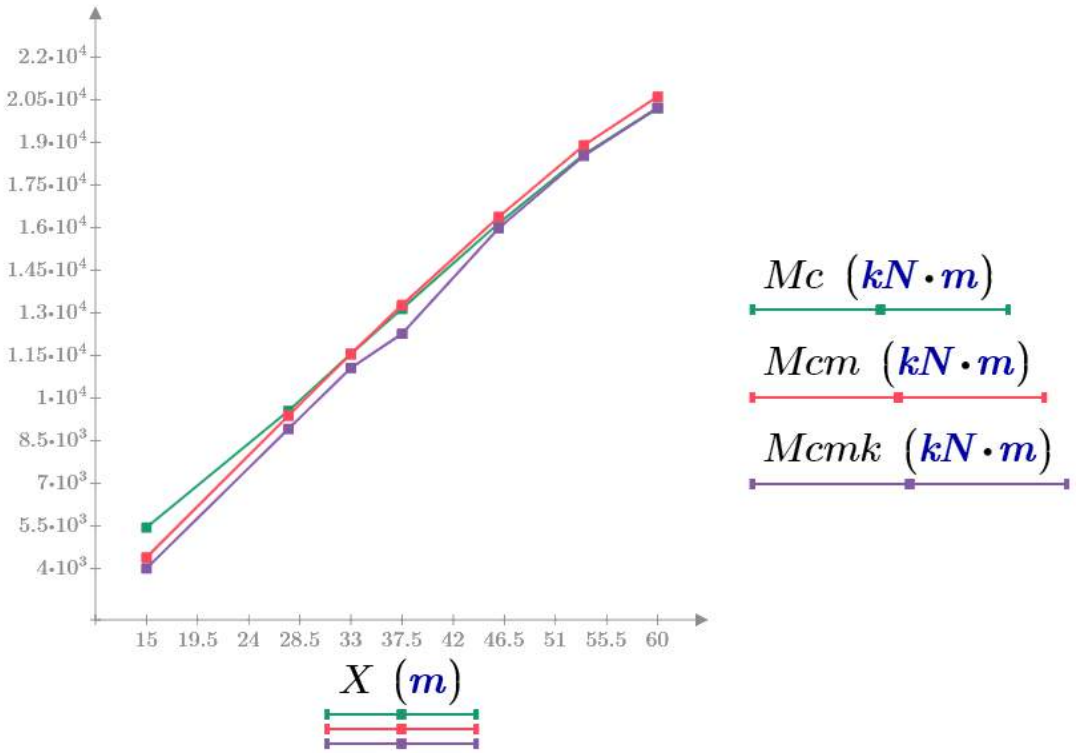


Рис. 5. Сравнительный график стреловых моментов

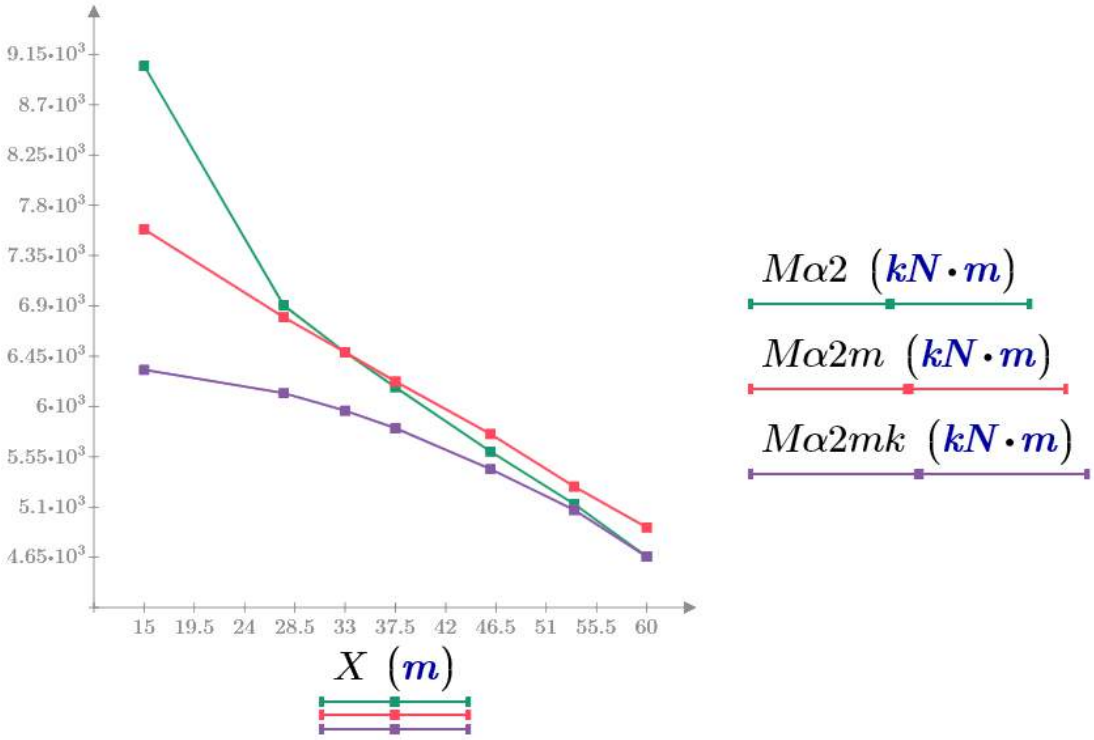


Рис. 6. Сравнительный график моментов, вызванных отклонением грузовых канатов от вертикали

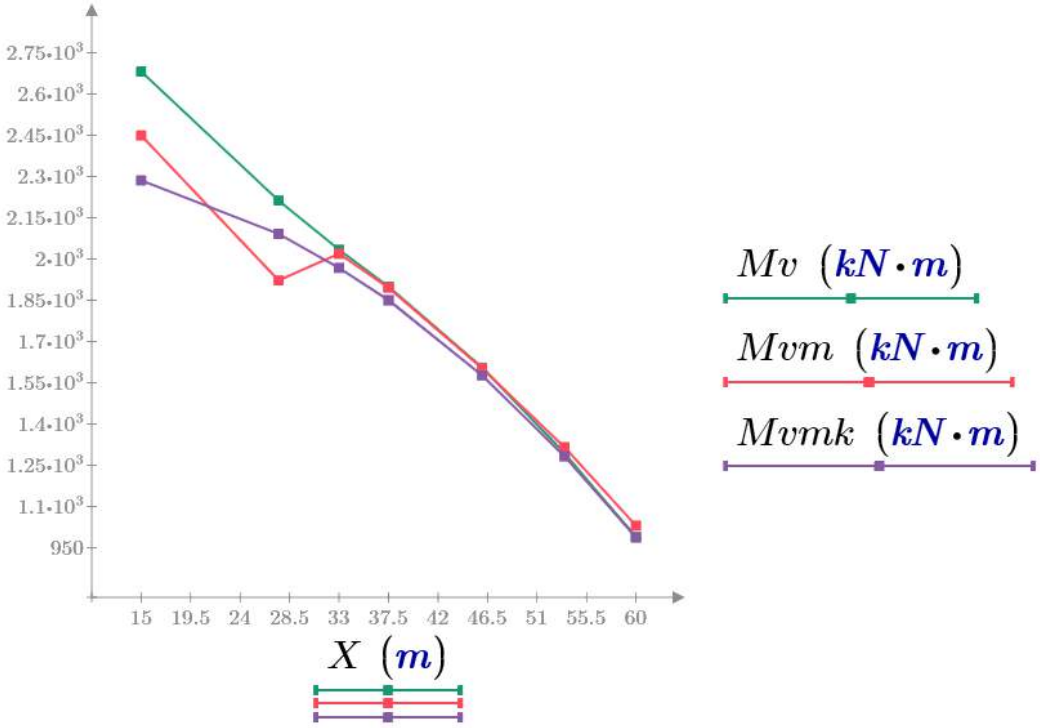


Рис. 7. Сравнительный график моментов, вызванных ветровой нагрузкой

Процентные различия моментов

Относительное отклонение момента, %	R_1 = 15 м	R_2 = 27,5 м	R_3 = 33 м	R_4 =37,5 м	R_5 = 46 м	R_6 =53,5 м	R_7 =60 м
δM_{Qm}, %	34,2	4,3	0	11,3	6,9	-152	-17,2
δM_{Qmk}, %	-22,1	-64,5	-182,4	237,3	54,7	-53,3	0
δM_{cm}, %	-19,3	-1,8	0	1	1,4	1,7	2
δM_{cmk}, %	-26,4	-6,7	-4,3	-6,7	-1,1	-0,3	0
δM_{am}, %	-16,2	-1,5	0	0,8	2,8	3,1	5,6
δM_{amk}, %	-30,1	-11,4	-8,1	-5,9	-2,8	-1	0
δM_{vm}, %	-8,7	-13,1	0	-0,2	-0,2	1,7	4,3
δM_{vmk}, %	-14,8	-5,5	-3,3	-2,6	-1,8	-0,9	0

3. Заключение

На основе исследования и расчетов можно сделать выводом о том, что внедрение качающейся опоры оттяжки, закрепленной шарнирно на противовесы, в систему изменения вылета портального крана с заданными геометрическими параметрами приводит к снижению нагрузок, действующих на стреловое устройство. Из двух рассматриваемых моделей лучшие результаты в плане снижения нагрузок предоставляет вторая модель с фиксированными характеристиками на максимальном вылете.

Внедрение качающейся опоры оттяжки представляет интерес с дальнейшим развитием математической модели с точки зрения снижения металлоемкости конструкций портальных кранов с шарнирно-сочлененным стреловым устройством, а также снижения потребной мощности механизма изменения вылета при условии оптимального расположения привода.

Список использованных источников

1. *Васильев И. А., Бортяков Д. Е.* Методика синтеза и исследования стрелового устройства с заданной траекторией груза // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 2. DOI: 10.18721/JEST.240215.
2. *Суглобов В. В., Михеев В. А., Тищенко Е. В.* Определение геометрических параметров стрелы и хобота шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана.
3. *Суглобов В. В., Ткачук Е. В.* Определение конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем портальных кранов // Наука и прогресс транспорта. 2017. № 1(67). С. 156–166. DOI: 10.15802/stp2017/92618.

4. *Суглобов В. В., Михеев В. А., Мисюра В. П., Кузьмин А. Н.* Основы автоматизированного синтеза и оптимизации конструкции шарнирно-сочлененных стреловых систем портальных кранов // Защита металлургических машин от поломок. 2009. № 11. С. 108–113.
5. *Yang Q., Qin Y., Fan C., Zhou S.* Luffer Track Optimization to Flexible System of Double Link Jib on Port Crane // Science Research. 2016. Vol. 4, No. 5. P. 107–111. DOI: 10.11648/j.sr.20160405.11.
6. *Jiao Q., Qin Y., Han Y., Gu J.* Modeling and Optimization of Pulling Point Position of Luffing Jib on Portal Crane // Mathematical Problems in Engineering. 2021. DOI: 10.1155/2021/4627257.
7. *Zhao Q., Tong S.-G., Zhong W., Ge J.-X.* Optimal design of luffing mechanism of portal crane based on genetic algorithm and finite element analysis // Journal of Zhejiang University (Engineering Science). 2015. Vol. 49, No. 5. P. 880–886. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2015.05.010.
8. *Раевский В. А., Носов В. А.* Геометрический синтез стрелы и переднего плеча хобота шарнирно сочлененных систем портальных кранов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №7-1.
9. *Бортяков Д. Е., Орлов А. Н.* Специальные грузоподъёмные машины. Портальные, судовые и плавучие краны: учеб. пособие / под ред. Проф. К. Д. Никитина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 160 с.
10. *Александров М. П., Гохберг М. М., Ковин А. А., Лебедев Н. В., Михайлов В. А., Нечаев В. П., Певзнер Л. М., Писарев В. Н., Руденко В. В., Соколов А. И., Шевченко В. С.* Справочник по кранам: в 2 т. Т. 2. Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов / под общ. ред. М. М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – 559 с.

INVESTIGATION OF THE FUNCTIONAL PARAMETERS OF A PORTAL CRANE WITH AN ARTICULATED JIB SYSTEM AND A GUY SUPPORT WITH A PIVOTING MOUNT

Rostislav V. Khabarov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: habaroffrostislav@yandex.ru

Abstract. The introduction of a pivoting guy support into the design of a portal crane with a hinged-linked jib system is proposed. The results of a study of its effect on the functional parameters of the jib system are presented, demonstrating a reduction in loads during changes in outreach.

Keywords: portal crane; hinged-linked jib system; outreach adjustment system; pivoting guy support.

УДК 681.3.16
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-709

ИНТЕГРИРОВАННАЯ БАЗА ДАННЫХ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Сергей Владимирович Мещеряков, д-р техн. наук,
Данил Евгеньевич Бортяков, канд. техн. наук,
Дима Арус,
Иван Сергеевич Мещеряков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: serg-phd@mail.ru, bortyakov@mail.ru, demaarous@gmail.com,
vano1399_1399@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены актуальные проблемы технического обслуживания промышленных транспортных систем, крановых путей, формирования ведомости дефектов по результатам замеров и их сохранения в базе данных. Накоплена статистика технических обследований и выявленных дефектов грузоподъемного оборудования за 15 лет на 94 промышленных предприятиях Северо-Западного Федерального округа и других регионов России и ближнего зарубежья. Результаты анализа позволили выявить повторяющиеся дефекты и выработать превентивные методы их устранения.

Ключевые слова: транспортные системы; подъемные краны; крановые пути; техническое обслуживание; база данных дефектов; интеграция.

1. Введение

Транспортные системы относятся к потенциально опасным промышленным объектам и регламентируются действующими ГОСТ и нормативными документами РФ. Учитывая их широкий спектр, техническое обслуживание (ТО) на транспорте является *актуальной* проблемой.

Объектом изучения является грузоподъемное оборудование разных типов, как наземного базирования, так и надземного подвесного. *Предметом* исследования и практической реализации выбраны программные средства MS Visual Studio, MS Office (Word, Excel), языки программирования C++ , VBA, объектно-реляционная база данных (БД) MS SQL. Это вызвано потребностью в совместимости программных продуктов на различных компьютерных платформах, начиная с версий MS Windows XP и MS Office 2003.

Первоочередной *целью работы* поставлено повышение продуктивности труда инженеров-экспертов и улучшение качества экспертных заключений.

Главной *научной новизной* является *интеграция* разрозненных БД в единую систему сбора и обработки информации для решения следующих основных *задач*:

1. Распределение объектов ТО по регионам, предприятиям и др.

2. Динамика проведения ТО по видам дефектов и их периодичности.

3. Анализ статистики ТО, повторяемости выявленных дефектов, наиболее слабых элементов кранов и оценка их остаточного ресурса.

2. Техническое обслуживание транспортных систем

ТО промышленных транспортных систем проводится с различной периодичностью в зависимости от срока эксплуатации (табл. 1) в соответствии с ГОСТ и руководящими правилами РФ:

1. РД 10-138-97. Комплексное обследование крановых путей грузоподъемных машин.

2. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы [1].

3. ГОСТ 26429-2018. Конструкции стальные путей подвесного транспорта. Технические условия.

4. Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения [2].

5. ГОСТ 35321-2025. Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые наземные. Общие технические требования.

6. Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации наземных крановых путей [3].

7. Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия [4].

Таблица 1. Сроки службы грузоподъемных кранов и периодичность ТО

Режим работы крана согласно Правилам безопасности [2]	**Периодичность ТО, лет [1]**					**Нормативный срок службы, лет [1]**
	первичного ТО	**повторных ТО**				
		1-го	**2-го**	**3-го**	**4-го**	
легкий, средний	3	2	2,5	2	1,5	10-16
тяжелый	2	2,5	2	1,5	–	8-10

Работа рассматривается как продолжение исследований, опубликованных в статьях [5 – 7]. Лично авторами создана интегрированная БД Cranroad

для инженерно-экспертного предприятия по обследованию подъемных сооружений АО Ратте [8, 9] и защищена патентами РФ [10, 11].

БД эксплуатируется как распределенная система на 94 промышленных предприятиях в удаленных регионах РФ и ближнего зарубежья (рис. 1). Согласно накопленной за 15 лет статистике в БД Cranroad, срок службы кранов в некоторых случаях истек (рис. 2), однако их дальнейшая эксплуатация допускается по результатам ТО и при условии соблюдения требований ГОСТ, указанных в ведомости дефектов. По результатам ТО, оборудование оценивается как исправное (18 % случаев), неисправное работоспособное (72 %) или неработоспособное (10 %).



Рис. 1. География обследованных предприятий РФ и ближнего зарубежья

В системе Cranroad поддерживаются следующие виды замеров нивелировок крановых путей, регламентированных нормами и правилами РФ:

– высотное положение направляющих (под нагрузкой и без нее);

– разность отметок направляющих на соседних колоннах (опорах);

– разность отметок направляющих в поперечном сечении (с учетом нагрузки и без нее);

– высотное положение балок (под нагрузкой и без нее);

– разность отметок балок на соседних колоннах (опорах);

– разность отметок балок в поперечном сечении;

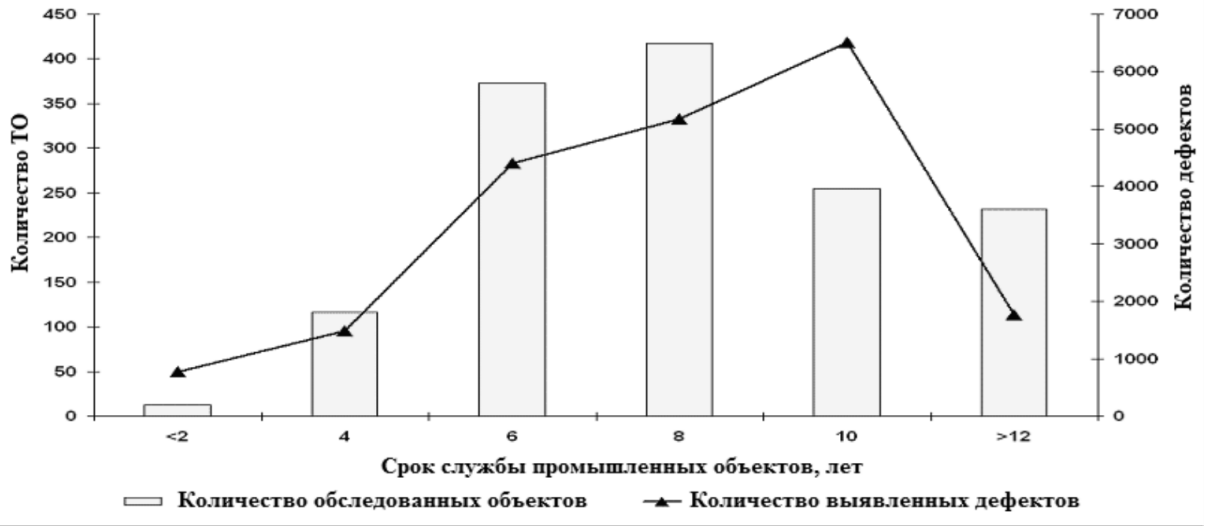


Рис. 2. Срок службы кранов и количество проведенных ТО и выявленных дефектов

– разность отметок направляющих на длине 10 м (с учетом нагрузки и без нее);

– величина упругой просадки направляющих и балок;

– отклонение направляющих в плане от прямой линии;

– отклонение колеи кранового пути;

– фактическое положение направляющих в плане;

– смещение направляющих с оси балки (эксцентриситет).

Предусмотрены справочники параметров кранового пути:

– типы крановых путей (мостовой, подвесной, башенный и др.);

– типоразмеры крановых рельсов (40х40, 50х50, 60х40, 60х60 и т.д.);

– режимы работы крана (легкий, средний, тяжелый и промежуточные);

– заводы-изготовители (как российские, так и зарубежные);

– типовые элементы крановых путей (колонны, направляющие, рельсы, подкрановые балки, стыковые скрепления, стропильные фермы, электроподвод, тормозные узлы, земляные уплотнения и прочего назначения);

– формулировки типовых дефектов (например, превышение предельно допустимых отклонений направляющих – см. таблицу 2 и рис. 3);

– заключения об устранении дефектов согласно ГОСТ (оставить без изменения, устранить при плановом ТО, устранить немедленно и др.);

– модели и номера измерительных приборов (нивелир, тахеометр);

– кадровый состав экспертов с копиями лицензионных удостоверений;

– прочие специфичные справочники, указанные в ГОСТ.

Для каждого вида замеров в ГОСТ регламентированы предельно допустимые отклонения. Последовательность ТО состоит в следующем:

1. Инженер-эксперт выезжает на объект и делает замеры крана.

2. По возвращении в офис результаты ТО обновляются в единую БД.

3. В программе Cranroad автоматически формируются отчеты замеров, дефектная ведомость, акт ТО и заключение о дальнейшей эксплуатации.

Например, на рис. 3 видно, что в точках 3-10 замеров высотного положения направляющих по обеим осям А и Б отклонение превышает пределы допуска ±20 мм, что является критическим замечанием и требует немедленного устранения (таблица 2). В отчетной таблице Excel такие замеры выделяются другим цветом.

Таблица 2. Выявленные за 15 лет типовые дефекты кранов и сроки их устранения

Элемент крана	Типовые дефекты	Срок устранения	Всего дефектов
Путевое оборудование	Нарушение норм и правил промышленной безопасности (тупиковые упоры).	Очередное плановое ТО	3589
Узлы крепления	Отсутствие фиксации болтов 2 от само-отвинчивания (узел крепления).	Оставить без изменения	2980
Направляющие	Превышение предельно допустимых отклонений ±20 мм (высотного положения).	Устранить немедленно	2460

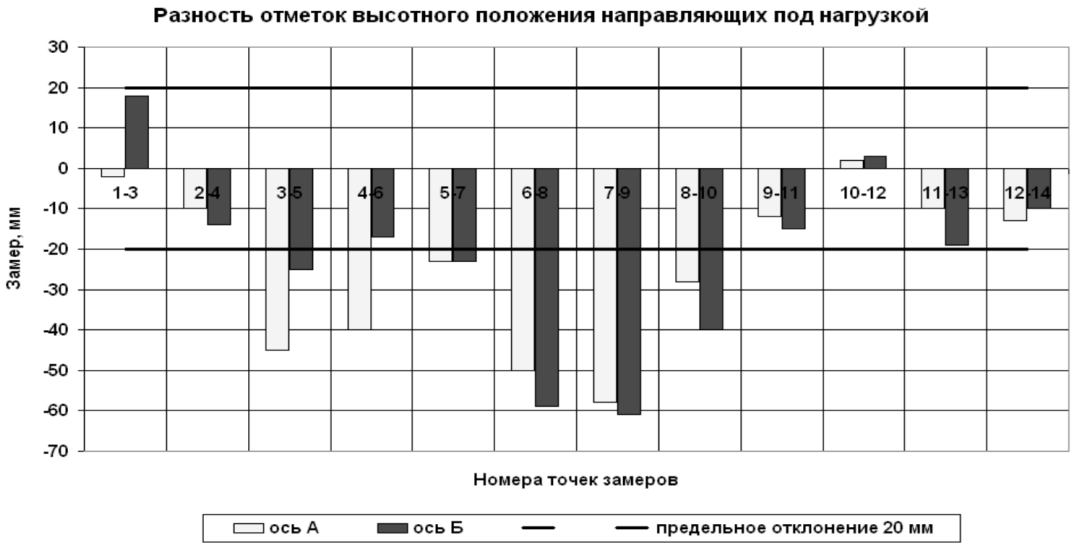


Рис. 3. Пример диаграммы Excel замеров высотного положения направляющих

3. Программная реализация интегрированной БД Cranroad

Интегрированная БД дефектов концентрирует разрозненные данные ТО с удаленных промышленных предприятий (рис. 1) в единую информационную систему. Структура БД программно реализована по объектно-иерархическому принципу (рис. 4), где агрегация объектов *O* с ключевыми параметрами *P* представлена в плоскости листа, а их обобщение в классы *C* –

перпендикулярно. Возможно добавление в структуру новых объектов, их классов и параметров (атрибутов).

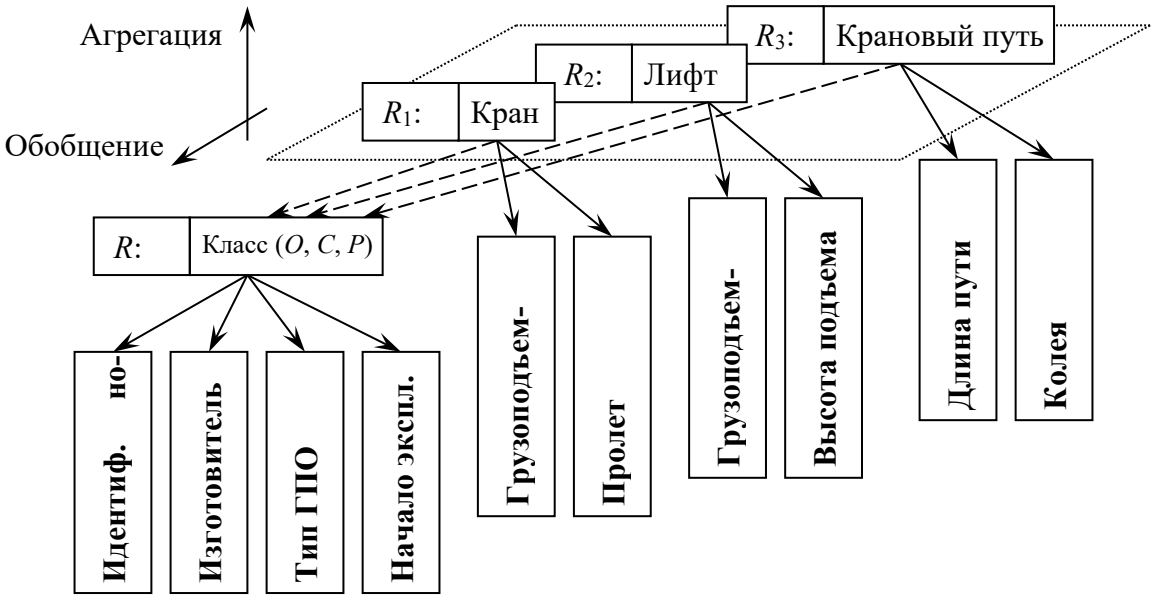


Рис. 4. Иерархическая структура множества объектов *O*, их классов *C* и параметров *P*

Каждый класс *C* объектов *O* описывается своим набором параметров *P*, так что структура БД после интеграции получается гетерогенной. Множество объектов *O*, принадлежащих какому то одному классу *C* с ключевыми параметрами *P*, например крановых путей, можно получить математически

$$R\,[O, C, P] = \{R_1 \cup R_2 \cap R_3\} \quad (1)$$

и с помощью SQL кода в БД, включая описания дефектов кранов:

```
select distinct p.cr_num, p.cr_date, u.unit_name, d.unit_def from pasport p
  where p.cr_num in (select d.cr_num from defect d where d.unit_num in
    (select u.unit_num from u.units u where u.unit_name = "Крановый путь"))
order by p.cr_num, p.cr_date, u.unit_name, d.unit_def
```
(2)

Обобщенная структура интегрированной БД Cranroad (рис. 5) состоит из следующих основных таблиц объектно-реляционного типа:

– паспортные данные, номер и тип крана, место расположения, режим работы и другие характеристики кранового пути (pasport);

– заводы-изготовители кранового оборудования и объекты ТО (zavod);

– сведения об экспертах с лицензионными удостоверениями (komiss);

– составные элементы кранов (units) и описания их дефектов, в том числе типовых часто встречающихся (defect);

– режимы работы крана согласно Правилам [2] (regimes);

– акты ТО, включая даты проведенного и следующего ТО, ссылки на элементы кранов и описания их дефектов, текст заключения экспертной комиссии по шаблону MS Word (act).

Распределение потоков данных БД Cranroad и передача документов ТО показаны на схеме рис. 6 в направлении стрелок. Учитываются внеплановые отказы, текущие ТО и перспективные ремонтные мероприятия.

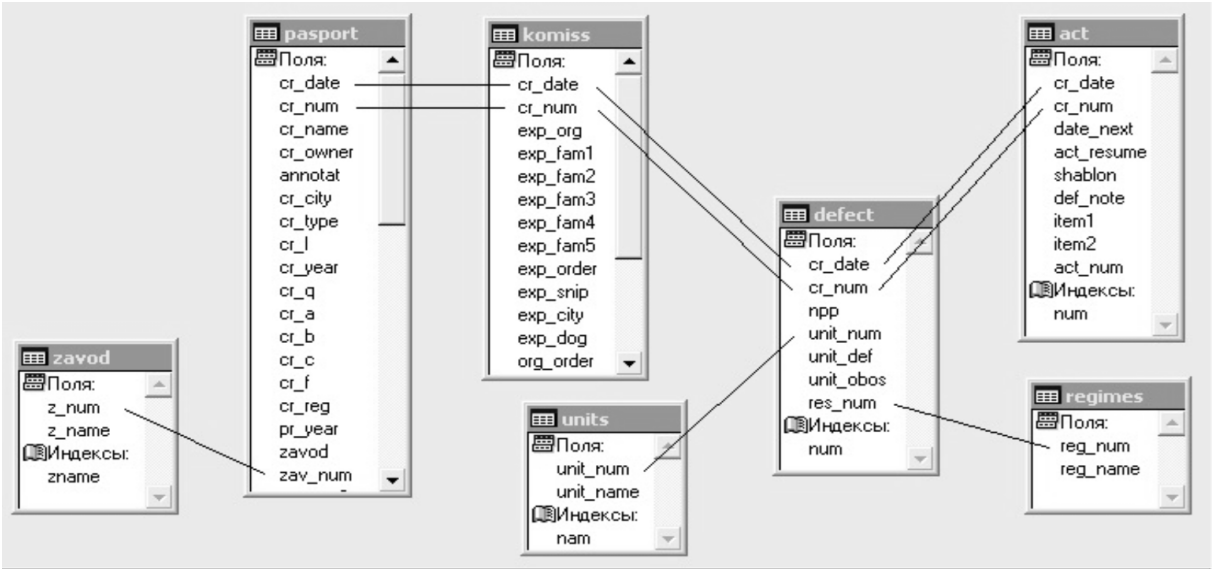


Рис. 5. Обобщенная структура интегрированной БД Cranroad



Рис. 6. Структура и направления потоков данных БД Cranroad

Отличительной особенностью БД Cranroad является автоматическое формирование отчетов по результатам замеров на основе шаблонов MS Word и MS Excel с кодами VBA в форме таблиц и графиков (например, рис. 3). При открытии шаблона из программы Cranroad автоматически выполняется код VBA с SQL запросом к БД через стандартный механизм ODBC. Шаблон заполняется данными из БД, форматируется и возвращается в

программу в виде готового отчетного документа по схеме рис. 7. Пример фрагмента кода VBA для таблицы высотного положения направляющих крановых путей в MS Excel:

```
Sheets("Таблица").Select
Application.ScreenUpdating = True                                    (3)
Application.Goto Reference:="Таблица!Высотное_положение"
```

Обмен данными полностью автоматизирован, что позволило достичь главной цели – повысить продуктивность труда экспертов и улучшить качество экспертных заключений.

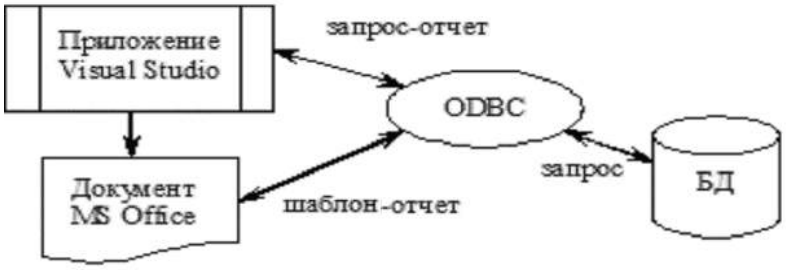


Рис. 7. Схема получения выборки данных из БД для отчета в MS Office

Практическая реализация и промышленное внедрение работы выполнены совместно в университетах и на предприятиях:

1. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ, Санкт-Петербург).

2. Нефтеперерабатывающий завод Киришинефтеоргсинтез (г. Кириши Ленобласти), самый крупный на северо-западе и второй в России.

3. ИТ организация ООО «Наука, технология, информатика, контроль» (Санкт-Петербург).

4. Инженерно-экспертное предприятие по обследованию подъемных сооружений АО Ратте, Санкт-Петербург.

5. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ, Санкт-Петербург).

4. Заключение

Главным *достоинством* Cranroad по сравнению с другими является *интеграция* данных ТО на разрозненных предприятиях (рис. 1) в единую систему сбора и анализа информации по новой технологии [12]. Проанализирована статистика дефектов кранов на основе 15-летней практики промышленной эксплуатации на 94 предприятиях РФ и ближнего зарубежья.

Практическая значимость предложенных программных решений и полученных результатов состоит в использовании интегрированной БД Cranroad для выявления «хронических» неисправностей, их причин, предотвращения внеплановых отказов и продления срока службы кранов.

Система Cranroad и созданная БД не стоят на месте и постоянно развиваются. *Перспективными направлениями* работы рассматриваются:

1. Распространение БД Cranroad на другие регионы РФ и транспортные предприятия.

2. Добавление функции прогнозирования остаточного ресурса кранов.

Список использованных источников

1. *Галетин В. М., Голев С. П., Жуков В. Г., Инденбаум А. И., Котельников В. С.* Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. – М.: Изд-во «Истек», 2000. – 138 с.
2. Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения. – Приказ Ростехнадзора №461 от 26.11.2020.
3. *Банных Г. М., Жуков В. Г., Кудряшов Л. Р.* Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации наземных крановых путей. – М.: НПЦ «Путь К», 2005. – 176 с.
4. Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 49 с.
5. *Чалей И. В., Иванов В. М.* Автоматизированный учет состояния технологического оборудования // НТВ СПбГТУ. – 2003. – №2(32). – С. 117-125.
6. *Чалей И. В., Лисицын Н. В.* Информационно-управляющая система // Свидетельство на полезную модель №20796 Росагентства по патентам. – Бюл. №19, 2001. – 1 с.
7. *Мещеряков С. В., Иванов В. М., Бортяков Д. Е*. Анализ эксплуатационных дефектов грузоподъемного оборудования в системе автоматизированного проектирования // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2011. – № 6, Т. 2. – С. 95-102.
8. Инженерно-экспертное предприятие АО Ратте. Лицензия ФСЭТАН №00-ДЭ-001467 от 18.07.2003 г. – 3 с.
9. *Бортяков Д. Е., Мещеряков С. В., Солодилова Н. А.* Обеспечение качества автоматизированного проектирования технологических систем на основе распределенной базы данных эксплуатационных дефектов // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2013. – № 4(176). – С. 87-95.
10. *Мещеряков С. В., Бортяков Д. Е., Арус Д., Мещеряков И. С., Буйневич М. В., Израилов К. Е.* Программа комплексного обследования и мониторинга технологических комплексов наземного базирования // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2024688791. – СПб.: СПбГУТ, 2024.– 1 с.
11. *Мещеряков С. В., Бортяков Д. Е., Арус Д., Мещеряков И. С., Буйневич М. В., Израилов К. Е.* База данных для комплексного обследования и мониторинга

технологических комплексов наземного базирования // Свидетельство о государственной регистрации базы данных RU2024625878. – СПб.: СПбГУТ, 2024.
12. *Volkov A. N., Efimov V. V., Shchemelinin D. A.* Integrated Data Model for Managing a Multi-Service Dynamic Infrastructure // Computer Modeling and Simulation: Proc. of Int. Sci.-Tech. Conf. – SPB: Polytechnic University Publishing House, 2014. – pp. 168-169.

INTEGRATED DATABASE FOR TECHNICAL SUPPORT OF INDUSTRIAL TRANSPORT SYSTEMS

Sergey V. Mescheryakov, D. Sc.,
Danil E. Bortyakov, Ph. D.,
Dima Arous,
Ivan S. Mescheryakov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: serg-phd@mail.ru, bortyakov@mail.ru, demaarous@gmail.com, vano1399_1399@mail.ru

Abstract. Actual problems of technical support are considered in regard to industrial transport systems, crane ways, defects measuring, documenting and storing into a database. The 15 years defects statistics is collected for lifting machines from 94 industrial enterprises of the North-West regions of Russia and the near abroad. Analysis of the results allowed figuring out the repeatable issues and work out the preventive methods for their fixing.

Keywords: Transport Systems; Lifting Cranes; Crane Ways; Technical Support; Defects Database; Integration.

Новые материалы
и технологии
для транспортных систем

УДК 669.14.017.3:620.17:519.23
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-710

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ HC260LA: СТАТИСТИЧЕСКИЙ И РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

Марина Анатольевна Рябикина, канд. техн. наук,
Виктор Иванович Бурлаков, канд. техн. наук,
Галина Юрьевна Бурлакова, канд. техн. наук
«Приазовский государственный технический университет» – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Россия, 287642, Донецкая Народная Республика, Мариуполь,
улица Университетская, 7
E-mail: maryna.ryabikina@mail.ru, burlakovviktor3196@mail.ru, burlakovagu@yandex.ru

Аннотация. Холоднокатаная высокопрочная низколегированная сталь HC260LA широко применяется в автомобилестроении благодаря своей превосходной формуемости и свариваемости. В настоящей работе на основе данных химического анализа и результатов механических испытаний 36 опытных плавок исследована вариабельность содержания легирующих элементов и их влияние на предел текучести, прочности и относительное удлинение. Построены регрессионные зависимости и определены коэффициенты корреляции между концентрацией элементов и свойствами стали. Показано, что механические характеристики HC260LA в исследуемом массиве данных удовлетворяют требованиям EN 10268, а ключевыми факторами, влияющими на свойства, являются концентрации марганца, серы и титана. Установлено, что оптимизация содержания легирующих элементов позволяет стабилизировать механические свойства и повысить штампуемость стали.

Ключевые слова: сталь; химический состав; предел текучести; относительное удлинение; регрессия.

1. Введение

Сталь марки HC260LA относится к классу низкоуглеродистых конструкционных сталей повышенной прочности и применяется в автомобилестроении для изготовления внутренних штампованных деталей кузова, рис. 1. Сталь используется такими автоконцернами, как Volkswagen, BMW, Ford, Toyota, Renault–Nissan, Hyundai–Kia. Для классификации сталей используется предел текучести в диапазоне 260-420 МПа. Например, марка HC260LA в соответствии с EN 10268 обозначает высокопрочную низколегированную

сталь с минимальным пределом текучести 260 МПа. Эти стали обычно раскисляют Al и легируют Nb, V и Ti [1 – 3]. Для обеспечения стабильности свойств необходимо контролировать не только содержание легирующих элементов, но и параметры технологического процесса, рис. 2. Для производства сталей применяют два процесса отжига: непрерывный и периодический [4]. Опытная партия холоднокатаных листов подвергалась периодическому отжигу в колпаковых печах при 670 °С, циклы нагрева, выдержки и охлаждения суммарно составили примерно 20 ч.

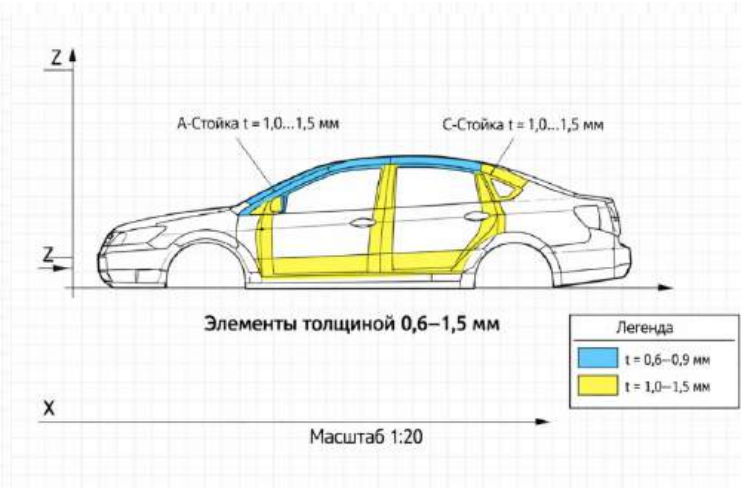


Рис. 1. Элементы конструкции автомобиля, выполняемые из стали HC260LA

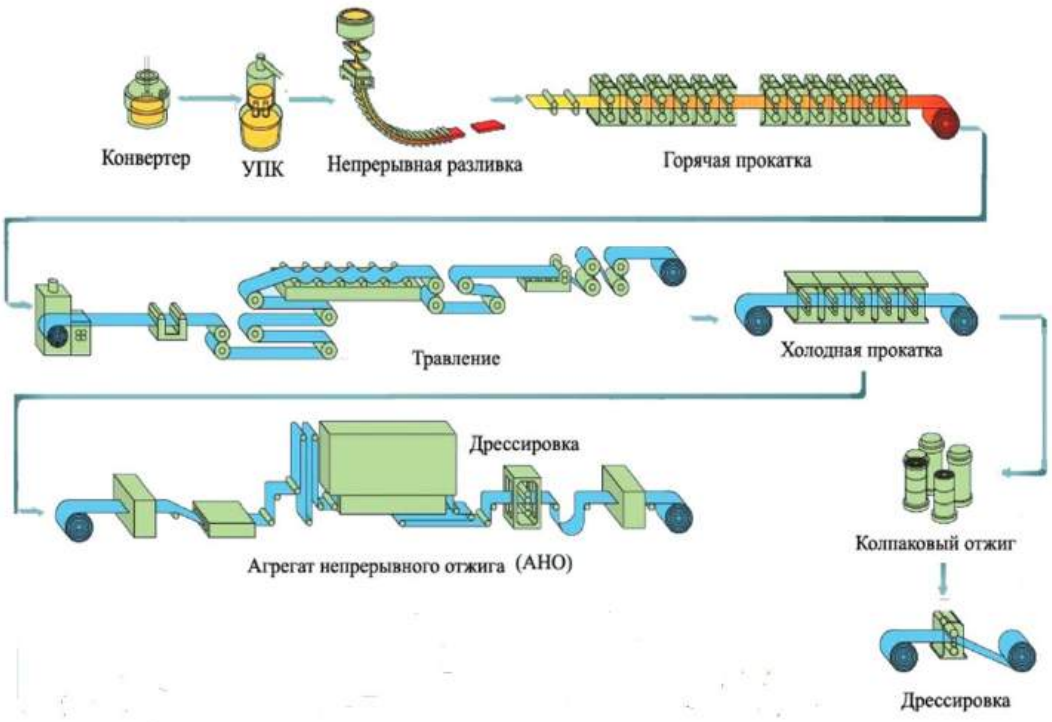


Рис. 2. Варианты технологии производства стали HC260LA

Цель исследования – определить влияние химического состава на механические свойства стали HC260LA и оценить соответствие продукции требованиям EN 10268.

2. Материалы и методы

Статистический анализ выполнен на основе данных плавочного химического состава и результатов механических испытаний холоднокатаной стали HC260LA толщиной 0,6–1,5 мм после рекристаллизационного отжига. В соответствии с EN 10268 требования к химическому составу включают (табл. 1):

Таблица 1. Требования к химическому составу и механическим свойствам исследованной стали

Химический состав, %									
C	**Mn**	**Si**	**S**	**P**	**Al**	**Cr**	**Ni**	**Cu**	**Ti**
≤ 0,1	≤ 1,0	≤ 0,50	≤ 0,025	≤ 0,030	≤ 0,015	≤ 0,15	≤ 0,20	≤ 0,20	≤ 0,15
Механические свойства									
Предел текучести, МПа					260-330				
Предел прочности, МПа					350-430				
Удлинение, %					Min 26				

Элементами химического состава с низкой вариабельностью являются: C, Si, As, Cr, Ni, Cu, V, Mo, Nb, N. Средняя концентрация Mn=0,87 %, диапазон 0,84÷0,90 %. Вредные примеси фосфор и сера не превышают требований 0,02 и 0,025 % соответственно и равны: S_{max}=0,02 %, P_{max}=0,018 %. Фосфор в сталях для глубокой вытяжки является вредной примесью, так как увеличивает прочность и долю бракованных изделий. Алюминий – сильнейший раскислитель и стабилизатор. Введение более 0,03-0,04 % Al в сталь обеспечивает стойкость против старения, поскольку алюминий связывает растворенный азот в нитриды алюминия. Для получения предела текучести не менее 260 МПа сталь HC260LA легирована ванадием и титаном. Среднее значение Ti = 0,016 %; Ti_{min} = 0,014 %; Ti_{max} = 0,019 %.

В исследуемом массиве плавок стали HC260LA средние значения предела текучести: $\sigma_{0,2}$ = 312 МПа; $\sigma_{0,2min}$ =285 МПа; $\sigma_{0,2max}$ =330 МПа. Средние значения предела прочности: σ_B = 402 МПа; σ_{Bmin}=380 МПа; σ_{Bmax}= 430 МПа. Диапазон значений относительного удлинения: δ_{min}=26 %, а δ_{max}=36 %, доверительный интервал δ=31,3±3 %. Таким образом, показатели

механических свойств удовлетворяет требованиям EN 10268: $\sigma_{0,2min} \geq 260$ МПа, $\delta_{min} \geq 26$ %.

В работе получены и проанализированы регрессионные зависимости «состав – свойство», представленные на рис. 3-4. Построенные модели позволяют количественно оценить вклад отдельных элементов в формирование механических свойств стали HC260LA и выявить тенденции изменения свойств при варьировании химического состава.

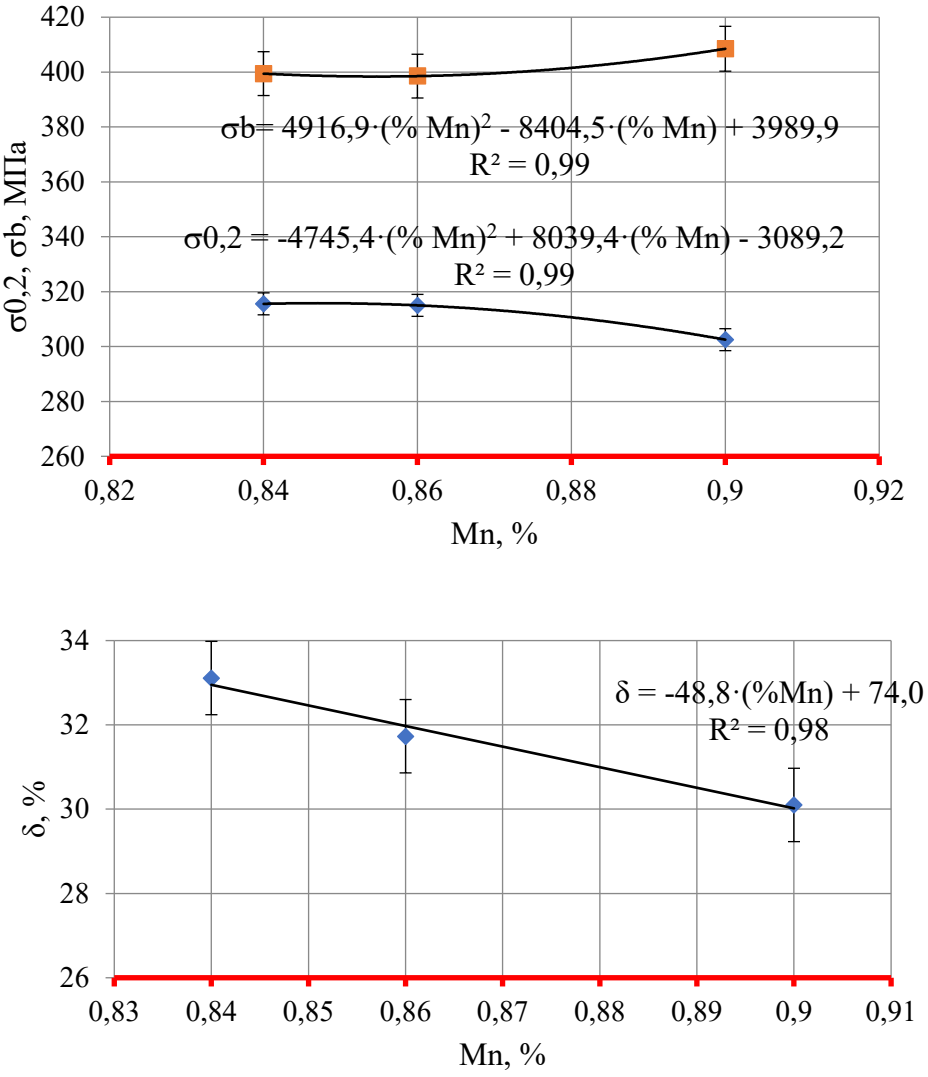


Рис. 3. Влияние Mn на механические характеристики стали HC260LA

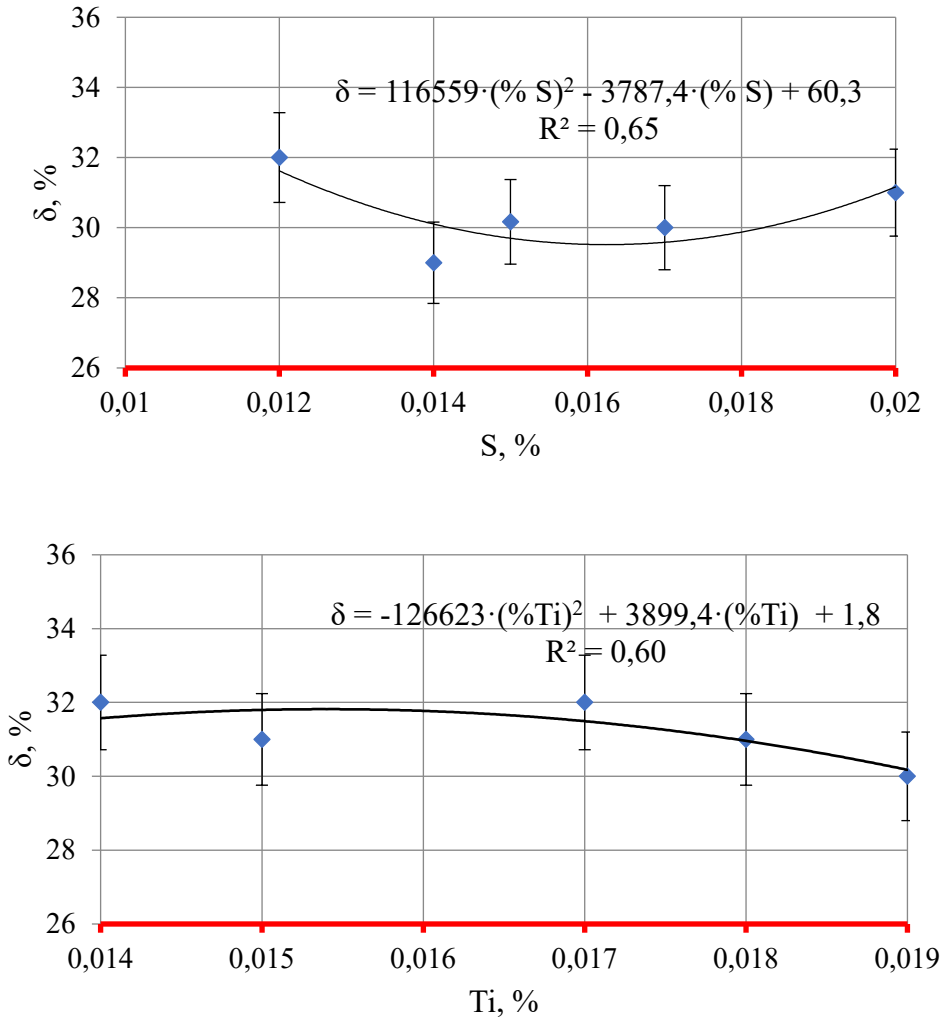


Рис. 4. Влияние S и Ti на относительное удлинение стали HC260LA

Опытные точки показаны в виде цветных маркеров, сгруппированы по средним значениям соответствующего свойства при фиксированной концентрации химического элемента. Красная горизонтальная линия отражает нормативные требования стандарта EN 10268. На графиках также показаны линии тренда, уравнения регрессии и коэффициенты достоверности аппроксимации R^2, характеризующие качество построенных моделей.

Результаты регрессионного анализа представлены в таблице 2.

В работе изучено также совместное влияние Mn и S на пластичность. Следует отметить, что зависимость δ (%) = 55 – 20·(% Mn) – 410·(% S); R^2 = 0,37 носит приближенный характер, поэтому представленная на рис. 5 карта изолиний отражает лишь общие тенденции.

Таблица 2. Влияние отдельных элементов на механические свойства стали HC260LA

Элемент	**Диапазон, %**	**Влияние на $\sigma_{0,2}$**	**Влияние на σ_B**	**Влияние на δ**	**Эффект**
C	0,08–0,09	316 → 307 МПа	398 → 406 МПа	32 → 30 %	Рост прочности, снижение δ
Mn	0,84–0,90	слабое	400 → 408 МПа	33 → 30 %	Рост прочности, снижение δ
S	0,013–0,020	растет до 0,017 %, затем стабилизируется		снижается	Ухудшение штампуемости
P	0,009–0,018	слабое	слабое	значительное снижение	Снижение вязкости и пластичности
Al	0,022–0,040	слабое	слабое	умеренное	Стабилизация структуры, предотвращение старения
Ti	0,014–0,019	слабое	растет	снижается	Связывает C и N, но снижает δ при избытке концентрации

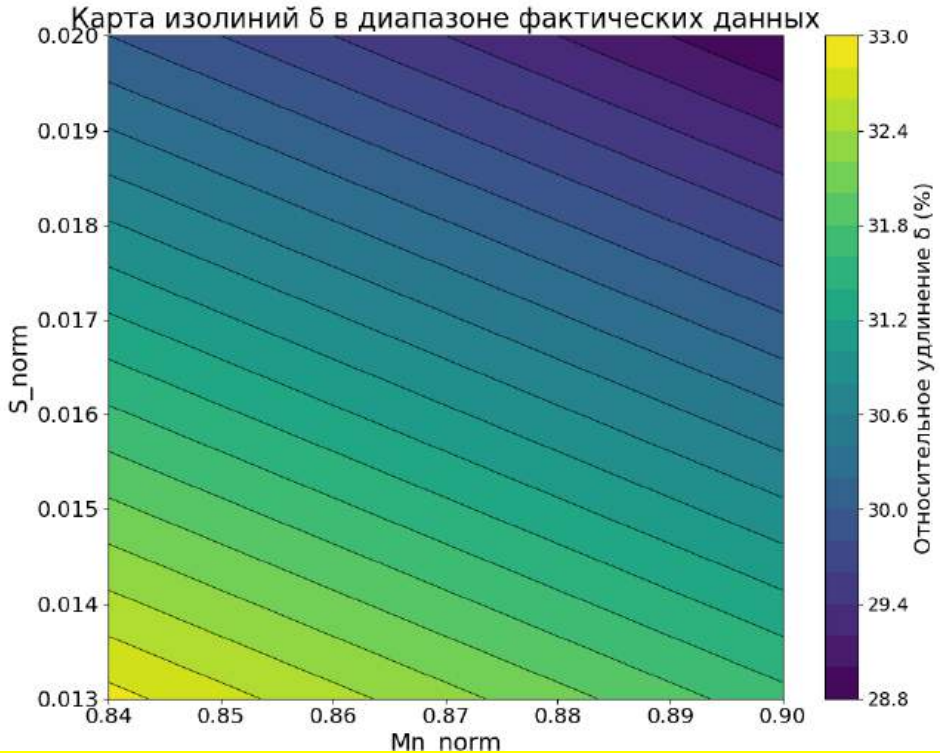


Рис. 5. Карта изолиний для относительного удлинения.
Максимальные значения δ=33,0 % наблюдаются при 0,84 % Mn и 0,013 % S

3. Заключение

Анализ исследуемого массива плавок показал, что химический состав стали HC260LA полностью соответствует требованиям EN 10268, а механические свойства ($\sigma_{0,2}$, σ_B, δ) находятся в пределах нормативных значений. Наибольшее влияние на формирование прочностных и пластических характеристик оказывают элементы Mn, S и Ti.

Регрессионная модель $\delta = f(Mn, S)$ и соответствующая ей карта изолиний позволяют выявить тенденцию изменения пластичности под влиянием марганца и серы. Сульфиды марганца играют важную роль в формировании микроструктуры стали HC260LA, определяя кинетику рекристаллизации, текстуру и анизотропию свойств [5]. Контроль содержания Mn и S является ключевым условием обеспечения стабильных механических характеристик и штампуемости стали HC260LA.

Следует отметить, что в работе не учитывалось влияние технологических факторов – температуры конца прокатки, смотки, скорости охлаждения, параметров рекристаллизационного отжига на микроструктуру и свойства стали HC260LA для автомобилестроения.

Список использованных источников

1. *Пилюшенко В. Л.*, *Яценко А. И., Белянский А. Д., Регаша Н. Л., Кругликова Г. В.* Структура и свойства автолистовой стали. – М.: Металлургия, 1996. – 176 с.
2. *Гусева С. С., Гуренко В. О., Зварковский Ю. Д.* Непрерывная термическая обработка автолистовой стали. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
3. *Schultz A.* Metallic material trends for North American light vehicles : [site] // Great Designs in Steel Seminar. – North America, 2009. – URL: https://www.greatdesignsinsteel.com/2009/schultz.pdf (дата обращения: 31.08.2026).
4. *Беняковский М. А., Масленников В. А.* Автомобильная сталь и тонкий лист. – Череповец: Издательский дом «Череповец», 2007. – 636 с.
5. *Родионова И. Г., Шапошников Н. Г., Эндель Н. И.* Условия образования нитридной и сульфидной фаз в сталях для глубокой вытяжки. II. Сульфид марганца // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2008. – № 4. – С. 52–58.

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HC260LA STEEL: STATISTICAL AND REGRESSION ANALYSIS

Marina A. Riabikina, Ph. D.,
Viktor I. Burlakov, Ph. D.,
Galina Yu. Burlakova, Ph. D.
«Pryazovskyi State Technical University» – Branch of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «National Research Moscow State University of Civil Engineering»
Russia, 287642, Donetsk People's Republic, Mariupol, Universitetskaya St., 7
E-mail: maryna.ryabikina@mail.ru, burlakovviktor3196@mail.ru, burlakovagu@yandex.ru

Abstract. Cold-rolled high-strength low-alloy (HSLA) steel HC260LA is widely used in automotive manufacturing due to its excellent formability and weldability. Based on chemical analysis data and mechanical testing results from 36 experimental melting's, this paper investigates the variability of alloying element contents and their impact on yield strength, tensile strength, and elongation. Regression dependencies were constructed, and correlation coefficients between element concentrations and steel properties were determined. It is demonstrated that the mechanical characteristics of HC260LA within the studied dataset comply with the requirements of EN 10268, with manganese, sulfur, and titanium concentrations identified as the key factors influencing these properties. The study establishes that optimizing the content of alloying elements allows for stabilizing mechanical properties and enhancing the stampability of the steel.

Keywords: steel; chemical composition; yield strength; elongation; regression.

Цифровые технологии и моделирование транспортных систем

УДК 656.13+656.05
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-711

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА РЕГУЛИРУЕМОМ ПЕРЕКРЕСТКЕ НА ОСНОВЕ РЕСУРСНОГО ПОДХОДА

Кирилл Игоревич Камаев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: kirill.kamaev.03@gmail.com

Аннотация. Рассматривается проблема оценки эффективности организации дорожного движения на регулируемых перекрестках. Применяемые на практике частные показатели – задержка, пропускная способность, уровень обслуживания, длина очереди, использование длительности зеленого сигнала – описывают отдельные аспекты функционирования перекрестка и не образуют системы, пригодной для сопоставления альтернативных схем организации дорожного движения. Обосновывается переход к ресурсному подходу, в котором выделяются шесть типов ресурсов перекрестка: временной, пространственный, энергетический, инфраструктурный, информационный и человеческий. Для каждого типа на основе анализа научных публикаций сформирован набор метрик эффективности, предложены порядок расчета и процедура применения метрик для сравнения схем организации дорожного движения, приоритизации перекрестков и оценки эффекта мероприятий. Методика иллюстрируется расчетным примером на регулируемом перекрестке на примере введения координированного управления.

Ключевые слова: организация дорожного движения; регулируемый перекресток; ресурсный подход; эффективность организации дорожного движения; светофорное регулирование; координированное управление; оценка мероприятий по организации дорожного движения.

1. Введение

Устойчивый рост автомобилизации и концентрация транспортных потоков на магистралях крупных городов приводят к увеличению задержек, снижению скорости сообщения и росту транспортных издержек. Значительная часть этих потерь формируется на регулируемых перекрестках, где эффективность организации дорожного движения (далее – ОДД) поддается прямому управлению и может быть повышена без использования капитальных вложений на реконструкцию улично-дорожной сети. Мероприятиями по ОДД могут выступать оптимизация циклов и сдвигов фаз, координированное управление, адаптивные алгоритмы, перераспределение полос и другие.

Они реализуются в условиях ограниченных бюджетов и требуют обоснованного сопоставления альтернатив.

Применяемые на практике различные методики, включая руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог (Highway Capacity Manual), а также другие аналогичные руководства, ориентированы на отдельные показатели: задержку, пропускную способность, уровень обслуживания, длину очереди. Они не формируют системной картины использования ресурсов перекрестка, в результате чего часть эффектов от мероприятий ОДД остаются вне оценки. В научной литературе предложен ряд метрик, описывающих отдельные аспекты функционирования перекрестка, которые будут рассмотрены далее. Разрыв между наличием частных метрик и отсутствием их системной связи по типам ресурсов перекрестка составляет основную проблему настоящей работы.

Новизна работы состоит в систематизации метрик эффективности ОДД по основным типам ресурсов перекрестка и в разработке процедуры их применения для сопоставления альтернативных схем ОДД.

2. Систематизация существующих метрик

Оценка эффективности ОДД традиционно опирается на показатели, закрепленные в нормативных и методических документах: задержка, коэффициент загрузки, уровень обслуживания и длина очереди. Как показано в [1], коэффициент загрузки не позволяет различить как используется пропускная способность: свободным потоком, очередью или их комбинацией. Специалистами был предложен ряд метрик, расширяющих традиционный набор: показатели использования пропускной способности, включая коэффициент использования пропускной способности по объему очереди и коэффициент использования цикла ($К_ц$) [1]; методы извлечения задержки и количества остановок из траекторных данных [2]; метрики использования длительности зеленого сигнала [3 – 5].

Пешеходный и экологический аспекты развиты в работах [6 – 8]: оценка влияния стратегий обслуживания пешеходов на выбросы CO_2 [6], LiDAR-метрики времени ожидания [7], систематизация пешеходных задержек [8]. Обзоры [9, 10] по адаптивному управлению фиксируют стандартный набор метрик автоматизированной системы управления дорожным движением (далее – АСУДД). Другие работы [11 – 14] предлагают показатели эффективности интеллектуальных транспортных систем (далее – ИТС), инфраструктуры и логистики, но не применяют ресурсный подход к

светофорному регулированию. В [15] показано, как перераспределение полос управляет пространственным ресурсом перекрестка.

Таким образом, в литературе накоплен широкий набор метрик, однако отсутствует их системная связь с типами ресурсов перекрестка.

3. Ресурсный подход и система метрик эффективности

Под ресурсом перекрестка понимается ограниченная величина, которая расходуется или используется при пропуске транспортных и пешеходных потоков. Выделим шесть типов ресурсов: временной, пространственный, энергетический, инфраструктурный, информационный и человеческий. Критериями выделения служат ограниченность ресурса, возможность оценки полноты его использования и связь с автомобильным, пешеходным или экологическим аспектом. Классификация может быть расширена, например, за счет экологического ресурса.

Временной ресурс – это длительность цикла и его фаз. Его основной метрикой является задержка времени, и вычисляется она по формуле из руководства по оценке пропускной способности автомобильных дорог (Highway Capacity Manual):

$$d = d_1 + d_2 + d_3, \quad (1)$$

где d_1 – задержка от равномерного прибытия;

d_2 – от случайных колебаний;

d_3 – начальная задержка.

Первое слагаемое описывают формулой Вебстера:

$$d_1 = 0{,}5C\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2 / (1 - \min(1, X)\frac{g}{C}), \quad (2)$$

где C – длительность цикла, с;

g – эффективная длительность зеленого сигнала светофора, с;

$X = v/\frac{sg}{C}$ – степень насыщения;

v – интенсивность движения, авт./ч;

s – поток насыщения, авт./ч.

Дополнительной метрикой временного ресурса, который может служить для увеличения точности, выступает коэффициент использования цикла, вычисляемый по формуле $К_ц = t_{исп}/C$, где $t_{исп}$ – суммарное время в пределах цикла, в течение которого на подходах присутствовали транспортные средства, с [1].

Пространственный ресурс подразумевает под собой физическую полосность подходов и длина перегонов. Его метриками могут выступать число

полос, длина перегонов, зона накопления очереди. При организационных мероприятиях эти метрики остаются постоянными, но изменяются при перераспределении полос, выделении полос для городского пассажирского транспорта, реконструкции улично-дорожной сети [15].

Далее перейдем к энергетическому ресурсу, который подразумевает под собой расход топлива транспортными средствами и выбросы в окружающую среду. Расход топлива вычисляется по формуле:

$$F = f_{\text{хх}} t_{\text{хх}} + f_{\text{дв}} L, \quad (3)$$

где $f_{\text{хх}}$ – удельный расход на холостом ходу;

$t_{\text{хх}}$ – время холостого хода;

$f_{\text{дв}}$ – удельный расход в движении;

L – путь.

Инфраструктурный ресурс – это состояние светофорных объектов, покрытия, мостов. Его основными метриками выступают плотность сети, износ покрытия, загрузка мостовых сооружений, возраст оборудования, пропускная способность трамвайных узлов (при наличии) [13].

Также стоит отметить информационный ресурс. Он основан на возможности сбора и обработки данных. Метрики, которые его характеризуют: ресурсоотдача, оперативность, результативность ИТС [11]; экономические, экологические и социальные метрики [12]; для АСУДД – задержка, очередь, уровень обслуживания [9, 10], а также степень координации, которая вычисляется по формуле:

$$K_{\text{коорд}} = \frac{N_{\text{коорд}}}{N_{\text{общ}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $N_{\text{коорд}}$ – число перекрестков, охваченных координированным управлением;

$N_{\text{общ}}$ – общее число перекрестков на рассматриваемом участке.

Человеческий ресурс подразумевает под собой время и комфорт участников движения. Его базовой метрикой является пешеходная задержка, вычисляемая по формуле из руководства по оценке пропускной способности автомобильных дорог (Highway Capacity Manual):

$$d_{\text{п}} = C \left(1 - \frac{g_{\text{п}}}{C}\right)^2 / 2, \quad (5)$$

где $g_{\text{п}}$ – длительность пешеходной фазы.

Дополнительно можно использовать значения минимальной скорости пешеходов [8], время ожидания по LiDAR [7], число конфликтных ситуаций, комфорт пешеходов, время ожидания пассажиров городского пассажирского транспорта.

Порядок применения метрик состоит из пяти шагов:

1. Определение состава ресурсов, затронутых мероприятием.

2. Расчет базовых значений по данным натурных обследований и имитационной модели в SUMO (редактор Net329Edit).

3. Расчет значений после мероприятия с определением оптимальных параметров в Avenue.

4. Сопоставление метрик по формуле:

$$\Delta m = (m_{\text{после}} - m_{\text{до}})/m_{\text{до}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $m_{\text{после}}$ – значение метрики после введения мероприятия;

$m_{\text{до}}$ – значение метрики до введения мероприятия;

5. Формирование сводной оценки.

Интегральный индекс не вводится, поскольку веса зависят от приоритетов в конкретно рассматриваемом проекте.

Для сопоставления альтернативных схем ОДД предлагается использование матрицы «схема × ресурс» (см. таблицу 1). В ней строки – типы ресурсов, столбцы – схемы, а в ячейках – направление изменения метрики. Если одна схема улучшает одни ресурсы и ухудшает другие, ресурсы ранжируются по приоритетам территории, уступающие схемы исключаются, а среди оставшихся выбирается доминирующая согласно принципу Парето. В противном случае при равенстве показателей решение принимается с учетом дополнительных факторов, включая стоимость, срок реализации и социальные эффекты.

Также стоит отметить, что данный метод имеет ограничения, связанные с доступностью данных (часть метрик требует траекторных данных, при отсутствии их можно заменить на качественную оценку), охватом ресурсов (не учитываются шум, вибрация, занимаемая площадь) и отсутствием обоснованных весов для интегральной оценки, так как каждая рассматриваемая ситуация будет требовать персональной проработки весовых коэффициентов и метрик.

Таблица 1. Матрица «схема × ресурс»

Тип ресурса	**Схема А (координированное дорожное управление)**	**Схема Б (выделенная полоса городского пассажирского транспорта)**
Временной (автомобильный транспорт)	Улучшение	Ухудшение
Временной (городской пассажирский транспорт)	Сохранение	Улучшение
Пространственный	Сохранение	Ухудшение (1 из 4 полос)
Энергетический	Улучшение	Неопределенно
Инфраструктурный	Сохранение	Требует затрат
Информационный	Улучшение	Сохранение
Человеческий	Сохранение	Улучшение

4. Применение методики на регулируемом перекрестке

Для демонстрации данной методики рассмотрим перекресток в Санкт-Петербурге, образованный пересечением четырех улиц: Торжковской, Савушкина, набережной Черной речки и Академика Крылова. Также стоит отметить, что через перекресток проходят трамвайные пути. За улицей Академика Крылова расположен Ушаковский мост, связывающий Приморский район с центром города. Второй перекресток – пересечение Ланского шоссе и набережной Черной речки. Расстояние между перекрестками – 350 м (ЮС) и 330 м (СЮ). Исходные данные получены по натурным обследованиям в пиковые часы буднего и выходного дня при помощи метода видеосъемки с покадровой обработкой с точностью ±5 %. Интенсивность движения на подходах первого перекрестка – от 51 до 1098 ТС/ч в выходной день и от 15 до 1278 ТС/ч в будний день; на втором – от 63 до 984 и от 0 до 815 ТС/ч соответственно. Режим регулирования до мероприятия: цикл 120 с (выходной) и 160 с (будний), четыре фазы. Схема перекрестка приведена на рисунке 1. Номерами на рисунке указаны направления движения на перекрестке.

Рассматриваемое мероприятие для апробации методики подразумевает введение координированного управления на участке от пересечения Торжковской ул. – наб. Черной речки до Ланского ш. – наб. Черной речки. Параметры координации рассчитаны при помощи программы Avenue и проверены в симуляторе SUMO. Длительности циклов и пешеходных фаз (25 с) не изменялись; согласование – за счет сдвигов фаз.

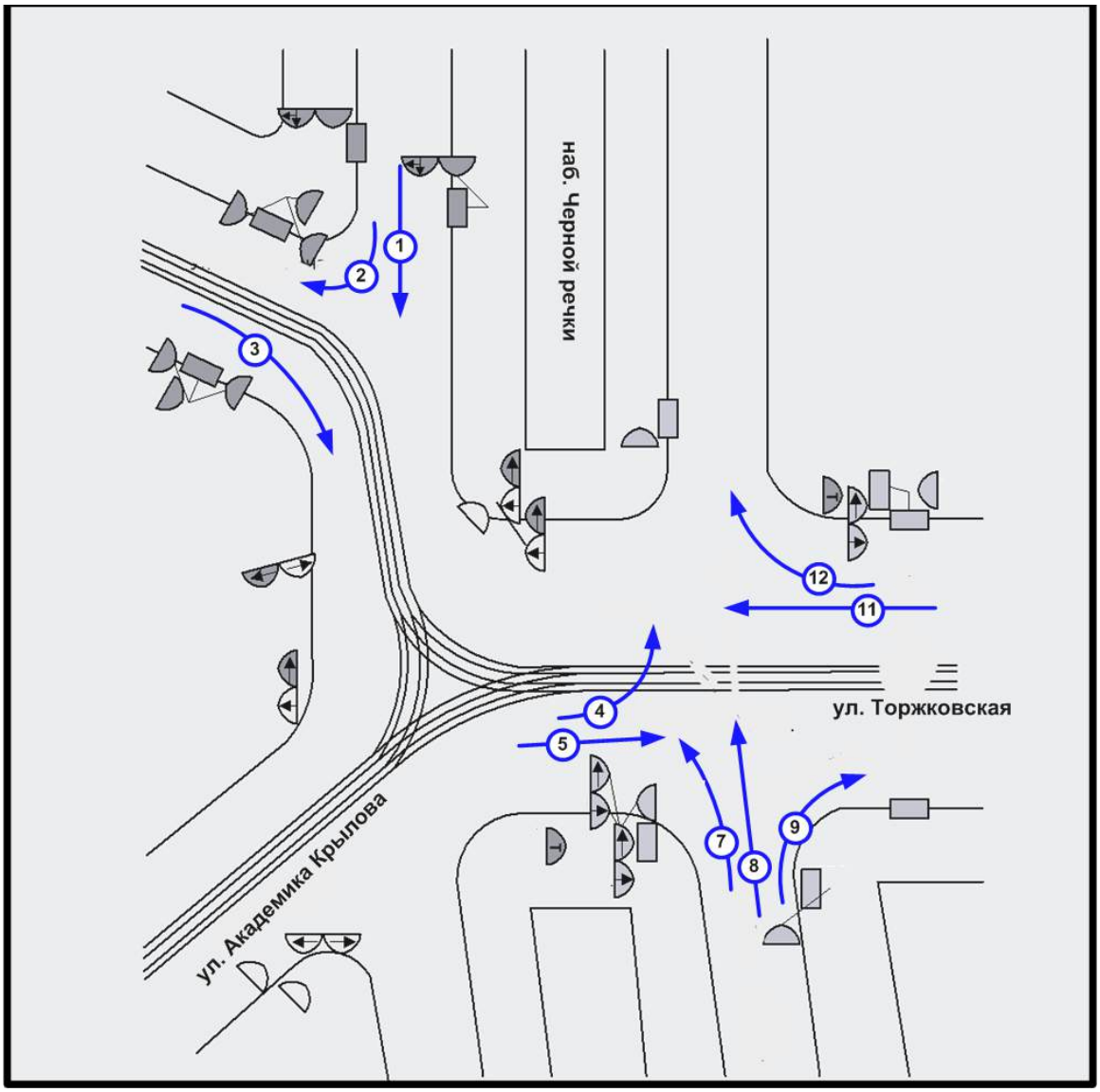


Рис. 1. Схема перекрестка Торжковская ул. – наб. Черной речки с нумерацией направлений

Далее пройдем по описанным выше шагам методики:

1. Мероприятие затрагивает временной, энергетический, информационный и человеческий ресурсы; пространственный и инфраструктурный сохраняются.

2. Базовые значения: средняя задержка – 171,98 с (выходной) и 385,95 с (будний); время движения – 297 с и 509 с; скорость – 8,57 км/ч и 6,58 км/ч; задержка измерена на участке сети из двух перекрестков и перегона. Пешеходная задержка при $g_{\text{п}}$= 25 с составляет 37,6 и 57,0 с.

3. Значения после проведения мероприятия: средняя задержка составила 128,99 и 308,76 с; время движения 234,6 с и 432,6 с; скорость 10,3 км/ч и 7,65 км/ч; степень координации возросла с 0 до 100 %.

4. Относительное изменение средней задержки составило −25,0 % (выходной) и −20,0 % (будний); время движения сократилось на 21 % и 15 %, скорость выросла на 20 % и 16 %. Энергетический ресурс оценен по удельным показателям: суммарный поток 3411 авт./ч и 5034 авт./ч; снижение задержки 43 с/авт. и 77 с/авт.; доля холостого хода 30 % (допущение); удельный расход топлива 0,6 л/ч; выбросы CO_2: 2,32 кг/л. Экономия топлива: 7,3 л/ч и 19,4 л/ч; снижение CO_2: 17,0 кг/ч и 45,0 кг/ч.

Итоговый результат сведен в таблицу 2.

Таблица 2. Влияние координированного управления на ресурсы перекрестка

№	Тип ресурса	Метрика	До	После	Изменение
1	Временной	Средняя задержка на участке сети (выходной)	171,98 с	128,99 с	−25,0 %
2		Средняя задержка на участке сети (будний)	385,95 с	308,76 с	−20,0 %
3		Среднее время движения (выходной)	297,0 с	234,6 с	−21,0 %
4		Среднее время движения (будний)	509,0 с	432,6 с	−15,0 %
5	Пространственный	Полосность и длина перегонов	Без изм.	Без изм.	Сохранение
6	Энергетический	Расход топлива и CO_2 (выходной)	Базовый	−7,3 л/ч; −17,0 кг/ч	Улучшение
7	Энергетический	Расход топлива и CO_2 (будний)	Базовый	−19,4 л/ч; −45,0 кг/ч	Улучшение
8	Инфраструктурный	Состав светофорных объектов	Без изм.	Без изм.	Сохранение
9	Информационный	Степень координации $K_{\text{коорд}}$	0%	100%	Улучшение
10	Человеческий	Пешеходная задержка $d_{\text{п}}$	37,6 / 57,0 с	37,6 / 57,0 с	Сохранение

Результаты показывают, что ресурсный подход фиксирует эффекты, не сводящиеся к одной метрике: координация улучшает временной, энергетический и информационный ресурсы, тогда как пространственный, инфраструктурный и человеческий сохраняются. Это ожидаемо для данного типа мероприятия.

5. Отличительные особенности методики и сценарии её применения

Предложенная методика отличается от существующих подходов к оценке эффективности ОДД по трем основным аспектам: по объекту оценки, по составу метрик и по способу применения результатов. В традиционных методиках объектом оценки в большинстве существующих подходов выступает проектное решение – новая схема пофазного разъезда, перепланировка перекрестка, введение координированного управления. Метрики подбираются под конкретную задачу. Например, для обоснования числа полос, выбора длительности цикла, сравнения альтернатив. Такой подход удобен в проектной практике, но он не отвечает на вопрос, какие именно ресурсы перекрестка затрачиваются и насколько в полном объеме они используются. Ресурсный подход переносит объект оценки с мероприятия на перекресток как совокупность ресурсов, что позволяет сравнивать мероприятия разных типов согласно единой системе критериев.

По составу метрик ресурсный подход объединяет показатели, которые в литературе существуют разрозненно. Она не заменяет их, а связывает.

По способу применения результатов методика ориентирована на сопоставление схем ОДД по матрице «схема × ресурс», а не на расчет интегрального индекса.

Ресурсный подход не противоречит уже существующим разработкам, но дополняет их за счет системной группировки метрик. В [1] вводят метрики использования пропускной способности, но не связывают их с типами ресурсов. В [2] показывают, как извлекать метрики задержки из траекторных данных, но не переходят к комплексной оценке. В [3] предлагают метрики использования длительности зеленого сигнала, но рассматривают их изолированно. В [8] систематизируются пешеходные метрики, но не связывают их с остальными ресурсами. Настоящая методика делает следующий шаг: она показывает, как эти метрики могут быть объединены в единую систему и применены для оценки мероприятий ОДД.

Методика ориентирована на три сценария практического применения. Первый заключается в сравнении альтернативных схем ОДД. Проектировщик или орган управления дорожным движением формирует матрицу «схема × ресурс» и видит, какие схемы улучшают одни ресурсы и ухудшают другие. Второй основан на приоритизации перекрестков для модернизации, то есть если ресурсный подход применяется к группе перекрестков, можно выявить те, где недоиспользуются сразу несколько ресурсов, например временной, пространственный и информационный. Третий предполагает

оценку эффекта реализованных мероприятий, подразумевающий сопоставление метрик до и после мероприятия, что позволяет зафиксировать не только ожидаемое улучшение временного ресурса, но и сопутствующие эффекты, включая снижение выбросов и повышение оперативности управления.

6. Заключение

В работе предложена методика оценки эффективности организации дорожного движения на регулируемом перекрестке на основе ресурсного подхода. Методика основана на выделении шести типов ресурсов перекрестка – временного, пространственного, энергетического, инфраструктурного, информационного и человеческого, а также на формировании набора метрик для каждого типа на основе уже существующих подходов.

Новизна работы состоит в переносе объекта оценки с мероприятия ОДД на перекресток как совокупность ресурсов, в разработке процедуры применения метрик и матрицы «схема × ресурс», а также в систематизации метрик по шести типам ресурсов с апробацией на реальном объекте.

В результате работы, во-первых, был обоснован ресурсный подход для оценки эффективности ОДД на регулируемом перекрестке и выделены шесть типов ресурсов. Во-вторых, сформирована система метрик, в которой каждая метрика привязана к конкретному типу ресурсов. В-третьих, предложен порядок применения метрик, включающий определение состава задействованных ресурсов, расчет базовых и итоговых значений, сопоставление и формирование сводной оценки. В-четвертых, предложена матрица «схема × ресурс» для сопоставления альтернативных схем ОДД без введения интегрального индекса. В-пятых, методика проиллюстрирована на реальном примере перекрестка.

Практическая значимость методики состоит в том, что она ориентирована на три сценария применения: сравнение альтернативных схем ОДД, приоритизацию перекрестков для модернизации и оценку эффекта реализованных мероприятий. Методика работоспособна как при полных, так и при неполных данных: там, где метрика не может быть рассчитана количественно, фиксируется направление её изменения. Это подтверждается примером, где часть метрик оценена количественно, часть – качественно или расчетно. Методика применима к регулируемым перекресткам при наличии исходных данных об интенсивности движения, геометрии подходов и режимах регулирования.

Список использованных источников

1. *Dobrota N., Stevanovic A., Mitrovic N., Alshayeb S., Zlatkovic M*. Development and Evaluation of Performance Measures for Capacity Utilization of Traffic Signals // Transportation Research Record. – 2023. – Vol. 2677, № 1. – Pp. 456–471. – DOI: 10.1177/03611981221106303.
2. *Saldivar-Carranza E., Li H., Mathew J., Hunter M., Sturdevant J., Bullock D. M. Deriving* Operational Traffic Signal Performance Measures from Vehicle Trajectory Data // Transportation Research Record. – 2021. – Vol. 2675, № 9. – Pp. 623–637. – DOI: 10.1177/03611981211006728.
3. *Li Y., Zhang Y., Wang X.* Green time usage metrics on signalized intersections and arterials // International Journal of Transportation Science and Technology. – 2022. – Vol. 11, № 3. – Pp. 509–521. – DOI: 10.1016/j.ijtst.2021.06.003.
4. *Karabulut N. C., Ozen M., Altintasi O.* Understanding the Determinants of Lane Inefficiency at Fully Actuated Intersections: An Empirical Analysis // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, № 2. – Art. 722. – DOI: 10.3390/su16020722.
5. Efficiency Evaluation of Signal Control Intersections Based on Trajectory Data // Proceedings of the 2020 COTA International Conference of Transportation Professionals. – Reston, VA : American Society of Civil Engineers, 2020. – Pp. 289–300. – DOI: 10.1061/9780784483053.026.
6. *Zhang Y., Li P., Wang X.* Environmental Assessment of Incorrect Automated Pedestrian Detection and Common Pedestrian Timing Treatments at Signalized Intersections // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, № 11. – Art. 4487. – DOI: 10.3390/su16114487.
7. *Chen L., Zhang Y., Liu X.* Vehicle and Pedestrian Traffic Signal Performance Measures Using LiDAR Sensors // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 19. – Art. 6412. – DOI: 10.3390/s24196412.
8. NCHRP Research Report 969: Traffic Signal Control Strategies for Pedestrians and Bicyclists. – Washington, DC : Transportation Research Board, 2022. – 250 p.
9. *Agrahari A., Kumar A., Singh A., Yadav R.* Artificial Intelligence-Based Adaptive Traffic Signal Control System: A Comprehensive Review // Electronics. – 2024. – Vol. 13, № 19. – Art. 3876. – DOI: 10.3390/electronics13193876.
10. *Ma L., Liu Y., Liu Y., Ma C., Wang S.* Coordinated Multi-Intersection Traffic Signal Control Using a Policy-Regulated Deep Q-Network // Sustainability. – 2026. – Vol. 18, № 3. – Art. 1510. – DOI: 10.3390/su18031510.
11. *Анохов И. В.* Методические подходы к оценке эффективности интеллектуальных транспортных систем // Интеллектуальные транспортные системы. – 2024. – № 3. – С. 12-21.
12. *Ефимов А., Медведева К.* Интеллектуальные транспортные системы: перспективы, эффективность и проблемы // Транспорт и информационные технологии в России. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 132–150.
13. *Чибилёв А. А. (мл.), Чернева Л. О., Чибилёв А. А., Свиридов И. Д.* Сравнительная оценка уровня развития автотранспортной инфраструктуры регионов степной зоны Урала и Сибири // Вестник Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2024. – № 4. – С. 54–63. – DOI: 10.24412/2712-8628-2024-4-54-63.

14. *Данатарова Г. А., Бабаджанов М. Б.* Транспортная логистика и управление потоками: теория, методы и практические механизмы оптимизации // Вестник науки и образования. – 2025. – № 6. – С. 45–52.
15. *Камаев К. И., Клепикова С. Д., Каштелинский А. С.* Динамическое перераспределение полос движения на регулируемом перекрестке // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Современные подходы в системном инжиниринге и цифровом моделировании сложных производственных систем», Санкт-Петербург, 27-28 февраля 2025 г. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025, с. 174-181, doi: 10.18720/SPBPU/2/id25-204.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF TRAFFIC MANAGEMENT AT A SIGNALIZED INTERSECTION BASED ON THE RESOURCE-BASED APPROACH

Kirill I. Kamaev
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: kirill.kamaev.03@gmail.com

Abstract. The paper addresses the problem of assessing the effectiveness of traffic management at signalized intersections. It is shown that the partial indicators applied in practice – delay, capacity, level of service, queue length, green time usage – describe individual aspects of intersection performance and do not form a system suitable for comparing alternative traffic management schemes. The transition to a resource-based approach is substantiated, in which six resource types of an intersection are identified: time, space, energy, infrastructure, information and human. For each type, a set of performance measures is formulated on the basis of research publications, and a calculation procedure and the way the measures are applied to compare traffic management schemes, prioritize intersections and evaluate the effect of measures are proposed. The methodology is illustrated by a calculation example using the introduction of coordinated control.

Keywords: traffic management; signalized intersection; resource-based approach; traffic signal control; coordinated control; intersection resource efficiency; assessment of traffic management measures.

УДК 681.3.16
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-712

ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЧАСТКОВ ПОВЕРХНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

Сергей Владимирович Мещеряков, д-р техн. наук,
Данил Евгеньевич Бортяков, канд. техн. наук,
Дима Арус,
Иван Сергеевич Мещеряков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: serg-phd@mail.ru, bortyakov@mail.ru, demaarous@gmail.com,
vano1399_1399@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены актуальные проблемы проектирования внешних кузовов транспортных машин применительно к электромобилям. Главное внимание уделено стыковке отдельных частей поверхности кузова и сглаживанию переходного участка. Для этой цели использована российская графическая система Компас-3D и вычислительные методы моделирования поверхности Coons. Предложены алгоритмы и проведены вычислительные эксперименты по оценке точности и качества скомпонованной поверхности на примере переднего крыла кузова электромобиля. Исследования выполнены в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого в совместном проекте с автозаводом КамАЗ.

Ключевые слова: электромобиль; поверхность кузова; сглаживание участков; моделирование; вычислительные методы.

1. Введение

Актуальность темы обусловлена растущим спросом (33% в год [1]) на городские электромобили различного назначения на 1-4 места с малыми габаритами, коротким пробегом, экономией электроэнергии, но главное – оригинальным дизайном и значит единичным производством. Если несущие силовые конструкции электромобилей удается унифицировать и перевести с единичного на серийное производство [2, 3], то внешний вид кузова и внутренний салон остаются предметом индивидуального творчества инженеров и дизайнеров.

Цель работы – автоматизация проектирования дизайна внешнего кузова электромобиля по индивидуальным заказам клиентов за счет применения современных средств моделирования.

Объектом исследования является поверхность кузова легкового электромобиля. *Предметом* исследования выбрана известная модель 3D поверхности Coons и ее расширенная версия Extended SQ-Coons, предложенная Лью и его коллегами [4, 5]. *Задача* моделирования состоит в соединении 3-х поверхностей – двух соседних P и Q и одной переходной T как показано на рис. 1.

2. Математическое описание модели 3D поверхности Coons

Геометрическое моделирование является основой компьютерного проектирования поверхностей сложной формы, таких как кузов электромобилей и других автомобилей по индивидуальному заказу. Одной из ключевых проблем этой задачи является связывание поверхностей кузова с обеспечением непрерывности и сглаживания переходного участка (рис. 1). При этом исходные поверхности частично обрезаются на специально вычисленную ширину переходной части в конце границы поверхности P в направлении u и начале границы поверхности Q в направлении v. Чем больше величина обрезки, тем шире переходный участок и более плавный переход.

$$u = P\,[0;\,1]\,,$$
$$v = Q\,[0;\,1]\,. \qquad (1)$$

Чтобы не образовались зазоры между переходным участком T и поверхностями P и Q, они должны совпадать с граничной кривой по касательной после вырезания обеих поверхностей:

$$\partial P/\partial u = \partial Q/\partial v. \qquad (2)$$

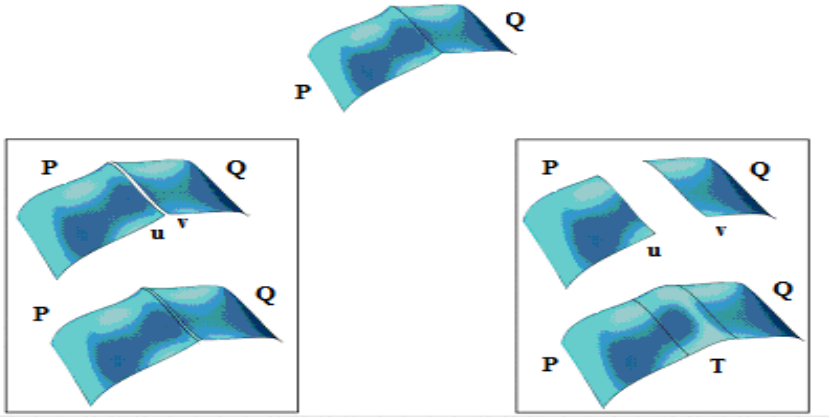


Рис. 1. Переходный участок поверхности T с использованием модели Extended SQ-Coons

Ширина и форма кривизны переходного участка поверхности T вычисляются на основе базисных функций кривых Безье [6] и регулируются

параметрическими коэффициентами крутизны W_P, и W_Q как многочлены 5-го порядка, которые позволяют улучшить точность и качество сглаживания поверхностей [7]:

$$W_P(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5 ,$$
$$W_Q(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5 , \quad (3)$$

где b, c и t – коэффициенты базисных функций кривых Безье.

3. Результаты моделирования переходного участка поверхности кузова электромобиля

Проверка модели Extended SQ-Coons переходного участка поверхности выполнена на примере переднего крыла кузова электромобиля. В качестве графических средств моделирования и проектирования выбрана отечественная система Компас-3D [8, 9]. Результаты сглаживания поверхностей показаны на рис. 2, которые подтвердили лучшее качество сглаживания поверхностей при использовании переходного участка.

Модель Extended SQ-Coons занимает меньше времени вычисления, чем другие методы Coons, а значит, учитывая ограничения по времени на проектирование, можно проверить больше опций кривизны переходного участка и выбрать оптимальный вариант. В данном примере найдены наилучшие коэффициенты кривизны поверхности W_P=0,17P и W_Q=0,28Q.

Практическая реализация работы выполнена в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого в совместном проекте КАМА с автомобильным заводом КамАЗ [10, 11]. Выработаны практические рекомендации по использованию вычислительных методов и математических моделей Extended SQ-Coons при проектировании электромобилей городского назначения и их единичном производстве.

4. Заключение

В работе предложено использовать современные расширенные модели Extended SQ-Coons для задач моделирования и проектирования дизайна переходного участка между поверхностями кузова электромобиля и их сглаживания.

Результаты практической реализации показали, что методы моделирования Extended SQ-Coons эффективны именно при единичном проектировании дизайна и производстве электромобилей по индивидуальному заказу. Работа актуальна и имеет перспективные направления развития.

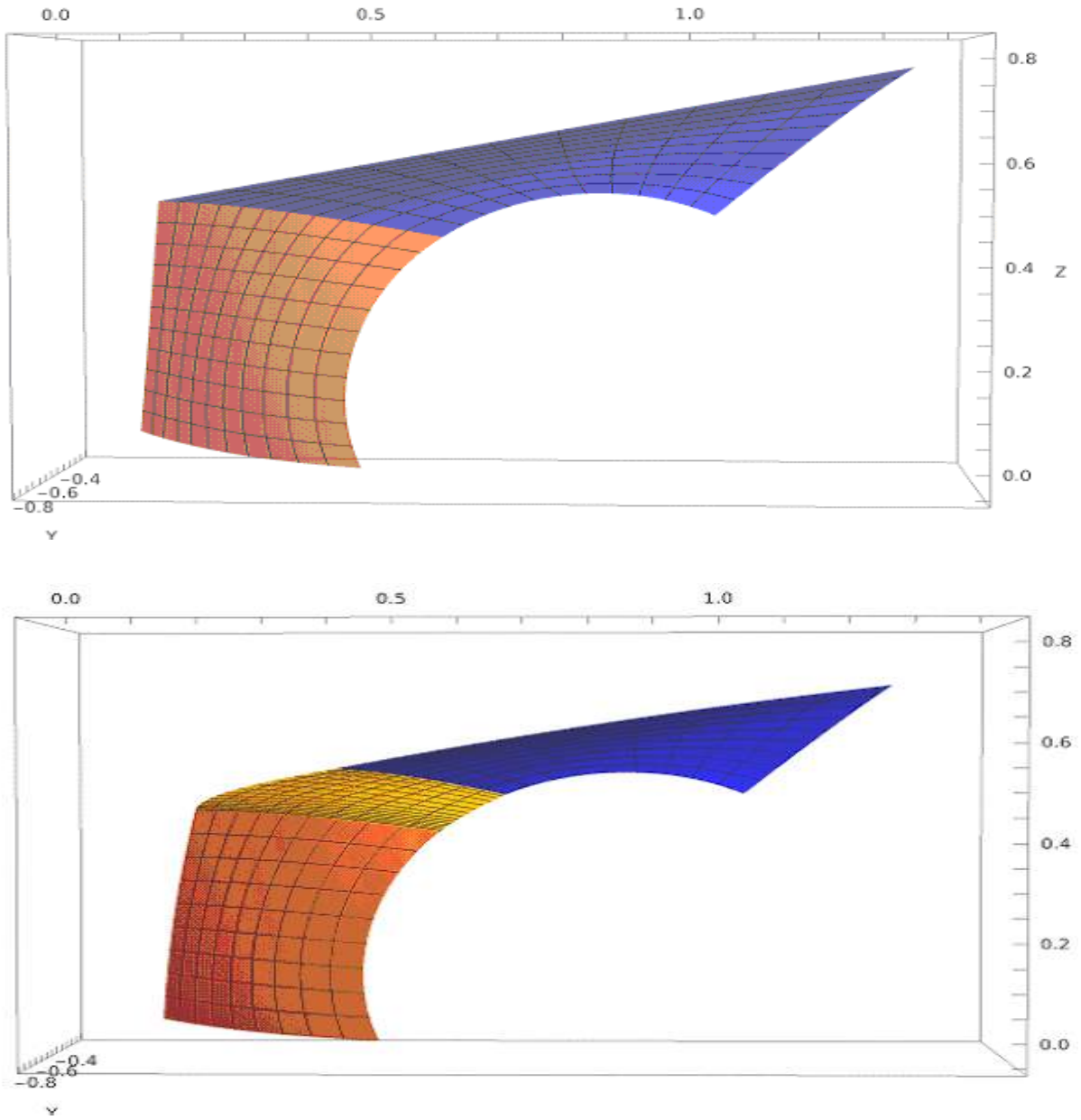


Рис. 2. Поверхности *P* и *Q* до построения переходного участка *T* (сверху) и после его построения (снизу)

Перспективным направлением дальнейших исследований рассматривается распространение выработанного подхода к моделированию на другие модели автомобилей с единичным производством на различных предприятиях автомобильной промышленности, прежде всего российских в рамках импортозамещения.

Список использованных источников

1. Статистика Госавтоинспекции. URL: http://stat.gibdd.ru/ (дата обращения: 30.01.2026).
2. *Мещеряков С. В., Арус Д.* Развитие концепции построения электромобилей различного назначения для городской транспортной инфраструктуры // Транспортные системы: Сб. трудов Международной науч.-практич. конф. – СПб.: СПбПУ, 2024. – С. 165-169. URL: https://elib.spbstu.ru/dl/2/i24-317.pdf/info (дата обращения: 11.12.2024).
3. *Мещеряков С. В., Арус Д.* Тенденции унификации дизайна электромобилей при единичном производстве // Наука в XXI веке: направления и тенденции развития: Сб. статей XXI Всероссийской науч. конф. – М.: Ростполиграф, 2024. – С. 81-83.
4. *Liu F., Ji X., Hu G., Gao J.* A novel shape-adjustable surface and its applications in car design // Applied Sciences, 2019. – Vol. 9 (11). – pp. 1-20.
5. *Liu F., Ji X., Gao J.* Extended SQ-Coons Surface and Its Application on Fairing Automobile Surface Design // Mathematical Problems in Engineering, 2020. – Vol. 1. – pp. 21-38.
6. *Hu G., Bo C., Wei G, Qin X.* Shape-adjustable generalized Bezier surfaces: Construction and its geometric continuity conditions // Applied Mathematics and Computation, 2020. – Vol. 378. – pp. 706-718.
7. *Aranburu A., Lozano D. J., Lizarraga I. A.* Reusability and flexibility in parametric surface-based models: a review of modeling strategies // Computer-Aided Design & Applications, 2021. – № 18 (4). – pp. 864-874.
8. Система проектирования Компас-3D. М.: Аскон, 2017. – 242 с.
9. *Мэлсбеков Н. М.* Сравнительный анализ возможности двух CAD-сред SolidWorks и Компас-3D, их достоинства и недостатки. Красноярск, 2013. – 128 с.
10. *Мещеряков С. В., Бортяков Д. Е., Арус Д., Опаров Н. А.* Практика графического моделирования и проектирования изделий в условиях единичного производства // Исследования. Инновации. Практика, 2025. – №1(14). – С. 124-127.
11. *Жулеева А. Л.* Коммуникационное продвижение высокотехнологической продукции (на примере электромобиля КАМА-1). – СПб.: СПбПУ, 2021. – 109 с. URL: https://elib.spbstu.ru/dl/3/2021/vr/vr21-2271.pdf/info (дата обращения: 22.09.2021).

GRAPHIC MODELING OF SURFACE PARTS OF TRANSPORT SYSTEMS USING COMPUTING METHODS

Sergey V. Mescheryakov, D. Sc.,
Danil E. Bortyakov, Ph. D. ,
Dima Arous,
Ivan S. Mescheryakov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29B
E-mail: serg-phd@mail.ru, bortyakov@mail.ru, demaarous@gmail.com,
vano1399_1399@mail.ru

Abstract. Actual problems of design of a transport machine external cabin are considered applying to electric cars. Main attention is paid to separate crossing parts of cabin surface and their smoothing. For that purpose, we used Russian graphic system Kompas-3D and computing methods of Coons modeling. The algorithms of evaluating the precision and quality of surface compound are suggested and the computing experiments are carried out using an electric car front fender as an example. The research is done at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University in the joint project with the KAMAZ Automobile Plant.

Keywords: electric car; body surface; smoothing parts; modeling; computing methods.

Транспортная логистика и управление цепями поставок

УДК 658.5
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-713

ПОТЕРИ РЕСУРСОВ В ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ: СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПО МЕТОДОЛОГИИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Мария Игоревна Абдулазянова,
Валерия Сергеевна Мацаренко,
Кира Дмитриевна Татаренко
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29Б
E-mail: mariyaabdulazyanova@gmail.com, matsarencko.lera2014@gmail.com, tatarenko.kira@bk.ru

Аннотация. Потери ресурсов в транспортно-логистической компании возникают одновременно в нескольких взаимосвязанных процессах – транспортировке, складировании, документообороте и работе персонала, – поэтому существующие работы по бережливому производству, описывающие потери для производства в целом или отдельные складские процессы, не дают целостной картины для полного операционного цикла такой компании. В работе типология восьми видов потерь – семи классических видов по Т. Оно и неиспользованного творческого потенциала персонала – адаптирована к циклу от формирования заказа на перевозку до доставки груза получателю. Получены следующие результаты: для каждого вида потерь определены типичные проявления и вероятные причины; показано, что причины наиболее значимых потерь – ожидания, транспортировки и избыточных запасов – носят организационный и информационный, а не технологический характер; для каждого вида потерь подобраны инструменты бережливого производства и приведены примеры их применения из опубликованной мировой практики производства и логистики; установлено, что устранение потерь одного вида требует согласованного применения нескольких инструментов, а неиспользованный творческий потенциал персонала – единственный вид потерь, устранение которого не требует инвестиций в оборудование и информационные системы. Статья носит методический характер: количественная оценка потерь на данных конкретной компании не проводилась и является направлением дальнейшего исследования.

Ключевые слова: бережливое производство; Lean; потери ресурсов; муда; транспортно-логистическая компания; управление ресурсами; цепи поставок; кайдзен.

1. Введение

Транспортно-логистические компании (ТЛК) – специфичный объект применения бережливого производства: в отличие от промышленного предприятия, где потери сосредоточены в производственном цикле,

деятельность ТЛК одновременно охватывает транспортировку, складское хранение, документооборот, таможенное оформление и персонал, что усложняет выявление и систематизацию потерь ресурсов.

Концепция бережливого производства и типология потерь были разработаны для производства [1 – 4] и позднее распространены на логистику и складское хозяйство [5 – 9]; однако систематизация всех восьми видов потерь применительно к полному операционному циклу ТЛК – от заказа до доставки груза получателю – в рассмотренной литературе не обнаружена (подробный обзор – раздел 2).

Цель статьи – систематизировать восемь видов потерь ресурсов (7+1 муда), характерных для ТЛК, указать для каждого вида типичные проявления в операционном цикле и вероятные причины, а также предложить направления снижения потерь.

Задачи: 1) проанализировать подходы к типологии потерь Lean в логистике; 2) адаптировать типологию 7+1 муда к циклу ТЛК; 3) систематизировать проявления и причины потерь; 4) сформулировать направления их снижения.

2. Обзор существующих подходов

Т. Оно выделил семь видов потерь производственной системы Toyota – перепроизводство, ожидание, лишнюю транспортировку, излишнюю обработку, избыточные запасы, лишние движения и дефекты [1]; Дж. Вумек и Д. Джонс распространили принципы бережливого производства за пределы автомобилестроения [2]. М. Имаи ввёл кайдзен и связанный с ним восьмой, «западный» вид потерь – неиспользованный творческий потенциал персонала [3]; Дж. Лайкер показал неотделимость устранения потерь от культуры организации [4].

П. Хайнс и Н. Рич адаптировали картирование потока создания ценности к цепям поставок [5]; методология Lean Six Sigma (DMAIC)[1] применена к складским процессам 3PL-провайдера[2] [6], а метод lean warehousing выявил на складе простой продукции и длительный поиск товара [7]. Систематические обзоры подтверждают положительную связь Lean с

1 Lean Six Sigma (англ.) – «бережливое производство плюс шесть сигм»: подход, объединяющий бережливое производство и статистические методы управления качеством. DMAIC (англ. Define, Measure, Analyze, Improve, Control) – цикл улучшения процессов: определить, измерить, проанализировать, улучшить, контролировать.

2 3PL (англ. third-party logistics) – логистика третьей стороны: передача логистических функций стороннему оператору.

конкурентоспособностью цепи поставок [8] и потенциал цифровых двойников [9]. Отдельные проявления потерь ТЛК исследованы точечно: простой автотранспорта на таможенных пунктах пропуска изучен статистически [10], цифровизация документооборота и диспетчеризации рассматривается как направление сокращения потерь на ожидание и излишнюю обработку [11], а причины классических семи видов потерь обобщены отдельно как преимущественно организационные [12].

Типология потерь разработана для производства и требует адаптации к ТЛК; работы по логистике рассматривают отдельные процессы или общие обзоры; точечные исследования ТЛК описывают отдельные проявления. Совместной систематизации всех восьми видов потерь для полного цикла ТЛК эти работы не дают – этому посвящены разделы 3–5.

3. Методический подход

Систематизация потерь строится на типологии семи классических видов потерь Toyota [1] и восьмого вида – неиспользованного творческого потенциала персонала [3] – применительно к операционному циклу ТЛК: приём заказа на перевозку; транспортировка груза (включая таможенное оформление); складские операции; документооборот на каждом этапе; деятельность персонала.

Для каждого вида потерь определялись типичное проявление в цикле ТЛК и вероятные причины – организационные, технологические или информационные, по признакам первоисточника классификации [1] с учётом уточнений литературы по Lean в логистике [5 – 7]. Результаты систематизации приведены в разделе 4, на их основе в разделе 5 сформулированы направления снижения потерь.

4. Систематизация потерь ресурсов в транспортно-логистической компании

Потери ресурсов, характерные для транспортно-логистической компании, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Виды потерь (муда) в транспортно-логистической компании

№	Вид потерь	Проявление в ТЛК	Вероятные причины
1	Перепроизводство	Партии перевозок формируются с запасом сверх фактических заявок клиента; груз выходит со склада раньше согласованной даты отгрузки	Плановые показатели опираются на прогноз, а не на подтверждённый заказ; премирование диспетчеров привязано к числу рейсов, а не к точности сроков
2	Ожидание	Простой автопоездов в очереди на пунктах таможенного контроля [10]; очереди на погрузочно-разгрузочных фронтах; груз ждёт оформления накладных	Расписания грузоотправителя, перевозчика и склада-получателя не согласованы; окна подачи транспорта не бронируются заранее; бумажный документооборот задерживает выпуск груза [11]
3	Транспортировка	Груз проходит через лишние склады-хабы; маршрут отклоняется от кратчайшего; транспорт возвращается из рейса без обратной загрузки	Компания не использует систему управления перевозками (TMS)[3] [11]; складская сеть сложилась исторически; рейс планируется вручную, без поиска попутного груза
4	Излишняя обработка	Одна партия проверяется на нескольких этапах цепи; товар переупаковывается повторно; на отправку требуется избыточное число подписей	Звенья цепи поставок не доверяют результатам контроля друг друга; упаковочные стандарты не унифицированы; регламенты документооборота давно не пересматривались [12]
5	Запасы	Страховой запас превышает расчётную потребность; терминалы и СВХ заполнены сверх оборота; техника простаивает в ожидании использования	Прогноз спроса строится с большой погрешностью; сроки поставки от контрагентов нестабильны; принцип JIT[4] не применяется при пополнении запасов [1, 2]
6	Лишние движения	Персонал и складская техника перемещаются по нерациональным траекториям между зонами приёмки, хранения и отгрузки	Планировка склада не оптимизирована под товарные потоки; адресное хранение и типовые маршруты движения отсутствуют [7]
7	Дефекты	Груз повреждается при перевозке, погрузке или хранении; в документах встречаются ошибки; происходит пересортица товара	Груз недостаточно закреплён и защищён; температурный режим нарушается; персонал допускает ошибки при оформлении документов; входной контроль слабый
8	Неиспользованный творческий потенциал	Линейный персонал не привлекается к обсуждению улучшений; поступившие предложения не доводятся до внедрения	Формальный канал сбора идей от линейного персонала отсутствует; стиль управления не поощряет инициативу снизу; мотивация к рационализаторству низкая [3, 4]

3 TMS (англ. Transportation Management System) – система управления перевозками.
4 JIT (англ. Just-in-Time) – «точно вовремя»: принцип поставки материалов и грузов в нужном количестве и в нужное время.

Перепроизводство в ТЛК связано не столько с нехваткой информации о спросе, сколько с системой мотивации: KPI[5], привязанные к тоннажу и числу рейсов, поощряют объём в ущерб точности исполнения заказа. Ожидание – наиболее изученный в литературе вид потерь: простой на таможенных пунктах пропуска формируется очередью на оформление, а не самой процедурой контроля [10], поэтому его сокращение – задача организационная (синхронизация графиков, электронный документооборот [11]), а не ускорение физических операций. Потери на транспортировку тесно связаны с потерями на ожидание: порожний пробег и лишние перегрузки груза – следствие того, что рейс планируется как отдельная единица, а не элемент сети с возможной обратной загрузкой [11].

Излишняя обработка в ТЛК возникает на стыках между звеньями цепи поставок, где каждое звено дублирует контроль предыдущего, не доверяя его результатам; устраняется пересмотром регламентов и унификацией стандартов, а не техническим перевооружением [12]. Избыточные запасы – оборотная сторона нестабильности сроков поставки от контрагентов: переход к принципу «точно вовремя» (JIT) [1, 2] снижает запасы только при повышении точности прогноза спроса, иначе лишь переносит потери в вид ожидания. Лишние перемещения персонала и техники внутри склада наиболее чувствительны к планировке объекта и устраняются картированием потока и перепланировкой зон хранения без капитальных вложений [7].

Дефекты в ТЛК распределены между физическим повреждением груза и ошибками документооборота; обе группы причин – человеческий фактор и слабый входной контроль – требуют изменения процедур приёмки и передачи груза между участниками цепи. Неиспользованный творческий потенциал – единственный из восьми видов потерь, устранение которого не требует инвестиций в оборудование или ИТ-системы: линейный персонал уже располагает нужной информацией, для получения которой достаточно формального канала обратной связи по аналогии с практикой кайдзен [3, 4].

5. Направления снижения потерь ресурсов в ТЛК

По результатам систематизации, представленной в разделе 4, для каждого вида потерь предложен набор инструментов бережливого производства, направленных на его устранение, и приведены примеры их применения на практике (таблица 2).

5 KPI (англ. Key Performance Indicators) – ключевые показатели эффективности.

Таблица 2. Инструменты бережливого производства для снижения потерь ресурсов в ТЛК

№	Вид потерь	Инструменты Lean	Примеры применения на практике
1	Перепроизводство	Вытягивающая система (Kanban); выравнивание объёма отгрузок (Heijunka); переход на принцип «точно вовремя» (JIT) при формировании партий [1, 2]	Toyota Production System: канбан-карточки между конвейером и поставщиками ограничивают выпуск и поставку партий фактическим потреблением, без производства «про запас» [1]
2	Ожидание	Картирование потока создания ценности (VSM)[6] [5]; слот-бронирование окон погрузки/разгрузки; SMED[7] ; электронный документооборот и платформы диспетчеризации [11]	DMAIC-проект на складе 3PL-оператора: эффективность цикла склада (PCE)[8] выросла с 39,8 % до 70,4 %, производительность – на 76,9 % [6]
3	Транспортировка	Система управления перевозками (TMS) и маршрутизация [11]; VSM для устранения избыточных складов-хабов [5]; консолидация партий и поиск обратной загрузки	Система маршрутизации ORION в UPS ежегодно экономит порядка 100 млн миль пробега и свыше 300 млн долл. США операционных затрат [13]
4	Излишняя обработка	Стандартизированная работа и унификация регламентов документооборота; визуальный менеджмент; пока-ёкэ против дублирующего контроля	Тот же DMAIC-проект на складе 3PL-оператора устранил дублирующие проверки и избыточные согласования [6]
5	Запасы	Принцип JIT и вытягивающая система (Kanban) [1, 2]; выравнивание графика поставок (Heijunka); VSM для расчёта нормативного страхового запаса [5]	Тот же принцип канбан в Toyota Production System ограничивает объём запасов числом карточек, находящихся в обороте [1]
6	Лишние движения	5S[9] – организация рабочего пространства склада; диаграмма «спагетти» и картирование потока; адресное хранение [7]	Lean warehousing выявил простой продукции на полу склада и длительный поиск товара; устранение этих проявлений сократило время складских операций [7]

6 VSM (англ. Value Stream Mapping) – картирование потока создания ценности.

7 SMED (англ. Single-Minute Exchange of Die) – быстрая переналадка: сокращение времени перехода от одной операции к другой.

8 PCE (англ. Process Cycle Efficiency) – эффективность цикла процесса: доля времени, добавляющего ценность, в общем времени процесса.

9 5S – система организации рабочего места из пяти шагов (по японским словам seiri, seiton, seiso, seiketsu, shitsuke).

Продолжение табл. 2

№	Вид потерь	Инструменты Lean	Примеры применения на практике
7	Дефекты	Дзидока и пока-ёкэ; всеобщее обслуживание оборудования (TPM)[10]; входной контроль по стандартизированным чек-листам	Сканирование штрихкодов и RFID-меток[11] при приёмке и отгрузке – реализация принципа poka-yoke, предотвращающая пересортицу товара [14]
8	Неиспользованный творческий потенциал	Кайдзен – система сбора и внедрения предложений от линейного персонала; регулярные gemba-обходы [3, 4]	Кайдзен-тэйан в Toyota: в 1973 г. – свыше 250 тыс. предложений от 43 тыс. сотрудников; доля принятых выросла с 29 % до 76 % [15]

Примеры в таблице 2 относятся к опубликованным случаям из мировой практики производства и логистики (Toyota, UPS, 3PL-операторы складов [1, 6, 7, 13 – 15]) и иллюстрируют универсальность инструментов, а не измерения на объекте настоящего исследования. Инструменты частично пересекаются между видами потерь (например, картирование потока создания ценности применимо к ожиданию, транспортировке и запасам), что отражает взаимосвязанность процессов ТЛК: устранение потерь одного вида, как правило, требует согласованного применения нескольких инструментов. Количественная оценка экономического эффекта требует данных конкретного предприятия и является предметом дальнейшего исследования.

6. Заключение

В статье систематизированы восемь видов потерь ресурсов (7+1 муда), характерных для ТЛК, для каждого вида приведены типичные проявления в операционном цикле – от заказа до доставки – и вероятные причины. Наиболее критичны потери на ожидание, транспортировку и избыточные запасы: они напрямую увеличивают срок доставки и затраты на хранение, а их причины носят организационный и информационный, а не технологический характер. Предложенные направления снижения потерь – цифровизация, стандартизация документооборота и упаковки, вовлечение персонала по аналогии с кайдзен – формируют основу для дальнейшего количественного исследования на данных конкретной ТЛК.

10 TPM (англ. Total Productive Maintenance) – всеобщее обслуживание оборудования.

11 RFID (англ. Radio-Frequency Identification) – радиочастотная идентификация.

Список использованных источников

1. *Ohno T.* Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. – Portland, OR: Productivity Press, 1988, 176 p.
2. *Womack J. P., Jones D. T.* Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. – New York: Simon & Schuster, 1996, 350 p.
3. *Imai M.* Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success. – New York: McGraw-Hill, 1986, 259 p.
4. *Liker J. K.* The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer. – New York: McGraw-Hill, 2004, 330 p.
5. *Hines P., Rich N.* The seven value stream mapping tools // International Journal of Operations & Production Management. – 1997. – Vol. 17. – Issue 1. – Pp. 46-64. DOI: 10.1108/01443579710157989.
6. *Adeodu A. O., Maladzhi R., Kana-Kana Katumba M. G., Daniyan I. A.* Development of an improvement framework for warehouse processes using Lean Six Sigma (DMAIC) approach: A case of third-party logistics (3PL) services // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – Issue 4. – Art. e14915. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14915.
7. *Efendi M. Y., Aryanny E.* An analysis of waste in the warehousing flow process with lean warehousing method at PT. XYZ [Электронный ресурс] // Tekmapro: Jurnal Teknik Industri. – 2024. – Vol. 19. – Issue 2. DOI: 10.33005/tekmapro.v19i2.398. URL: https://tekmapro.upnjatim.ac.id/index.php/tekmapro/article/view/398 (дата обращения: 16.09.2026).
8. *Khawka Z. M. H., Rahman A. A., Sidek S. B., Ahmed S. A. B., Al-Hadeethi R. H. F., Al-Dabbagh T.* Effect of lean supply chain on competitive advantage: a systematic literature review // Cogent Business & Management. – 2024. – Vol. 11. – Issue 1. – Art. 2370445. DOI: 10.1080/23311975.2024.2370445.
9. *Guo D., Mantravadi S.* The role of digital twins in lean supply chain management: review and research directions // International Journal of Production Research. – 2025. – Vol. 63. – Issue 5. DOI: 10.1080/00207543.2024.2372655.
10. *Горбачев П. Ф., Немна Т. В.* Оценка параметров распределения продолжительности простоя автомобилей на таможенных пунктах пропуска при перевозках грузов между Украиной и Россией // Автомобильный транспорт. – 2014. – №34. – С. 65-69.
11. *Федотова С. Н.* Цифровизация транспортно-логистических услуг [Электронный ресурс] // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2019. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11407. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-transportno-logisticheskih-uslug (дата обращения: 16.09.2026).
12. *Алиулова Л. Р.* Причины и последствия семи видов потерь на производстве. Практика применения [Электронный ресурс] // Экономика, предпринимательство и право. – 2012. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prichiny-i-posledstviya-semi-vidov-poter-na-proizvodstve-praktika-primeneniya (дата обращения: 16.09.2026).
13. «ORION» delivers success for UPS [Электронный ресурс] // ORMS Today / INFORMS. – 2016. URL: https://pubsonline.informs.org/do/10.1287/orms.2016.03.10/full/ (дата обращения: 17.09.2026).

14. Poka-yoke explained in 5 examples [Электронный ресурс] // Interlake Mecalux Blog. URL: https://www.interlakemecalux.com/blog/poka-yoke (дата обращения: 17.09.2026).
15. Toyota Company Suggestion Program Vigorously Supported by Employees [Электронный ресурс] // Toyota Motor Corporation Official Global Website. URL: https://global.toyota/en/detail/7756353 (дата обращения: 17.09.2026).

LOSSES OF RESOURCES IN A TRANSPORT AND LOGISTICS COMPANY: A SYSTEMATIZATION BASED ON THE LEAN PRODUCTION CONCEPT

Mariia I. Abdulazianova,
Valeria S. Matsarenko,
Kira D. Tatarenko
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnicheskaya str., 29B
E-mail: mariyaabdulazyanova@gmail.com, matsarencko.lera2014@gmail.com, tatarenko.kira@bk.ru

Abstract. Resource losses in a transport and logistics company arise simultaneously in several interrelated processes – transportation, warehousing, document flow and personnel work – so existing lean production studies, which describe waste for manufacturing in general or individual warehouse processes, do not give a complete picture for the full operating cycle of such a company. In this paper the typology of eight types of waste – Ohno's seven classical types and unused employee creativity – is adapted to the cycle from placing a transportation order to delivering the cargo to the consignee. The following results are obtained: typical manifestations and probable causes are identified for each type of waste; it is shown that the causes of the most significant losses – waiting, transportation and excess inventory – are organizational and informational rather than technological; lean tools are selected for each type of waste and examples of their use from published world practice of manufacturing and logistics are given; it is established that eliminating one type of waste requires a coordinated application of several tools, and unused employee creativity is the only type of waste whose elimination requires no investment in equipment or information systems. The paper is methodological in nature: a quantitative assessment of losses using data from a specific company was not performed and is a direction for further research.

Keywords: lean production; Lean; resource losses; muda; transport and logistics company; resource management; supply chains; kaizen.

УДК 656.07:658+711.4
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-714

ВЗАИМОВЛИЯНИЕ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА

Галина Юрьевна Бурлакова, канд. техн. наук,
Наталья Сергеевна Захаренко, канд. экон. наук
«Приазовский государственный технический университет» – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
ДНР, 287500, Мариуполь, ул. Университетская, 7
E-mail: Burlakovagu@yandex.ru, ftl-pstu@yandex.com

Аннотация. Городская транспортная логистика и градостроительная политика представляют собой две взаимосвязанные сферы, определяющие качество жизни и экономическую эффективность городской среды. В статье исследуются характер и механизмы их взаимовлияния в условиях российских городов, где планировочные структуры несут следы советского периода, а транспортные системы сталкиваются с вызовами растущей автомобилизации. Рассматриваются проблемы дезинтеграции транспортного и территориального планирования, анализируются факторы, препятствующие формированию компактных, функционально разнообразных и доступных городских пространств. Выявлены ключевые направления согласования логистических и градостроительных решений – от синхронизации документов планирования до внедрения концепции транспортно-ориентированного развития. Обоснована необходимость перехода от автомобиле-ориентированной модели к интегрированной системе, в которой приоритет отдается устойчивой мобильности, повышению доступности территорий и созданию среды для человека.

Ключевые слова: транспортная логистика; градостроительство; городское планирование; транспортная инфраструктура; землепользование; устойчивая мобильность; территориальное планирование.

1. Введение

Территориально-транспортное планирование представляет собой область, где пересекаются интересы множества участников городской жизни – от органов власти и застройщиков до конечных пользователей инфраструктуры. Однако в российской практике этот процесс нередко характеризуется разрывом между решениями в сфере транспорта и землепользования, что ведет к формированию неэффективных планировочных структур и нарастанию транспортных проблем. Начиная с 2022 года, когда в Транспортной стратегии Российской Федерации акцент был смещен с

подвижности населения на пространственную связанность территорий, стала очевидной необходимость глубокой интеграции логистических и градостроительных подходов [1].

Взаимное влияние транспортной системы и пространственной организации города проявляется в нескольких измерениях: транспортная инфраструктура формирует каркас урбанизированной территории, определяет направления и интенсивность развития застройки, в то время как характер землепользования, плотность и функциональное разнообразие застройки задают спрос на перемещения и, следовательно, требования к транспортной сети. Российские города, унаследовавшие от советского периода растянутые территории и периферийные кластеры высокой плотности, особенно остро нуждаются в согласовании этих двух направлений [2].

2. Взаимодействие транспортной логистики и градостроительства

Устойчивая мобильность как парадигма городского развития предполагает не столько увеличение скорости передвижения, сколько повышение доступности мест притяжения населения. Достижение доступности обеспечивается двумя путями: совершенствованием транспортной сети и повышением близости объектов за счет компактности, смешанного функционального зонирования – характеристик, регулируемых политикой землепользования [3]. Впрочем, в российских документах стратегического планирования этот баланс зачастую нарушен. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года, провозглашая приоритет пространственной связанности, делает акцент на технических аспектах (экологический класс подвижного состава, пропускная способность дорог), игнорируя значимость координации с территориальным планированием.

Концепция транспортно-ориентированного развития предлагает механизм интеграции: новая застройка сосредотачивается в зоне пешеходной доступности от узлов общественного транспорта, формируя компактные многофункциональные районы. Такой подход снижает зависимость от личного автомобиля, сокращает протяженность поездок, способствует повышению интенсивности использования городской территории [4]. Однако реализация требует синхронизации решений на уровне генеральных планов, программ комплексного развития транспортной инфраструктуры и правил землепользования – то есть инструментов, находящихся в ведении различных органов власти и разрабатываемых в разные сроки.

Ключевой проблемой российской практики остается преобладание реактивного подхода: транспортная инфраструктура создается в ответ на уже возникшие заторы, новые жилые районы размещаются без предварительной оценки транспортной емкости территории, маршрутные сети общественного транспорта формируются под давлением коммерческих перевозчиков. В результате генеральные планы лишены достаточного транспортного обоснования, а документы транспортного планирования не способны влиять на пространственную структуру города [5].

Механизмы влияния транспортной инфраструктуры на застройку и землепользования. Развитие транспортной инфраструктуры изменяет градостроительную ценность территории, стимулируя инвестиции в застройку вдоль основных транспортных коридоров. Чем выше транспортная доступность участка, тем привлекательнее он для различных видов деятельности – от жилищного строительства до размещения коммерческих объектов [6]. Эффект концентрации населения и экономической активности вдоль магистралей может принимать различные формы:

– линейное развитие города вдоль автомагистралей или железнодорожных путей, формирующее «коридоры роста»;

– увеличение плотности застройки в зоне станций метро и транспортно-пересадочных узлов;

– перепрофилирование промышленных территорий под жилую или коммерческую застройку после открытия новых транспортных связей;

– повышение этажности и интенсивности использования земельных участков в районах с развитым общественным транспортом.

Развитие автомобильной инфраструктуры, напротив, способствует экстенсивному росту городов: расширение дорожной сети и увеличение площади парковок стимулируют застройку на периферии, что ведет к потере компактности городской среды, фрагментации пространства и росту зависимости от личного автомобиля [7]. Российские города, где доля личного транспорта в пассажиропотоках продолжает расти, особенно подвержены этой тенденции – недостаточное развитие общественного транспорта в малых и средних городах снижает доступность территорий для неавтомобилизированного населения.

Наземный общественный транспорт влияет на характер застройки иначе: создание скоростных маршрутов, легкорельсового транспорта или выделенных полос для автобусов делает возможным формирование компактной среды средней и высокой плотности. Станции и остановки

становятся центрами притяжения, вокруг которых целесообразно размещать объекты повседневного спроса, торговые и деловые функции [8]. Впрочем, в российской практике строительство новых линий метро или скоростного трамвая редко сопровождается изменением правил застройки прилегающих территорий – потенциал транспортной инфраструктуры для структурирования городского пространства остается нереализованным.

Транспортные барьеры – крупные автомагистрали, железнодорожные пути, развязки – разделяют городские районы, затрудняют пешеходную связность, создают зоны шумового и экологического загрязнения. Минимизация этих негативных эффектов требует встраивания в проекты транспортной инфраструктуры мер по обеспечению проницаемости среды: надземных и подземных переходов, шумозащитных экранов, озеленения вдоль магистралей.

Влияние градостроительных решений на транспортную логистику. Характер застройки и землепользования предопределяет спрос на перемещения: плотность застройки, функциональное разнообразие территории, размещение центров активности формируют корреспонденции поездок – их объем, направление, частоту, выбор видов транспорта. Компактное смешанное использование территории сокращает средние расстояния поездок, повышает долю пеших и велосипедных передвижений, снижает нагрузку на транспортную систему. Монофункциональные жилые районы на периферии, напротив, генерируют маятниковую миграцию – ежедневные поездки на работу в центр города, создающие пиковые нагрузки на транспорт [9].

Размещение крупных объектов – торговых центров, деловых кварталов, спортивных и культурных объектов – без учета пропускной способности прилегающей улично-дорожной сети и маршрутов общественного транспорта приводит к локальным заторам. Градостроительные регламенты, определяющие минимальное количество парковочных мест, также влияют на выбор транспорта: избыточное количество парковок стимулирует использование личного автомобиля, тогда как ограничение парковочного предложения в сочетании с развитым общественным транспортом способствует переходу на более устойчивые виды мобильности.

Структура функционального зонирования, закрепленная в генеральных планах и правилах землепользования и застройки, определяет пространственное распределение мест приложения труда, объектов образования, здравоохранения, рекреации. Советская градостроительная традиция, основанная на жестком зонировании и формировании крупных

монофункциональных массивов, создала планировочные структуры с избыточными транспортными потоками. Переход к смешанному зонированию и формированию полицентричных систем расселения – где рабочие места, услуги и жилье находятся в шаговой или велосипедной доступности – позволяет снизить транспортную нагрузку и повысить качество среды [9].

Плотность застройки прямо влияет на экономическую целесообразность развития общественного транспорта: высокая плотность обеспечивает достаточный пассажиропоток, делая возможным создание частых и разветвленных маршрутов, скоростных видов транспорта. Низкая плотность, характерная для пригородов и периферийных районов, затрудняет организацию рентабельного транспортного обслуживания, усиливая зависимость от личного автомобиля.

Проблемы дезинтеграции транспортного и градостроительного планирования в России. Нормативная база территориального планирования в России, основанная на Градостроительном кодексе, предусматривает несколько видов документов: генеральные планы, правила землепользования и застройки, проекты планировки. Транспортное планирование представлено комплексными схемами организации дорожного движения, документами планирования регулярных перевозок. Однако эти документы разрабатываются разными ведомствами, в разные сроки, часто без достаточной координации [10].

Программа комплексного развития транспортной инфраструктуры является инструментом краткосрочного планирования и по своему статусу подчинена генеральному плану – при изменении генерального плана программа должна быть приведена в соответствие. Таким образом, данная программа не может повлиять на решения, заложенные в генеральном плане, и усилить интеграцию транспорта и землепользования. Более того, большинство программ развития транспортной инфраструктуры фокусируются на инженерных параметрах, не учитывая влияние землепользования на спрос на поездки.

Комплексные транспортные схемы, разрабатывавшиеся в советский период как обязательные документы, в постсоветское время утратили этот статус и превратились в научно-исследовательские работы – их результаты могут быть использованы при корректировке генерального плана или проигнорированы. К тому же с появлением новых документов развития транспортной инфраструктуры многие города отказываются от разработки комплексной транспортной схемы. Это привело к ситуации, когда планы

транспортной инфраструктуры появляются в ответ на возможность федерального софинансирования, а не на основе научно обоснованной стратегии развития.

Отсутствие синхронизации документов во времени усугубляет проблему: генеральные планы разрабатываются на срок 20 – 25 лет, транспортные схемы – на 10 – 15 лет, программы комплексного развития транспортной инфраструктуры – на 10 лет. В результате транспортные решения, заложенные в генеральном плане, могут базироваться на устаревших данных, а новые транспортные проекты не находят отражения в документах территориального планирования до их очередной корректировки.

Еще одна проблема – использование математических моделей транспортных систем, которые включают только данные о транспортной инфраструктуре и маршрутах, но не учитывают характеристики землепользования: плотность застройки, функциональное разнообразие, размещение центров активности. Такие модели позволяют применять чисто инженерный подход – измерение пропускной способности улиц, загруженности дорог, – но не дают возможности оценить влияние планировочных решений на транспортную систему [2].

Направления интеграции транспортной логистики и градостроительства. Переход к интегрированному территориально-транспортному планированию требует изменений на нескольких уровнях: нормативно-правовом, организационном, методическом. Первое направление – законодательное закрепление обязательности разработки комплексной транспортной схемы до утверждения или корректировки генерального плана. Схема должна включаться в состав обосновывающих материалов и служить основой для принятия решений о функциональном зонировании, плотности и характере застройки [10].

Создание координирующих структур в городских администрациях – групп экспертов по транспорту, отвечающих за стратегию развития и координацию всех вопросов, связанных с транспортной системой и землепользованием, – позволит преодолеть ведомственную разобщенность. Важно наладить постоянное взаимодействие между службами, ответственными за территориальное планирование, развитие транспорта, управление дорожным движением, организацию пассажирских перевозок.

Синхронизация сроков разработки документов территориального и транспортного планирования обеспечит их согласованность. Альтернативный подход – внедрение мастер-планов как инструмента среднесрочного

планирования (на 5 – 10 лет), более гибких и адаптивных к быстро меняющимся условиям. Мастер-планы, ориентированные на конкретные городские территории или агломерации, могут объединить транспортное и градостроительное проектирование, обеспечивая согласованное размещение жилых районов и рабочих мест, минимизацию транспортных перемещений, развитие эффективной транспортной сети [11].

Использование комплексных транспортных моделей, учитывающих характеристики землепользования (плотность, функциональное разнообразие, размещение объектов притяжения), позволит оценивать влияние градостроительных решений на транспортную систему еще на стадии планирования. Моделирование сценариев развития – сравнение вариантов размещения застройки, функционального зонирования, развития транспортной инфраструктуры – дает возможность выбрать наиболее эффективные решения.

Внедрение принципов транспортно-ориентированного развития в градостроительные регламенты предполагает установление повышенной плотности и смешанного функционального зонирования в зонах пешеходной доступности (400–800 метров) от станций метро, платформ электричек, транспортно-пересадочных узлов. Регламенты должны стимулировать размещение в этих зонах жилья, офисов, торговли, услуг, ограничивая при этом монофункциональные объекты, генерирующие интенсивный автомобильный трафик (крупные торговые центры, логистические комплексы).

Приоритет развития общественного транспорта и немоторизованных видов передвижения требует инвестиций в скоростные линии (метро, легкорельсовый транспорт, скоростной автобус), создание удобных пересадочных узлов, повышение комфорта и регулярности движения. Создание безопасных и комфортных пешеходных и велосипедных маршрутов, развитие велоинфраструктуры стимулирует переход на более устойчивые виды мобильности, особенно для коротких поездок внутри районов.

Управление автомобильным трафиком через регулирование парковочного пространства – введение платных парковок в центральных районах, ограничение количества парковочных мест в новых жилых комплексах, создание перехватывающих парковок на въездах в город – позволяет сдерживать рост использования личного автомобиля, делая общественный транспорт более конкурентоспособным.

Редевелопмент неэффективно используемых территорий – промышленных зон, депо, гаражных кооперативов – в многофункциональные районы с развитым общественным транспортом способствует уплотнению городской

ткани, сокращению транспортных расстояний, повышению эффективности использования инфраструктуры. Такие проекты должны сопровождаться развитием транспортной инфраструктуры: строительством новых станций, маршрутов, улучшением пешеходной связности с прилегающими районами.

Прямой перенос существующих моделей европейских городов на российскую почву затруднен различиями в правовых системах, формах собственности на землю, административных практиках. Однако принципы могут быть адаптированы: включение транспортных критериев в оценку проектов застройки, стимулирование девелоперов к созданию объектов вблизи узлов общественного транспорта через градостроительные преференции (повышенная этажность, плотность), требование обязательной оценки транспортного воздействия для крупных проектов.

В Москве и Санкт-Петербурге накоплен опыт создания транспортно-пересадочных узлов, интегрирующих различные виды транспорта и торгово-общественные функции – это шаг в направлении концепции транспортно-ориентированного. Региональные центры в городах: Казань, Екатеринбург, Новосибирск – разрабатывают мастер-план и транспортные стратегии, однако их реализация сталкивается с недостатком финансирования, отсутствием координации между различными уровнями власти, сопротивлением застройщиков изменению устоявшихся практик.

3. Заключение

Взаимовлияние городской транспортной логистики и градостроительства представляет собой сложный процесс, где каждое решение в одной сфере порождает последствия в другой. Российские города, унаследовав от советского периода растянутые планировочные структуры и столкнувшись с ростом автомобилизации, нуждаются в переходе от разрозненного планирования к интегрированному подходу, объединяющему транспортную и территориальную политику.

Основные направления такого перехода включают:

– законодательное закрепление обязательности транспортного обоснования генеральных планов через комплексные транспортные схемы;

– создание координирующих структур в городских администрациях, отвечающих за согласование транспортного и территориального планирования;

– синхронизацию сроков разработки документов планирования, внедрение мастер-планы как инструмента среднесрочной интеграции;

– использование комплексных транспортных моделей, учитывающих характеристики землепользования;

– внедрение принципов транспортно-ориентированного развития в градостроительные регламенты;

– приоритетное развитие общественного транспорта, пешеходной и велосипедной инфраструктуры;

– управление автомобильным трафиком через регулирование парковочного пространства;

– редевелопмент неэффективно используемых территорий в многофункциональные районы.

Переход к интегрированному территориально-транспортному планированию требует изменения управленческой культуры, профессиональной подготовки специалистов, межведомственной координации. Однако именно этот путь позволяет создавать города, в которых транспортная система поддерживает компактное, функционально разнообразное развитие, обеспечивает доступность территорий для всех групп населения, минимизирует экологическое воздействие и способствует повышению качества жизни. Необходимость такого перехода становится все более очевидной в условиях растущих вызовов урбанизации, изменения климата, социальных и экономических трансформаций – город будущего должен быть спроектирован как единая интегрированная система, где транспорт и застройка формируют гармоничную и устойчивую среду обитания.

Список использованных источников

1. *Пичугина Д. А., Антипин И. А.* Влияние транспортной инфраструктуры на развитие городской застройки и землепользования // Строительство и архитектура. 2024. № 3. С. 45–52.
2. *Савельева Е. О.* Устойчивая мобильность и (дез)интеграция развития систем городского землепользования и транспорта в городах России // Урбанистика. 2024. № 2. С. 130–137.
3. *Шестеров Е. А.* Создание координированной транспортной системы при территориально-транспортном планировании развития городских территорий // Строительство и архитектура. 2023. № 4. С. 88–96.
4. *Арифджанова Н. З., Назарова В. Х., Кенжаева Б. О.* Интегрированные городские транспортно-логистические системы как условие устойчивого развития городов // Транспорт и логистика. 2024. № 1. С. 34–42.

5. *Петрович М. Л., Истомина Л. Ю.* Комплексные транспортные схемы как обосновывающие документы генеральных планов крупных городов // Градостроительство. 2023. № 5. С. 67–74.
6. *Гагина И. С.* Планирование транспортной инфраструктуры для пространственного развития Саратовской агломерации // Региональное развитие. 2023. № 2. С. 45–53.
7. *Селезнева А. И., Горбунова В. С.* Проблемы транспортной инфраструктуры в планировке современных городов и пути их решения // Архитектура и градостроительство. 2013. № 6. С. 78–85.
8. *Кузнецов С. А., Николаев В. А*. Организационно-технические аспекты внедрения интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях // Экономика и бизнес. 2024. № 4. С. 110–118.
9. *Суманова А. Д.* Система территорий транспортно-ориентированного развития в г. Красноярске // Строительство и архитектура. 2018. № 2. С. 56–64.
10. *Владимирова О. Н., Морозова А. А.* К вопросу о международной практике развития транспортной инфраструктуры // Транспортные системы. 2023. № 3. С. 92–99.
11. *Лопасова В. С., Барсукова Н. И.* Развитие территориального брендинга в современном урбанистическом пространстве // ДИСК-2023: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. С. 141–144.

THE MUTUAL INFLUENCE OF URBAN TRANSPORT LOGISTICS AND URBAN PLANNING

Galina Y. Burlakova, Ph. D.,
Natalia S. Zakharenko, Ph. D.
«Priazovsky State Technical University» – a branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Moscow State University of Civil Engineering»
DNR, 287500, Mariupol, Universitetskaya str., 7
E-mail: Burlakovagu@yandex.ru, ftl-pstu@yandex.com

Abstract. Urban transport logistics and urban planning policy are two interrelated areas that determine the quality of life and economic efficiency of the urban environment. The article explores the nature and mechanisms of their mutual influence in the conditions of Russian cities, where planning structures bear traces of the Soviet period, and transport systems face the challenges of growing motorization. The problems of disintegration of transport and territorial planning are considered, factors that prevent the formation of compact, functionally diverse and accessible urban spaces are analysed. Key directions for coordinating logistics and urban planning solutions have been identified – from synchronizing planning documents to implementing the concept of transit-oriented development. The necessity of transition from a car-oriented model to an integrated system in which priority is given to sustainable mobility, increasing the accessibility of territories and creating an environment for people is substantiated.

Keywords: transport logistics, urban planning, city planning, transport infrastructure, land use, sustainable mobility, territorial planning.

Цифровая экономика

УДК 351+711.1+338.2:004
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-715

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ В РАМКАХ ИСПОЛНЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ЗАДАЧ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Альмира Нургалиевна Муфтахова, канд. филос. наук,
Иван Игоревич Семенов
Северо-Западный институт управления – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации
Россия, 199178, Санкт-Петербург, пр-кт Средний В.О., д. 57/43, литера А
E-mail: msmalmira@yandex.ru, isemenov-22@yandex.ru

Аннотация. В условиях стремительного развития цифровой экономики и нарастающей потребности жителей Санкт-Петербурга в качественном жилье, удобство которого определяется совокупностью характеристик, таких как наличие инфраструктуры, транспортной доступности и однородности зонирования городских территорий, а также повышения уровня качества расходования бюджетных средств, особую значимость приобретает цифровая трансформация государственного управления капитальным строительством. В ходе работы была выявлена значительная асимметрия размещения населения по районам города, выделены «полюса» максимальной демографической концентрации и сформулированы принципы доказательного планирования инфраструктуры. Выводы, сформулированные по результатам исследования, обосновывают переход строительного комплекса города от пассивного документооборота к проактивной аналитической среде, что способствует повышению адресности бюджетных расходов и сглаживанию территориальных диспропорций в качестве городской среды.

Ключевые слова: государственное управление; урбанистика; цифровая трансформация; BIM-модель.

1. Введение

Санкт-Петербург является мегаполисом, городом федерального значения, с колоссальными объёмами ежегодного городского заказа на возведение объектов социальной, транспортной и инженерной инфраструктуры, и вследствие чего сталкивается с комплексом системных проблем, которые зачастую характерны региональным центрам притяжения населения, иными словами. Одной из таковых является формирование общественного цифрового выбора в рамках территориального развития городских агломераций на базе капитального строительства.

Объект исследования – процессы цифровой трансформации в рамках исполнения государственных задач в Санкт-Петербурге.

Предмет исследования – направления по внедрению применение цифровых технологий в сферу капитального строительства в Санкт-Петербурге.

Цель научного исследования – на основе анализа процессов цифровой трансформации в рамках исполнения государственных задач в Санкт-Петербурге выявить направления применения цифровых технологий.

2. Обзор литературы

Становление теории агломерационных процессов представляет собой сложный синтез пространственной экономики, региональной науки и урбанистики, в рамках которого сформировался разветвлённый категориальный аппарат. Исходной точкой концептуализации послужили труды Макса Вебера [1], инкорпорировавшего в научный дискурс дефиницию агломерации как пространственной концентрации индустриальных единиц, реализуемой либо путём масштабирования отдельного предприятия, либо через кооперативное сближение прежде дисперсно расположенных производств.

В его интерпретации агломерационная экономия продуцируется редукцией удельных производственных затрат, тогда как противоположный вектор, то есть деагломерирование, будет детерминирован действием центробежных сил, которые в свою очередь порождают распределённые, а не точечные эффекты размещения. Вебер осуществил многомерную классификацию локализационных факторов, таких как транспортных тарифов, доступности сырьевых рынков, тем самым дифференцировав их по силе воздействия, универсальности и форме проявления.

По мере эволюции хозяйственных систем классические детерминанты локализации, выступали собой вещественные ресурсы, трудоёмкость, транспортные издержки, то есть подверглись эрозии своей объяснительной силы. Их место заняли параметры инфраструктурной насыщенности, императивы экологической устойчивости и нематериальные факторы размещения, охватывающие культурные индустрии, рекреационный потенциал и креативно-человеческий капитал региона.

Параллельно развивалась традиция, восходящая к Альфреду Маршаллу [2], который ещё на рубеже XIX–XX столетий охарактеризовал агломерацию как сосредоточение множества малых гомогенных фирм в пределах компактной локации. Именно Маршалл впервые артикулировал природу агломерационных экстерналий, проистекающих из формирования единого рынка сбыта, компрессии логистических издержек и интернализации знаний и технологических компетенций, циркулирующих между

хозяйствующими субъектами. Им были выделены урбанизационная, кластерная и диверсификационная составляющие агломерационного эффекта, при этом особый акцент делался на роли пространственной близости в интенсификации обмена неявным знанием и инновациями.

В отечественном научном пространстве проблематику агломерационных эффектов разрабатывали П. В. Воробьев, Н. Б. Давидсон, Н. В. Кисляк, П. Д. Кузнецов, Е. С. Куценко, С. Н. Растворцева, Л. Т. Снитко. Н. Н. Киселева, К. В. Барвин и А. В. Каратунов, интегрировав обширный массив эмпирических исследований, систематизировали три ключевых типа агломерационного выигрыша:

- во-первых, кооперационное использование локальных объектов, сервисов, поставщиков ресурсов и промежуточной продукции, а также трудовых ресурсов;

- во-вторых, компрессия трансакционных затрат, достигаемая через развитое предложение промежуточных товаров и позволяющая хозяйствующим субъектам оптимизировать издержки и улучшать финансовые метрики;

- в-третьих, агрегирование рабочей силы, выполняющее функцию амортизатора разнородных экономических шоков и способствующее стабилизации регионального рынка труда.

Новейшие концепции пространственного развития – теория полюсов роста Франсуа Перру, учение о центральных местах Вальтера Кристаллера, пространственная модель города Уильяма Алонсо, в которой они сопрягают агломерационный эффект с региональным ростом и морфологией экономического пространства [3]. Вместе с тем концептуальные схемы, развивающие полюсный подход, обнаруживают ряд уязвимостей.

Взгляды учёных в научных трудах тяготеют к чрезмерной генерализации и зачастую элиминируют уникальные социокультурные, экономические и институциональные особенности конкретных регионов, а механистическое применение универсальных шаблонов без учёта локального контекста способно генерировать неэффективные стратегии развития и обострять существующие диспропорции. Кроме того, данные теории недоучитывают новейшие формы пространственной организации – промышленные и региональные кластеры, сетевые структуры экономики, а также императивы резильентности и устойчивого развития.

3. Моделирование государственной информационной системы с учётом территориального распределения постоянного населения

Интеграция результатов анализа пространственной дифференциации трудовых доходов в цифровую модель государственного управления капитальным строительством позволяет перейти от реактивного латания инфраструктурных дефицитов к проактивному выравниванию условий жизни в различных районах мегаполиса. Цифровая трансформация, следовательно, выступает не только средством повышения эффективности строительного комплекса как такового, но и действенным механизмом смягчения территориального социально-экономического неравенства, обеспечивая адресное направление государственных инвестиций туда, где они способны произвести максимальный мультипликативный эффект как в экономическом, так и в социальном измерении, в рамках потребностей граждан Санкт-Петербурга.

Анализ территориального распределения постоянного населения выступает необходимым элементом информационной основы градостроительного планирования, особенно в контексте цифровой трансформации управления капитальным строительством [4]. Санкт-Петербург, обладая статусом города федерального значения, характеризуется сложной административно-территориальной структурой, включающей восемнадцать районов, в границах которых выделяются внутригородские муниципальные образования различных категорий.

По данным Петростата, общая численность постоянного населения Санкт-Петербурга составляет 5 652 922 человека[1] . Суммирование показателей по входящим в состав районов муниципальным образованиям позволило получить агрегированные величины численности населения административных районов, на основе которых выполнено их ранжирование по демографическому весу.

Ранговый ряд выстраивается от наибольшего значения к наименьшему, что даёт возможность оценить степень концентрации жителей в отдельных пространственных единицах. Первую позицию с существенным отрывом занимает Приморский район, население которого достигает 714,85 тыс. человек, что эквивалентно 12,65 % от общегородской численности. За ним

[1] *Численность населения Санкт-Петербурга в разрезе муниципальных образований по состоянию на 1 января 2025 года* [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://78.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/СПб%20числ%20на%2001.01.2025%20по%20МО%20.pdf (дата обращения: 14.09.2026).

следуют Невский район с показателем 556,88 тыс. человек и долей 9,85 %, а также Выборгский район, где проживает 551,93 тыс. человек, или 9,76 % населения мегаполиса. Замыкает четвёрку лидеров Калининский район, насчитывающий 532,97 тыс. жителей и концентрирующий 9,43 % горожан. В совокупности указанные четыре района аккумулируют свыше 2,35 млн. человек, что составляет почти 42 % населения Санкт-Петербурга, свидетельствуя о выраженной неоднородности расселения.

Противоположный полюс образуют районы с минимальной демографической нагрузкой. Наименьшая численность зафиксирована в Кронштадтском районе, где проживает 44,66 тыс. человек, или лишь 0,79 % общего населения. Незначительный вес имеют также Курортный район – 84,31 тыс. человек (1,49%) и Петроградский район – 118,21 тыс. человек (2,09%). Срединное положение занимают Красносельский, Фрунзенский, Красногвардейский, Московский, Кировский и Пушкинский районы, доли которых варьируются в пределах от 4,9 % до 7,8 %.

Представленная дифференциация демонстрирует существенную асимметрию в размещении населения по территории мегаполиса, что в свою очередь также раскрывается в исследовательской работе учёного СЗИУ РАНХиГС [5]. Концентрация значительной части жителей в ограниченном числе районов предъявляет повышенные требования к обеспеченности этих территорий объектами социальной, транспортной и инженерной инфраструктуры.

Вместе с тем малозаселённые периферийные районы, такие как Курортный и Кронштадтский, характеризуются иными структурными потребностями, связанными с сезонной рекреационной нагрузкой или ограниченной транспортной доступностью. Учёт подобной демографической неоднородности при формировании адресных инвестиционных программ и размещении объектов капитального строительства позволяет повысить адресность бюджетных расходов, а применение цифровых инструментов пространственного анализа создаёт возможность перехода от нормативного планирования к доказательному, основанному на актуальных данных о распределении населения и его потребностях.

Определившись с формованием полюсов размещения населения города, необходимо перейти к цифровому моделированию строительства инфраструктурных проектов, по главным запросам граждан «Полюсов Петербурга».

Моделирование государственной информационной системы включает в свою основу архитектуру подобной системы и закладывает в себя принцип доказательного планирования, при котором пространственные приоритеты бюджетных инвестиций определяются объективированными данными о реальном поведении и нуждах жителей.

Функциональное ядро предлагаемой государственной информационной системы составляет модуль интеллектуального анализа многомерных данных, агрегирующий сведения из трёх принципиально разнородных источников. В него поступают демографические и социально-экономические показатели в разрезе внутригородских муниципальных образований, включая ранжирование районов по численности населения и трудовым доходам.

4. Объединённая концепция подключения модели государственной информационной системы

Переход от концептуального моделирования к практической имплементации цифрового механизма аккумулирования потребностей граждан требует неразрывного сопряжения аналитического ядра с действующей государственной информационной инфраструктурой.

В качестве базовой платформы для такой интеграции рассматривается государственная информационная система Санкт-Петербурга «Единая система строительного комплекса Санкт-Петербурга» (далее – ЕССК), агрегирующая сведения о градостроительной деятельности, инженерных изысканиях, проектной документации и разрешительных процедурах на территории субъекта. Предлагаемая архитектура подключения основана на сервис-ориентированной парадигме и предполагает создание специализированного интеграционного шлюза, обеспечивающего двунаправленный обмен машиночитаемыми пакетами между прогностическим модулем и хранилищами ЕССК.

Информационное взаимодействие реализуется посредством «RESTful API» [6] с аутентификацией по протоколу «OAuth 2.0»[2] и передачей полезной нагрузки в нотации JSON, схема которой строго типизирована в соответствии с онтологией предметной области. Пакет, направляемый от аналитического модуля в ЕССК, инкапсулирует результаты пространственно-

[2] *Как устроены потоки авторизации, защита и управление доступом в OAuth 2.0* – [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://blog.skillfactory.ru/oauth-2-0/ (дата обращения: 28.08.2026).

временного анализа демографических, доходных и поведенческих показателей для каждой административно-территориальной единицы [7].

Семантическое наполнение пакета заслуживает детального комментария.

Блок «integration» фиксирует идентификаторы взаимодействующих подсистем, версию интерфейса и уникальный маркер транзакции, что в свою очередь обеспечивает аудируемость и идемпотентность операций.

Ключевым элементом является объект «proposed_object», который не только фиксирует идентификатор земельного участка в формате кадастрового номера, но и содержит унифицированный указатель на цифровую информационную модель здания – «bim_model_urn».

Он в свою очередь достает из базы данных агрегируемой системы, указатель отсылает к BIM-модели, размещённой в среде общих данных ЕССК и представленной в открытом формате IFC 4.3, что гарантирует интероперабельность с различными программными комплексами. Уровень проработки LOD 350 соответствует стадии «Проектная документация», достаточной для проведения государственной экспертизы и последующего строительного контроля.

Особого рассмотрения заслуживает слой пользовательских пожеланий, формирующий сетку отзывов граждан [8]. Данный слой интегрируется в ЕССК через шлюз портала государственных услуг Санкт-Петербурга и специализированной краудсорсинговой платформы. Каждый элемент сетки представляет собой геопривязанную точку с координатами в системе, ассоциированную с одной из категорий потребностей, и содержащую деперсонифицированные метаданные, которая представляет собой временную метку, интенсивность запроса и семантический класс.

При наложении на картографическую подоснову ЕССК подобные точки визуализируются в виде градиентной тепловой карты, причём цветовая насыщенность ячейки пропорциональна логарифму числа поступивших сигналов. Наложение изохрон доступности позволяет оператору системы в интерактивном режиме оценить, насколько полно проектируемый объект покрывает ареал максимальной концентрации запросов.

5. Заключение

Таким образом, предлагаемая архитектура интеграции трансформирует ЕССК из системы пассивного документооборота в активно-аналитическую среду, способную не только сопровождать жизненный цикл объекта

капитального строительства, но и инициировать его на основе объективированных потребностей населения. Единый машиночитаемый протокол обмена, базирующийся на JSON-схемах и открытых BIM-стандартах, обеспечивает семантическую совместимость всех компонентов, а многослойная визуализация – от цветового кодирования районов для региональной практики глубину погружения в пространственно-социальный контекст, необходимую для принятия обоснованных управленческих решений в сфере капитального строительства Санкт-Петербурга.

Список использованных источников

1. *Гамидуллаева Л. А., Страхов Е. П.* Эволюция концепции кластерного развития: от агломерационной теории к экосистемам // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2023. №1. С. 106-125.
2. *Пустоляков А. А.* Теоретические аспекты проведения промышленной политики: от классических подходов к современным тенденциям // Форум молодых ученых. 2025. №10. С. 79-84.
3. *Родионов Д. Г., Родионов Д. Г.* Теоретические модели регионального развития через партнерство и инновации // Вестник Академии знаний. 2024. №. 6. С. 659-666.
4. *Перекатова А. А.* Неравенство населения мегаполиса по критерию благосостояния на основе открытой территориальной статистики // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 102-105.
5. *Муфтахова А. Н.* К вопросу о жилищной стратификации мегаполиса (на примере г. Санкт-Петербурга) // Российское социологическое сообщество: история, современность, место в мировой науке: Мат-лы научной конференции к 100-летию Русского социологического общества имени М.М. Ковалевского. Санкт-Петербург, 10-12 ноября 2016 года. СПб.: Скифия-принт, 2016 – С. 878-880.
6. *Чайкин М. О.* Разработка веб-приложения для мониторинга параметров работы манипуляционных механизмов // International Journal of Open Information Technologies. 2023. №2. С 60-65.
7. *Джурка Н. Г.* Из наследия П. А. Минакира: концептуальные основы пространственного анализа в экономике» // Регионалистика. 2025. №2. С. 23-32.
8. *Киселева Н. Н., Бавина К. В.* Анализ пространственных факторов в современных концепциях регионального развития // Социально-гуманитарные знания. 2016. №12-1. С. 78-91.

DIGITAL TRANSFORMATION OF THE APPLICATION OF THE OBJECT-ORIENTED MODEL IN THE FRAMEWORK OF THE EXECUTION OF GOVERNMENT TASKS IN ST. PETERSBURG

Almira N. Muftakhova, Ph. D,
Ivan I. Semenov
North-West Institute of Management, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration
Russia, 199178, St. Petersburg, Sredny V.O. Ave., 57/43, letter A
E-mail: msmalmira@yandex.ru, isemenov-22@yandex.ru

Abstract. In the context of the rapid development of the digital economy and the growing need of St. Petersburg residents for high-quality housing, the convenience of which is determined by a combination of characteristics such as infrastructure, transport accessibility and uniformity of zoning of urban areas, as well as improving the quality of budget spending, the digital transformation of public administration of capital construction is of particular importance. In the course of the work, a significant asymmetry of population distribution by city districts was identified, the "poles" of maximum demographic concentration were identified, and the principles of evidence-based infrastructure planning were formulated. The conclusions formulated based on the results of the study substantiate the transition of the city's construction complex from passive document management to a proactive analytical environment, which helps to increase the targeting of budget expenditures and smooth out territorial imbalances in the quality of the urban environment.

Keywords: public administration; urban studies; digital transformation; BIM model

УДК 658.78+004.8
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-716

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В СЕКТОРЕ ТОВАРОВ ПОВСЕДНЕВНОГО СПРОСА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ПРЕДИКТИВНОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ КРИТИЧНОСТИ СРОКОВ ГОДНОСТИ

Лиана Артёмовна Киракозова,
Михаил Андреевич Савинов
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
Россия, 125167, Москва, Ленинградский проспект, д. 49/2
E-mail: lianakirakozova@mail.ru, savinov.m.a@gymn1sam.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема совершенствования оперативного транспортно-логистического планирования в цепях поставок товаров повседневного спроса в условиях высокой волатильности покупательского спроса и ограничений по срокам годности продукции. В исследовании предложена Адаптивная модель синхронизации спроса и маршрутизации, интегрирующая краткосрочное вероятностное прогнозирование спроса торговых точек на базе машинного обучения с динамической маршрутизацией транспортных средств. Ключевым элементом модели является разработанный Индекс критичности срока годности, квалифицирующий временной резерв партии товара относительно прогнозируемой скорости ее реализации. Сформулирована математическая модель единой целевой функции, минимизирующая суммарные транспортные издержки, штрафы за упущенные продажи и потенциальные убытки от списания просроченной продукции. На основе имитационного эксперимента доказана экономическая эффективность модели (снижение списаний на 34,5 %, уровня дефицита на 27,9 %, транспортных издержек на 12,4 %).

Ключевые слова: сектор товаров повседневного спроса; транспортная логистика; прогнозирование спроса; машинное обучение; динамическая маршрутизация; цепи поставок; срок годности; индекс критичности срока годности.

1. Введение

Сектор товаров повседневного спроса (FMCG, Fast-Moving Consumer Goods) отличается высокой интенсивностью товарных потоков, минимальной маржинальностью, широким ассортиментом и жесткими требованиями к скорости и надежности поставок. Значительную долю в структуре сектора товаров повседневного спроса занимают категории скоропортящихся товаров (fresh, ultra-fresh, dairy), для которых коммерческая ценность продукции напрямую зависит от остаточного срока годности на момент выкладки на полку магазина [1].

Традиционная практика логистического менеджмента в секторе товаров повседневного спроса основывается на раздельном, последовательном принятии операционных решений:

1. Отдел продаж или директора магазинов формируют заказы на пополнение запасов на основе эвристик или детерминированных прогнозов;

2. Логистический центр аккумулирует заказы и решает задачу маршрутизации автотранспорта (Vehicle Routing Problem, VRP), минимизируя исключительно транспортные расходы (пробег, время рейса, количество автомобилей).

Подобный каскадный подход порождает существенную рассинхронизацию между спросом, состоянием запасов и транспортными мощностями. В условиях волатильности спроса, вызванной промо-активностью, сезонными факторами или локальными изменениями трафика, детерминированный заказ либо приводит к возникновению дефицита (Out-of-Stock, OOS) [1, 2], либо к формированию сверхнормативных запасов, подверженных риску порчи и последующего списания [3, 4]. Проблема усугубляется эффектом Форрестера (хлыстообразным эффектом), при котором небольшие колебания спроса на уровне розницы вызывают масштабные дисбалансы в транспортно-распределительной сети [1].

Современные научные изыскания в области логистики фокусируются на использовании методов машинного обучения (ML) для повышения точности прогнозирования [5] и на оптимизации маршрутизации скоропортящихся продуктов (Perishable Inventory Routing Problem, PIRP) [6 – 13]. Однако в большинстве существующих работ прогнозирование спроса и оперативная маршрутизация рассматриваются как независимые задачи. Переход к сквозной интеграции прогноза спроса, управления запасами и маршрутизации в едином контуре принятия решений остается нерешенным научно-практическим вызовом.

Основная цель настоящего исследования – разработка и теоретико-экспериментальное обоснование интегрированной модели транспортно-логистического планирования в секторе товаров повседневного спроса (FMCG), объединяющей вероятностный прогноз спроса, динамическую маршрутизацию и непрерывный учет фактора критичности остаточного срока годности партий товаров.

2. Теоретическая база и обзор литературы

Теоретический фундамент исследования опирается на три

взаимосвязанных научных направления:

1. Концепция интегрированного управления цепями поставок и VMI. Фундаментальные принципы системной интеграции логистических процессов детально изложены в базовых трудах по цепям поставок [1 – 3, 14]. В концепции управление запасами поставщиком (Vendor-Managed Inventory) центральный дистрибьютор принимает на себя функции планирования пополнения на основе данных о продажах в торговых точках (POS-данных), что позволяет сглаживать информационные искажения [14].

2. Применение машинного обучения в прогнозировании спроса. Переход от традиционных статистических моделей к методам машинного обучения (Gradient Boosting, Random Forest, Neural Networks) детально исследован в работах [5, 9]. ML-модели способны улавливать нелинейные зависимости, учитывать внешние факторы и генерировать вероятностные распределения спроса, что критически важно для управления риском дефицита.

3. Задачи маршрутизации скоропортящихся товаров (PIRP). Исследованию задач класса Perishable Inventory Routing Problem посвящён широкий круг публикаций [4, 6, 7, 11 – 13]. В работах [6, 7, 11] показано, что игнорирование скорости деградации товарного качества при составлении маршрутов приводит к значительным финансовым потерям, а использование информации в режиме реального времени играет решающую роль для предотвращения списаний [8].

Исследовательский разрыв заключается в том, что существующие модели PIRP предполагают либо детерминированный спрос [6, 7], либо используют постоянные коэффициенты списания без динамической связки с краткосрочным вероятностным прогнозом продаж конкретной партии товара в конкретном магазине.

3. Методология. Адаптивная модель синхронизации спроса и маршрутизации

Разработанная Адаптивная модель синхронизации спроса и маршрутизации (Adaptive Model of Demand and Routing, AMDR) предназначена для оперативного планирования поставок на горизонте 24–48 часов.

3.1. Индекс критичности срока годности

Для формализации риска потери товарной ценности вводится Индекс критичности срока годности (Shelf Life Criticality Index, SLCI):

$$SLCI_{ikt} = \frac{T_{exp,k} - T_{curr,t}}{T_{i,k}^{forec}}, \quad (1)$$

где $T_{exp,\,k}$ –дата и время окончания срока годности партии товара k; $T_{curr,\,t}$ –текущая дата и время момента планирования/доставки t; $\mathrm{T}_{\mathrm{i,k}}^{\mathrm{forec}}$–прогнозируемое время (в днях/часах), необходимое для полной реализации объема партии k в торговой точке i, рассчитанное на основе вероятностного ML-прогноза спроса.

Интерпретация значений индекса критичности срока годности (SLCI):

- $SLCI_{ikt} < 1{,}0$ (критический уровень): доступный остаточный срок годности меньше прогнозируемого периода реализации. Поставка этой партии в точку i с высокой вероятностью приведет к частичному или полному списанию;
- $SLCI_{ikt} \approx 1{,}0$ (пороговый уровень): запас времени минимален;
- $SLCI_{ikt} > 1{,}2$ (безопасный уровень): временной резерв достаточен для гарантированной реализации партии до истечения срока годности.

3.2. Математическая формализация целевой функции AMDR

Рассмотрим распределительную сеть, состоящую из центрального распределительного центра (депо, узел i=0) и множества торговых точек $N = \{1, 2, ..., n\}$. Планирование осуществляется на дискретный горизонт $T = \{1, ..., \tau\}$. Транспортировка выполняется однородным парком автотранспорта $V = \{1, ..., K\}$ с вместимостью Q.

Единая целевая функция оптимизационной модели минимизирует совокупные логистические и операционные издержки Z:

$$min\, Z = C_{transp} + C_{stockout} + C_{writeoff}; \quad (2)$$

Составляющие целевой функции:

$$C_{transp} = \sum_{t\in T}\sum_{v\in V}\sum_{i\in N\cup\{0\}}\sum_{j\in N\cup\{0\}, j\neq i} c_{ij}x_{ijt}^{v}; \quad (3)$$

$$C_{stockout} = \sum_{t=1}^{t}\sum_{i=1}^{n}\sum_{p\in P}\pi_{ip}max\,(0, D_{ipt} - I_{ip,t-1} - \sum_{v=1}^{K} q_{ipvt})); \quad (4)$$

$$C_{writeoff} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\sum_{v=1}^{k}\sum_{k\in K_i} P_k W_{risk}(SLCI_{ikt}) q_{ikvt}, \quad (5)$$

где $x_{ijvt} \in \{0, 1\}$ – бинарная переменная (1, если автомобиль v перемещается из узла i в узел j в период t; 0 иначе); c_{ij} – стоимость перемещения между

узлами i и j; q_{ipvt} – количество товара категории p (или партии k), доставляемое в точку i автотранспортом v в период t; D_{ipt} – спрос на продукт p в точке i в период t; $I_{ip,t-1}$ – остаток товара в торговой точке на начало периода; π_{ip} – удельный штраф за единицу дефицита (Out-of-Stock); P_k – себестоимость единицы товара партии k; $W_{risk}(SLCI_{ikt})$ – весовая функция риска списания:

$$W_{risk}(SLCI) = \begin{cases} 1{,}0, & \text{если } SLCI < 1{,}0; \\ e^{-\alpha(SLCI-1)}, & \text{если } SLCI \geq 1{,}0, \end{cases} \quad (6)$$

где $\alpha > 0$ – параметр калибровки чувствительности модели к риску; e – основание натурального логарифма ($e \approx 2{,}718$).

3.3. Сравнительный анализ подходов

Для демонстрации принципиальных отличий предложенного подхода Адаптивной модели синхронизации спроса (AMDR-SLCI) от традиционных систем планирования сформирована сравнительная матрица (Таблица 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ традиционного и предлагаемого подходов к логистическому планированию в секторе товаров повседневного спроса (составлена авторами)

Критерий сравнения	**Традиционное каскадное планирование**	**Модель AMDR без SLCI**	**Предложенная модель AMDR-SLCI**
Инициатор отгрузки	Ручной заказ магазина / статический ROP	Автоматический заказ по детерминированному прогнозу	Алгоритм на базе ML-вероятностей спроса и остатка
Целевая функция транспорта	Минимизация пробега и количества машин (100% отгрузка)	Минимизация транспортных расходов и дефицита	Минимизация совокупных издержек (транспорт + OOS + списания)
Отношение к сроку годности	Пассивное (проверка при приемке: остаток > 60%)	Фиксированные ограничения по максимальному возрасту	Динамическая оценка риска через SLCI в целевой функции
Учет неопределенности спроса	Не учитывается (точечный заказ)	Частичный (через страховой запас)	Учитывается (вероятностные сценарии спроса $P(\hat{D})$)
Реакция на промо-всплески	Запоздалая (возникновение OOS или затоваривание)	Средняя (пересчет на следующий день)	Проактивная (динамическое перераспределение маршрутов)

4. Результаты исследования и экономическая оценка

4.1. Постановка имитационного эксперимента и вводные данные

Чтобы проверить работу AMDR-SLCI в условиях, максимально приближенных к «полям», мы сформировали имитационный сценарий на базе данных крупного ритейлера московского региона сектора товаров повседневного спроса. В периметр моделирования вошли: 1 центральный распределительный центр (ЦРЦ) и 25 торговых объектов формата «магазин у дома» и «мини-маркет» с разной интенсивностью покупательского трафика. Горизонт планирования составил 48 часов с шагом пересчета в 4 часа.

Тестирование проводилось на трех категориях продукции с разным запасом «жизни»: «Ultra-fresh» (молочная продукция и готовая еда, срок 3–5 дней), «Fresh» (мясная гастрономия, 7–10 дней) и «Standard» (сыры и соусы, до 21 дня). Для чистоты эксперимента мы заложили в модель естественные шумы: вечерние пробки, неравномерность разгрузки на рампах и промовсплески спроса в выходные дни.

Сравнение производилось по трем сценариям:

- S1 (Базовый): традиционная схема, где магазин сам формирует фиксированный заказ, а логистика строит маршруты по классическому алгоритму VRP (минимизация пробега).
- S2 (Предиктивный): заказы рассчитываются автоматически на основе ML-прогноза, но маршрутизация не учитывает остаточные сроки годности конкретных партий.
- S3 (AMDR-SLCI): наша модель с единой целевой функцией, где вероятностный прогноз спроса, маршруты и штрафной индекс SLCI рассчитываются синхронно.

4.2. Количественные показатели и анализ механики результатов

В ходе моделирования 100 циклов поставок были получены усредненные показатели эффективности, приведенные в таблице 2.

Главный вывод из полученных цифр – модель даёт синергетический эффект за счет перераспределения риска. Списание падает на 34,5% не потому, что мы стали везти меньше товара, а благодаря механике работы индекса SLCI. Если алгоритм видит, что на складе есть партия товара с SLCI < 1,0 (срок «жмет»), он не отправляет ее в спальный магазин с низким оборотом. Вместо этого модель перенаправляет эту конкретную партию в крупный магазин с высоким трафиком, где ML-модель прогнозирует быструю

реализацию в ближайшие 12 часов.

Таблица 2. Результаты имитационного моделирования сценариев доставки (составлена авторами)

Показатель эффективности (KPI)	**Сценарий S1 (Базовый)**	**Сценарий S2 (AMDR без SLCI)**	**Сценарий S3 (AMDR-SLCI)**	**Отклонение S3 относительно S1 (%)**
Совокупные транспортные расходы (тыс. руб.)	1 420	1 290	1 244	-12,4%
Суммарный пробег автотранспорта (км)	18 500	16 800	16 400	-11,4%
Уровень Out-of-Stock (% упущенных продаж)	6,8%	5,2%	4,9%	-27,9%
Объем списаний по сроку годности (% от оборота)	2,9%	2,5%	1,9%	-34,5%
Средний коэффициент загрузки машин (%)	76,4%	82,1%	85,1%	+8,7 п.п.

Снижение транспортных расходов на 12,4% объясняется уходом от «пожарных» довозов. В базовом сценарии S1 из-за ошибок в ручных заказах регулярно возникал дефицит, и логистам приходилось отправлять полупустые машины во второй рейс. Модель AMDR консолидирует поставки под реальную вероятность спроса, повышая загрузку кузова до 85,1%.

4.3. Ограничения и практические нюансы внедрения

При внедрении AMDR-SLCI в реальную инфраструктуру ритейлера следует учитывать два ключевых барьера:

– Качество WMS/ERP-данных. Модель крайне чувствительна к точности учета партий на складе (FIFO/FEFO). Если кладовщик фактически отгрузит не ту партию, которую рассчитал алгоритм, индекс SLCI потеряет смысл.

– Время расчета. При масштабировании сети до 500+ магазинов и 5000+ SKU вычисление единой целевой функции напрямую требует значительных

мощностей. На практике целесообразно использовать эвристические методы (например, генетические алгоритмы или локальный поиск) для получения решения за приемлемые 15–20 минут перед формированием волны отгрузки.

5. Заключение

Предложенная адаптивная модель синхронизации спроса и маршрутизации (AMDR) с интеграцией Индекса критичности срока годности (SLCI) представляет собой инструмент решения операционных проблем FMCG-сектора.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что внедрение предложенной модели позволяет получить прямой экономический эффект в виде снижения совокупных транспортных расходов на 12,4 % и сокращения объема списаний просроченной продукции на 34,5 % за счет проактивного перераспределения партий с коротким остаточным сроком годности в точки с высоким спросом. Наряду с этим повышается качество сервиса: уменьшение случаев дефицита (Out-of-Stock) на 27,9 % обеспечивает постоянное наличие свежего ассортимента на полках и предотвращает отток покупателей. Важным аспектом является автоматизация принятия решений, при которой переход от ручного составления заявок к алгоритмическому распределению на базе ML-вероятностей снимает рутинную нагрузку с персонала и минимизирует влияние человеческого фактора. Кроме того, подход имеет выраженный ESG-эффект, поскольку снижение объемов утилизируемой органической продукции (food waste) и уменьшение суммарного пробега автотранспорта на 11,4% способствуют сокращению углеродного следа цепи поставок.

Список использованных источников

1. *Сергеев В. И.* Управление цепями поставок : учебник для вузов / В. И. Сергеев. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 480 с.
2. *Кристофер М.* Логистика и управление цепочками поставок / пер. с англ. под ред. В. С. Лукинского. – Санкт-Петербург : Питер, 2004. – 316 с.
3. *Бауэрсокс Д. Дж., Клосс Д. Дж.* Логистика: интегрированная цепь поставок / пер. с англ. – 2-е изд. – Москва : ЗАО «Олимп-Бизнес», 2017. – 640 с.
4. *Toth P., Vigo D.* Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications. – 2nd ed. – Philadelphia : SIAM, 2014. – 463 p. – DOI: 10.1137/1.9781611973594.
5. *Douaioui K., Oucheikh R., Benmoussa O., Mabrouki C.* Machine Learning and Deep Learning Models for Demand Forecasting in Supply Chain Management: A Critical Review //

Applied System Innovation. – 2024. – Vol. 7, No. 5. – Art. 93. – DOI: 10.3390/asi7050093.
6. *Chen X. Y., Yang J. B., Xu D. L.* Inventory Policy and Heuristic for Long-Term Multi-product Perishable Inventory Routing Problem with Static Demand // Journal of the Operations Research Society of China. – 2022. – Vol. 10, No. 4. – P. 659–683. – DOI: 10.1007/s40305-021-00390-5.
7. *Chen H. K., Hsueh C. F., Chang M. S.* Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products // Computers & Operations Research. – 2009. – Vol. 36, No. 7. – P. 2311–2319. – DOI: 10.1016/j.cor.2008.09.010.
8. *Flamini M., Nigro M., Pacciarelli D.* Assessing the value of information for retail distribution of perishable goods // European Transport Research Review. – 2011. – Vol. 3, No. 3. – P. 103–112. – DOI: 10.1007/s12544-011-0051-8.
9. *Seyedhosseini S. M., Ghazanfari M., Teimoury E., Shahanaghi K.* A Machine Learning Approach for Demand Forecasting in Integrated Inventory-Routing Problems // International Journal of Production Research. – 2021. – Vol. 59, No. 14. – P. 4310–4328. – DOI: 10.1080/00207543.2020.1766712.
10. *Soysal M., Bloemhof-Ruwaard J. M., Haijema R., van der Vorst J G.* Modeling an inventory routing problem for perishable products with environmental considerations and demand uncertainty // International Journal of Production Economics. – 2015. – Vol. 164. – P. 118–133. – DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.03.008.
11. *Amorim P., Günther H. O., Almada-Lobo B.* Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable goods // International Journal of Production Economics. – 2012. – Vol. 138, No. 1. – P. 89–101. – DOI: 10.1016/j.ijpe.2012.03.005.
12. *Coelho L. C., Cordeau J. F., Laporte G.* Thirty years of inventory-routing problems: A review // Computers & Operations Research. – 2014. – Vol. 43. – P. 207–221. – DOI: 10.1016/j.cor.2013.08.018.
13. *Crama Y., Rezaei M., Savelsbergh M.* Stochastic Inventory Routing for Perishable Products // Transportation Science. – 2018. – Vol. 52, No. 3. – P. 560–578. – DOI: 10.1287/trsc.2017.0799.
14. *Дыбская В. В.* Проектирование и управление системами распределения в цепях поставок: монография. – Москва : НИУ ВШЭ, 2021. – 384 с.

IMPROVING TRANSPORT AND LOGISTICS PLANNING IN THE FMCG SECTOR BASED ON AN INTEGRATED PREDICTIVE MODEL TAKING INTO ACCOUNT SHELF LIFE CRITICALITY

Liana A. Kirakozova,
Mikhail A. Savinov
Financial University under the Government of the Russian Federation
Russia, 125167, Moscow, Leningradsky Ave., 49/2
E-mail: lianakirakozova@mail.ru, savinov.m.a@gymn1sam.ru

Abstract. The article examines the problem of improving operational transport and logistics planning in fast-moving consumer goods supply chains under conditions of demand volatility and strict shelf life limitations. Traditional cascaded approaches that solve demand forecasting, inventory replenishment, and vehicle routing separately lead to local sub-optima, high write-off costs, and out-of-stock situations. An Adaptive Model of Demand and Routing is proposed, combining machine-learning-based probabilistic demand forecasting with dynamic vehicle routing. A key element of the model is the developed Shelf Life Criticality Index, which evaluates the remaining time window of a product batch relative to its forecasted rate of sale. A unified objective function is formulated to minimize combined transport costs, shortage penalties, and potential waste write-off losses. Simulation experiments demonstrate the economic effectiveness of the proposed model (a 34.5% reduction in product write-offs, a 27.9% decrease in out-of-stock levels, and a 12.4% reduction in transportation costs).

Keywords: fast-moving consumer goods; transport logistics; demand forecasting; machine learning; dynamic routing; supply chain; shelf life; shelf life criticality index.

УДК 316.334.56+656.1
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-717

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА КАК ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОРОДСКОЙ МОБИЛЬНОСТИ

Фёдор Андреевич Шильников
Северо-Западный институт управления – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации
Россия, 199178, Санкт-Петербург, пр-кт Средний В.О., д. 57/43, литера А
E-mail: fedorshilnic@gmail.com

Аннотация. В исследовании раскрыты проблемы и перспективы уровня развития общественного наземного транспорта. Установлено, что основными факторами, снижающими эффективность городской мобильности, являются недостаточный уровень приоритета общественного транспорта в улично-дорожной сети, ограниченное развитие выделенных полос движения, зависимость наземного транспорта от дорожной обстановки и сохраняющийся дисбаланс в развитии различных видов городского транспорта. Отмечены положительные результаты транспортной реформы, обновления подвижного состава и модернизации инфраструктуры.

Ключевые слова: общественный транспорт; приоритизация; наземный транспорт; городская мобильность; цифровизация; социальная интеграция.

1. Введение

Санкт-Петербург – динамично развивающийся, второй по величине город в Российской Федерации, общественный транспорт которого обслуживает ежедневно более 5 млн жителей. Он определяет уровень мобильности, доступ к труду, образованию и городским сервисам – является одной из главных составляющих жизни мегаполиса. На сегодняшний день в городе действует одна из важнейших государственных программ «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга» (далее – Постановление № 552), включающая в себя ряд подпрограмм, направленных на обеспечение доступности, надежности, комфортности и безопасности функционирования транспортного комплекса, отвечающего потребностям социально-экономического развития и транзитного потенциала Санкт-Петербурга, при приоритетном развитии системы городского пассажирского и внешнего транспорта[1] . Ожидается, что будет произведён пересмотр приоритетов по

[1] О государственной программе Санкт Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт Петербурга»: постановление Правительства Санкт Петербурга от 30.06.2014 № 552 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: сайт. - URL: https://docs.cntd.ru/document/822403631 (дата обращения: 15.08.2026).

развитию транспортной системы и мобильности в следующем порядке, по возрастанию: индивидуальный автотранспорт – городской пассажирский транспорт – пешеход [1]. Однако на практике, несмотря на декларируемый приоритет устойчивой мобильности, в системе сохраняется дисбаланс: личный автотранспорт продолжает иметь безусловный приоритет с точки зрения городского планирования и функционирования, внеуличный транспорт, в частности, метрополитен, продолжает пользоваться высоким доверием и спросом, воспринимается как надёжный вид транспорта, наземный общественный транспорт, включающий в себя автобусы и электробусы, троллейбусы и трамваи, уступает перечисленным ранее видам транспорта по привлекательности и институциональной поддержке [2].

Актуальность исследования обуславливается необходимостью поиска эффективных механизмов повышения городской мобильности населения в условиях роста автомобилизации, увеличения транспортных нагрузок на улично-дорожную сеть и необходимости достижения целей устойчивого развития городов [1, 3]. Несмотря на реализуемые в Санкт-Петербурге мероприятия по модернизации транспортного комплекса, вопросы повышения эффективности общественного наземного транспорта сохраняют высокую практическую значимость, поскольку именно данный вид транспорта обеспечивает основную часть внутригородских перевозок и во многом определяет доступность городской среды для населения.

Объектом исследования является эффективность общественного наземного транспорта как инструмент городской мобильности.

Предметом исследования выступают направления по повышению уровня развития эффективности общественного наземного транспорта как инструмента городской мобильности.

Цель исследования: на основе анализа эффективности общественного наземного транспорта, как инструмента городской мобильности, разработать рекомендации по повышению уровня её развития.

Проблема исследования – несоответствие между стратегическими установками транспортной политики и фактическим уровнем развития наземного транспорта, что усиливает территориальное неравенство и снижает общую эффективность городской мобильности.

В исследовании использовались методы нормативно-правового и статистического анализов, массового опроса, личного экспертного интервью.

Дополнительно проведён анализ вторичных данных, содержащих нарративы средств массовой информации. Массовый опрос проведён с 15 августа 2025 г. по 15 сентября 2025 г., случайная выборка из 1500 человек, объём выборки составил 441 респондент, погрешность, таким образом, составила ± 4 %. Для сопоставления мнения населения из результатов массового опроса был проведён ряд личных интервью с 4 приглашёнными экспертами, представляющими Комитет по транспорту Санкт-Петербурга.

Новизна исследования заключается в комплексном анализе влияния уровня развития общественного наземного транспорта на эффективность городской мобильности населения Санкт-Петербурга, основанном на сочетании статистического анализа, социологического анкетирования и экспертных интервью. В рамках исследования выявлены особенности восприятия качества транспортного обслуживания пассажирами, определены ключевые институциональные и инфраструктурные ограничения развития наземного транспорта, а также разработаны практические рекомендации по совершенствованию транспортной политики города в целях повышения эффективности городской мобильности.

2. Оценка текущего состояния и динамики развития транспортной системы Санкт-Петербурга

Современная транспортная система Санкт-Петербурга находится на этапе трансформации, отправной точкой которой послужил переход на новую модель транспортного обслуживания (далее – модель) в 2022 году[2]. Данная реформа кардинально изменила логику функционирования наземного городского пассажирского транспорта за счёт полной ликвидации коммерческих маршрутов, перехода на регулируемые тарифы (контракты) с предоставлением всех предусмотренных законом льгот, а также масштабного обновления подвижного состава [4].

С 2024 года автобусный транспорт стал абсолютным лидером по объёмам перевозок, опередив внеуличный скоростной транспорт – метрополитен. Данная динамика отражает успешную реализацию модели по вовлечению населения в использование наземного транспорта за счёт оптимизации маршрутной сети и внедрения привлекательных тарифных решений, в

[2] Внедрение Новой модели транспортного обслуживания пассажиров // Администрация Санкт-Петербурга: официальный сайт. - Раздел сайта «Комитет по транспорту», подраздел «История общественного транспорта Санкт-Петербурга». - URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/istoriya-obshestvennogo-transporta-sankt-peterburga/vnedrenie-novoj-modeli-transportnogo-obsluzhivaniya-passazhirov/ (дата обращения: 15.09.2026).

частности, повременного тарифа «60 минут» по электронной проездной карте «Подорожник» [5, 6]. При этом показатели средней эксплуатационной скорости автобусного и трамвайного движения остаются крайне низкими (14,8–15,1 км/ч и 12–15 км/ч[3], соответственно), что свидетельствует о существенных потерях времени в дорожных заторах при отсутствии выделенных полос движения в спальных районах и историческом центре города, соединяемых, по большей части, мостами – места, обозначенные в Комплексной схеме организации дорожного движения как наиболее проблемные[4].

По итогам 2022–2025 гг. объёмы пассажирских перевозок в Петербурге стабильно росли – с примерно 1,5 млрд человек в 2022 г. до 1,72 млрд в 2025 г. (прирост порядка 220 млн поездок, 15 %). Основной вклад в рост вносят автобусы и метрополитен; например, в 2025 г. автобусы (ГУП «Пассажиравтотранс» и НП) перевезли свыше 775 млн человек, метро – 669,3 млн. В то же время трамваи и троллейбусы сохраняют стабильный пассажиропоток (в 2024–2025 гг. суммарно около 285 млн человек), что отражает стагнацию данного направления – тенденция объясняется ориентацией городской транспортной политики на «автобусизацию», как наиболее гибкого вида транспорта, который возможно наладить в кратчайшие сроки. Для организации же полноценного трамвайного движения требуются долгосрочные и дорогостоящие инвестиции.

Нагрузка на транспорт также растет: в 2023 г. на маршруты ежедневно выходило более 5 000 единиц наземного транспорта, а к 2025 г. – порядка 4 200 автобусов и 1 100 трамваев/троллейбусов (всего ~5 300 транспортных средств) – свидетельствует о существенной интенсификации использования имеющегося парка подвижного состава.

Второй важнейший вектор развития транспортной системы Санкт-Петербурга связан с масштабной программой обновления парка подвижного состава.

Благодаря целенаправленной инвестиционной политике внедрения модели средний эксплуатационный возраст автобусов ГУП «Пассажиравтотранс» сократился с 6,7 лет в 2022 году до рекордных 4,1 лет в 2025 году, что сопровождалось полным переходом на низкопольную технику,

[3] Государственная программа Санкт Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт Петербурга» // Администрация Санкт Петербурга: официальный сайт. - Раздел: Комитет по транспорту. - URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/gosudarstvennaya-programma-sankt-peterburga-razvitie-transportnoj-sist/ (дата обращения: 11.09.2026).

[4] Комплексная схема организации дорожного движения Санкт-Петербурга на период до 2039 года // Администрация Санкт-Петербурга: официальный сайт. - Раздел: Комитет по транспорту. - URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/kompleksnaya-shema-organizacii-dorozhnogo-dvizheniya-sankt-peterburga-/ (дата обращения: 01.09.2026).

приспособленную для маломобильных групп населения. Почти стопроцентная доля оплаты проезда электронными проездными билетами (99,6 % в 2025 году) подтверждает успешный переход транспортной системы на цифровые бесконтактные технологии обслуживания [7]. Обратим внимание, что благодаря модели доля низкопольного подвижного состава ГУП «Пассажиравтотранс» достигла показателя в 100%, однако подвижной состав СПб ГУП «Горэлектротранс», прежде всего, трамвай, за 4 года так и не достиг 100 % показателя низкопольности. На 2026 год ОСП «Трамвайный парк № 7» остаётся единственным у государственного перевозчика с полностью обновлённым подвижным составом со 100 % низким уровнем пола. По состоянию на 2026 год трамвайные сети «Чижик» и «Славянка», имеющие аналогичные парки вагонов со 100 % уровнем пола, являются концессионными, находятся в эксплуатации у частных перевозчиков.

В совокупности система городского транспорта Санкт-Петербурга продолжает расширяться по численности и географии перевозок, однако достигнутые результаты пока не позволяют говорить о решении накопленных проблем. Рост объёмов перевозок сопровождается сохранением низких эксплуатационных скоростей наземного транспорта, а модернизация подвижного состава развивается неравномерно между отдельными видами перевозок. Наиболее заметные положительные изменения наблюдаются в автобусном сегменте, тогда как трамвайное и троллейбусное хозяйство демонстрируют более сдержанную динамику развития. Метрополитен сохраняет статус ключевого элемента городской транспортной системы, транспортной «артерии» города, однако растущий пассажиропоток создаёт дополнительную нагрузку на существующую инфраструктуру.

3. Общественный транспорт Санкт-Петербурга: анализ мнений пассажиров и экспертов

Транспортная система Санкт-Петербурга характеризуется противоречивыми тенденциями. С одной стороны, наблюдаются рост объёмов перевозок, обновление подвижного состава и расширение маршрутной сети. С другой стороны, сохраняются проблемы, связанные с недостаточной скоростью движения наземного транспорта, высокой нагрузкой на инфраструктуру и неравномерностью развития различных видов транспорта. Для сопоставления статистических данных с реальным восприятием качества транспортного обслуживания населением в период с 15 августа по 15 сентября 2025 года был проведён социологический опрос. Объём случайной выборки

составил 441 респондент (при генеральной совокупности 1500 человек), что обеспечивает репрезентативность данных при погрешности ± 4 %. Основную часть участников составили молодые люди в возрасте от 19 до 25 лет (38 %, или 166 человек), тогда как остальные респонденты были представлены другими возрастными группами.

В ходе проведения опроса не удалось выяснить, заметили ли пассажиры расхождения в темпах развития разных видов наземного и внеуличного транспорта, однако результаты статистического анализа позволяют сделать вывод о неравномерном развитии различных видов общественного транспорта Санкт-Петербурга. Наиболее высокие темпы роста объёмов перевозок и обновления подвижного состава остаются именно в автобусном сегменте, тогда как показатели городского электрического транспорта изменялись значительно медленнее.

Что касается предпочтений в выборе видов транспорта, то лидером остаётся метрополитен: почти 40 % опрошенных назвали его наиболее удобным средством передвижения. Полученный результат согласуется с данными, согласно которым метрополитен сохраняет один из крупнейших объёмов пассажирских перевозок в городе и остаётся системообразующим элементом транспортного каркаса Санкт-Петербурга.

Наземный общественный транспорт выбирают лишь 17 % респондентов, что свидетельствует о его меньшей привлекательности (рис. 1). Обратим внимание, что лишь 0,2 % (1 респондент) выбрал электробус, но никто из респондентов не выбрал троллейбус, что свидетельствует о непривлекательности данных видов транспорта. Электробус находится на этапе развития, маршрутная сеть невелика: постоянно техника выходит на линию лишь на некоторые «автобусные» маршруты: № 19, № 46, № 123 и № 128.

При этом идея введения выделенных полос и приоритетного проезда для маршрутных транспортных средств находит поддержку у большинства горожан: 73 % респондентов выразили полное согласие с такими мерами, ещё 13 % склоняются к их одобрению (рис. 2). Положительное отношение к организации приоритетного движения свидетельствует о готовности пассажиров мириться с возможными изменениями в схеме дорожного движения, ради повышения оперативности, безопасности и надёжности перевозок. Главными проблемами, снижающими эффективность работы общественного транспорта, респонденты назвали переполненность салонов и длительное ожидание на остановках.



Рис. 1. Диаграмма соотношения выбора респондентами социологического опроса самого удобного вида транспорта, (N = 441), % [сост. автором по результатам соц. опроса]

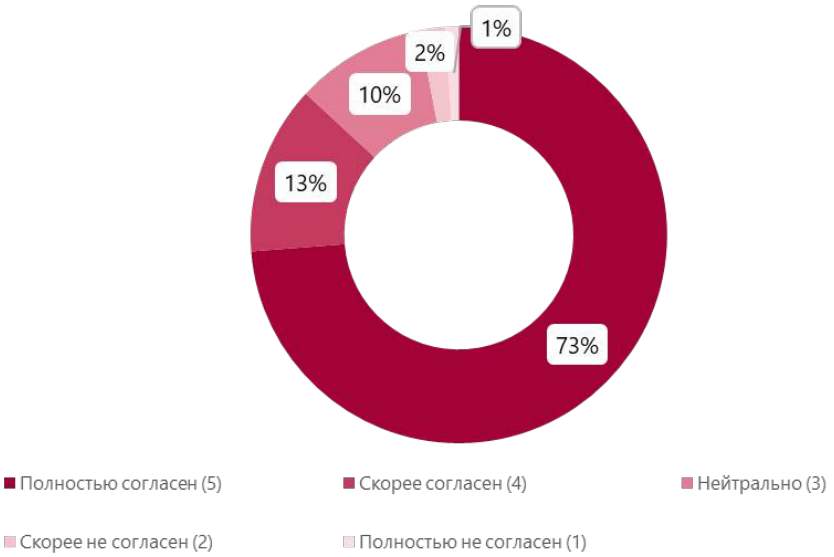


Рис. 2. Диаграмма структуры ответов о необходимости введения приоритизации наземного общественного транспорта, (N = 441), % [сост. автором по результатам соц. опроса]

Данные факторы регулярно влияют на выбор маршрута и способ передвижения, заставляя пассажиров искать альтернативы – например, такси, средства индивидуальной мобильности или каршеринг [7]. Полученные данные подчёркивают необходимость оперативного внедрения технических решений и организационных мероприятий (решение вопроса о кадровом голоде; оптимизация графиков и количества рейсов через приоритизацию наземного общественного транспорта), которые позволят увеличить интервал пропуска транспортных средств.

В дополнение к социологическому анкетированию в рамках исследования был проведён экспертный опрос, включающий серию полуформализованных интервью с 4 специалистами, осуществляющими государственную службу в Комитете по транспорту Санкт-Петербурга, пожелавших остаться анонимными по ряду объективных причин.

Значительное внимание в ходе интервью было уделено вопросам определения приоритетных направлений развития городской транспортной системы. Эксперты единогласно сошлись во мнении, что дальнейшее повышение эффективности транспортного комплекса Санкт-Петербурга связано с развитием магистральных видов общественного транспорта, способных обеспечивать перевозку значительных объёмов пассажиров. Вместе с тем специалисты подчёркивали, что достижение ожидаемого эффекта невозможно без создания соответствующих инфраструктурных условий. К числу таких условий были отнесены организация выделенных полос и обособленных коридоров движения, внедрение механизмов приоритетного проезда общественного транспорта на регулируемых перекрёстках, а также обеспечение его интеграции с другими видами транспорта в рамках единого каркаса. Наиболее структурированное отражение данного вектора развития содержится в Комплексной схеме организации дорожного движения, где подчёркивается, что основной задачей городского управления движением остаётся «предоставление приоритета общественному транспорту и повышение безопасности дорожного движения»21, где особое внимание уделяется вопросам интеллектуального управления движением. Вместе с тем эксперты отметили ряд положительных изменений, произошедших в транспортном комплексе города за последние годы. К числу наиболее значимых результатов были отнесены завершение внедрения ново модели транспортного обслуживания, подготовка к которой осуществлялась более пяти лет, ввод в эксплуатацию новой трамвайной линии, а также модернизация инфраструктуры и подвижного состава СПб ГУП «Горэлектротранс». Одновременно было отмечено, что реализация части указанных мероприятий осуществлялась преимущественно с использованием внебюджетных механизмов финансирования.

4. Заключение

В ходе проведённого исследования статистических данных и документов стратегического транспортного планирования было установлено, что, несмотря на положительные изменения последних лет, включая реализацию

новой модели транспортного обслуживания населения, обновление подвижного состава и развитие отдельных инфраструктурных объектов, система общественного наземного транспорта Санкт-Петербурга продолжает сталкиваться с рядом системных проблем.

Результаты социологического анкетирования показали, что жители Санкт-Петербурга в целом положительно оценивают доступность общественного транспорта, однако выражают неудовлетворённость скоростью передвижения, надёжностью соблюдения расписания и условиями пересадок. Особое значение для респондентов имеют вопросы сокращения времени поездки, повышения регулярности движения и обеспечения приоритетного движения общественного транспорта. Проведённые экспертные интервью подтвердили выявленные проблемы и позволили рассмотреть их с позиции практики государственного управления транспортным комплексом.

Список использованных источников

1. *Вучик В.* Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина; под науч. ред. М. Блинкина. – Москва: Территория будущего, 2011. – 344 с. – ISBN 978-5-91129-058-0.
2. *Нордаль Д.* Без машины? С удовольствием! Как сделать общественный транспорт привлекательным. – Москва: Альпина нон-фикшн, 2016. – 188 с. – ISBN: 978-5-91671-528-6.
3. *Рахматуллина А. Р.* Роль общественного транспорта в развитии современных городов // Вестн. ун-та: науч. журн. / Гос. ун-т управления. – 2014. – № 8. – С. 154-157.
4. *Янишевский О. Б.* Реформа городской маршрутной сети как катализатор социальных процессов // Интеракция. Интервью. Интерпретация. – 2022. – № 2. – С. 66-79. – DOI: 10.19181/inter.2022.14.2.4. – EDN JQXVSD.
5. *Айсина Л. Р., Колин А. В.* Оптимизация маршрутной сети городского пассажирского транспорта // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-1 (90). – С. 19-25. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-3-1(90)-19-25.
6. *Носов А. Л.* Оптимизация маршрутной сети движения городского пассажирского транспорта // Инновационное развитие экономики. – 2018. – № 5 (47). – С. 92-98.
7. *Перекатова А. А., Муфтахова А. Н.* Социальное неравенство при цифровизации сфер городской жизни в г. Санкт-Петербурге // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. – 2023. – № 7. – С. 179-184. – DOI: 10.37882/2223-2974.2023.07.23. – EDN ZFXTMJ.

INCREASING THE LEVEL OF PUBLIC LAND TRANSPORT DEVELOPMENT AS AN EFFICIENCY OF URBAN MOBILITY

Fyodor A. Shilnikov
North-West Institute of Management, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration
Russia, 199178, St. Petersburg, Sredny V.O. Ave., 57/43, letter A
E-mail: fedorshilnic@gmail.com

Abstract. The study examines the problems and prospects of the level of development of public land transport. It has been established that the main factors reducing the effectiveness of urban mobility are the insufficient priority of public transport in the road network, the limited development of dedicated lanes, the dependence of ground transport on the road situation and the continuing imbalance in the development of various types of urban transport. The positive results of the transport reform, renewal of rolling stock and modernization of infrastructure were noted.

Keywords: public transport; prioritization; surface transport; urban mobility; digitalization; social integration.

УДК 316.334.56+656.6
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-718

ВАРИАТИВНОСТЬ ГОРОДСКОЙ МОБИЛЬНОСТИ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ВОДНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Альмира Нургалиевна Муфтахова, канд. филос. наук,
Елизавета Ивановна Гаврилюк
Северо-Западный институт управления – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации
Россия, 199178, Санкт-Петербург, пр-кт Средний В.О., д. 57/43, литера А
E-mail: msmalmira@yandex.ru, egavriluk10@yandex.ru

Аннотация. Проведенное исследование позволяет рассматривать пассажирские водные перевозки Санкт-Петербурга не только как сезонный транспортно-рекреационный сегмент, но и как перспективный ресурс развития городской мобильности, способный расширять повседневные сценарии перемещения и повышать доступность значимых городских пространств. В данном контексте водный транспорт не выступает заменой действующей транспортной системе, а рассматривается как дополнительный способ перемещения, ориентированный на повышение качества пассажирского опыта и расширение транспортного выбора жителей и гостей города.

Ключевые слова: водный транспорт; пассажирские перевозки; городская мобильность; причальная инфраструктура; государственное регулирование.

1. Введение

Санкт-Петербург исторически формировался как город рек, каналов и набережных, однако его водное пространство до настоящего времени используется преимущественно как туристско-рекреационный ресурс, тогда как развитие городской мобильности требует расширения транспортного выбора жителей и гостей города.

В рамках исследования водный транспорт представлен не только как сезонный транспортно-рекреационный сегмент, но и как социально значимый механизм расширения транспортного выбора, повышения доступности городской среды и формирования новых сценариев перемещения.

Цель работы: на основе анализа вариативности городской мобильности при осуществлении пассажирских перевозок водным транспортом разработать рекомендации по их совершенствованию. Объект исследования – формы городской мобильности при осуществлении пассажирских перевозок водным транспортом. Предмет исследования – рекомендации по

развитию пассажирских водных перевозок как вариативности городской мобильности Санкт-Петербурга.

Выявлено, что пассажирские водные перевозки Санкт-Петербурга обладают значительным инфраструктурным и пассажирским потенциалом, однако преимущественно выполняют экскурсионно-прогулочную и туристическую функцию. Ключевыми ограничениями выступают фрагментарность причальной инфраструктуры, недостаточная регулярность маршрутов, неполная прозрачность рынка, неоднородность флота, ограниченность контрольного контура и недостаточная межведомственная координация.

Методическую основу исследования составили: анализ научной литературы и нормативных документов, анализ официальных статистических и аналитических материалов, сравнительный анализ регионального и зарубежного опыта, полуструктурированное экспертное интервью, ABC-анализ, SWOT-анализ, графическая визуализация данных, систематизация и обобщение результатов.

Научная новизна исследования заключается в рассмотрении пассажирских водных перевозок как элемента городской мобильности через взаимосвязь транспортной доступности, инфраструктурных условий, цифрового сопровождения, качества пассажирской услуги и пользовательских практик. Такой подход позволяет оценивать водный транспорт как социально значимый механизм расширения повседневных сценариев перемещения, повышения доступности городской среды и формирования более понятной для пассажира модели использования водного пространства города.

2. Водный транспорт как элемент коммуникационной системы городской мобильности

В научной литературе городская мобильность рассматривается не только как физическое перемещение между точками городского пространства, но и как условие доступа человека к основным городским ресурсам. Она связана с возможностью достигать мест работы, образования, досуга, культуры, обслуживания и общественного взаимодействия. В этом смысле мобильность отражает степень открытости городской среды для различных групп жителей и показывает, насколько транспортная система обеспечивает их повседневные потребности.

Исследователь Д. В. Завьялов связывает развитие транспортной мобильности с формированием безопасных, комфортных и доступных условий перемещения для жителей и гостей территории [1]. Данное положение важно

тем, что транспорт рассматривается не только как инфраструктурный комплекс, но и как механизм обеспечения доступа к городским ресурсам [2]. Чем более понятной, удобной и доступной является система перемещений, тем шире возможности жителей использовать образовательные, трудовые, культурные, рекреационные и иные функции города.

Автор А. Н. Муфтахова, анализируя социально-территориальную мобильность, обращает внимание на связь перемещения с возможностью человека менять свое положение в пространстве и использовать ресурсы территории [3]. Это позволяет рассматривать пассажирские водные перевозки не только как транспортную услугу, но и как один из способов расширения доступных сценариев городской жизни.

В Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года среди ключевых направлений развития транспортной системы обозначены повышение доступности и качества транспортных услуг, безопасность, цифровизация и экологическая устойчивость[1]. Данные ориентиры применимы и к пассажирскому водному транспорту. При его организации исключительно как досуговой услуги вклад водных маршрутов в городскую мобильность остается ограниченным [4]. Однако при связи с городскими точками притяжения, пересадочными узлами и понятной информационной системой водный транспорт может расширять набор доступных способов перемещения в период навигации.

При представлении концепции развития водного транспорта Д. Ваньчков, заместитель председателя Комитета по транспорту Санкт-Петербурга на дату представления концепции, подчеркнул, что «Санкт-Петербург — это город рек и каналов, и водный транспорт должен стать неотъемлемой частью комфортной городской среды»[2]. Данное высказывание отражает важный для настоящего исследования тезис: пассажирский водный транспорт целесообразно рассматривать не только как сезонный сервис, но и как элемент городской среды, связанный с доступностью, комфортом и качеством повседневных перемещений.

Водный транспорт как коммуникационная система городской мобильности включает несколько взаимосвязанных элементов: маршрутно-

[1] *Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года»* (ред. от 06.11.2024) // СПС КонсультантПлюс. URL:https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/ (дата обращения: 29.08.2026).

[2] *В Петербурге представили концепцию развития водного транспорта до 2030 года* // Korabel.ru. — 2025. — 21 апреля. — URL:https://www.korabel.ru/news/comments/v_peterburge_predstavili_koncepciyu_razvitiya_vodnogo_transporta_do_2030_goda.html (дата обращения: 26.05.2026).

сетевую организацию, причальную инфраструктуру и доступность, навигационно-информационное сопровождение, цифровые сервисы и учет данных, а также стандарты качества пассажирского обслуживания. Совокупность указанных элементов определяет не только возможность перемещения по воде, но и понятность, предсказуемость, безопасность и качество пассажирской услуги (рис. 1).



Рис. 1. Водный транспорт как коммуникационная система городской мобильности [5]

Тем самым водный транспорт может выполнять функцию городской мобильности только при условии, что он организован не как совокупность отдельных маршрутов, а как понятная для пассажира коммуникационная система.

3. Состояние и ключевые показатели развития пассажирских водных перевозок в системе городской мобильности Санкт-Петербурга

Оценка состояния пассажирских водных перевозок определила расширение предложения перевозочных услуг. Динамика лицензирования показывает рост числа регистровых судов с 68 единиц в 2020 году до 232 единиц в 2025 году (+241,2 %), а маломерных судов – со 151 до 446 единиц за аналогичный период (+195,4 %)[3]. Это подтверждает увеличение количества судов, допущенных к пассажирским перевозкам, и свидетельствует о росте предпринимательской активности в отрасли.

Для оценки структуры рынка был применен ABC-анализ продуктового предложения, позволяющий определить соотношение устойчивых, перспективных и слабо развитых сегментов пассажирских водных перевозок.

В рамках ABC-классификации было выявлено, что наиболее устойчивыми и массовыми сегментами рынка остаются экскурсионно-прогулочные и скоростные перевозки, формирующие основную часть пассажирского спроса и коммерческой активности. При этом сезонно-регулярные маршруты могут рассматриваться как перспективное направление развития рынка, поскольку их транспортная функция предполагает фиксированное расписание, пересадочную связанность, цифровое сопровождение пассажирской услуги и единые стандарты обслуживания (рис. 2).

Результаты ABC-анализа показывают, что существующая структура рынка преимущественно ориентирована на туристско-рекреационный спрос, тогда как сегмент регулярной городской водной мобильности требует организационного и сервисного развития. Данный вывод подтверждается результатами экспертного интервью, в ходе которого подчеркивалась необходимость не только увеличения числа маршрутов, но и формирования понятной для пассажира модели использования водного транспорта.

Для уточнения общественного запроса было целесообразно обратиться к материалам ВЦИОМ, отражающим восприятие городской среды и городского транспорта. Данные ВЦИОМ показывают, что 41 % опрошенных ожидают повышения комфортности проживания в своем населенном пункте в ближайшие три года[4]. Кроме того, в исследовании «Тренды в городском транспорте – 2021» среди ключевых факторов выбора транспорта

[3] *Навигация на водных объектах в Санкт-Петербурге. Итоги 2025 года : презентационные материалы* / СПб ГКУ «Агентство внешнего транспорта». — Санкт-Петербург, 2025.

[4] *Выход из зоны (не)комфорта: тренды жизни в российских* городах // ВЦИОМ. — 2025. — 14 марта. — URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/vykhod-iz-zony-nekomforta-trendy-zhizni-v-rossiiskikh-gorodakh (дата обращения: 26.08.2026).

выделяются комфорт поездки – 30 %, скорость и время в пути – 30-32%, удобное расположение остановки или станции – 14 %[5]. В связи с этим развитие пассажирских водных перевозок как вариативной формы городской мобильности должно предполагать не только расширение маршрутного предложения, но и повышение комфортности поездки, сокращение временных и организационных издержек для пассажира, обеспечение удобной доступности причалов и предсказуемости транспортной услуги [6].



Рис. 2. ABC-классификация продуктового предложения на рынке пассажирских водных перевозок Санкт-Петербурга[6]

Исходя из результатов экспертного интервью и анализа материалов Комитета по транспорту Санкт-Петербурга и СПб ГКУ «Агентство внешнего транспорта» были выделены шесть ключевых ограничений, влияющих на развитие пассажирских водных перевозок как альтернативной формы городской мобильности.

[5] *Тренды в городском транспорте — 2021* // ВЦИОМ. — 2021. — 17 ноября. — URL: https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/trendy-v-gorodskom-transporte-2021 (дата обращения: 12.09.2026).

[6] *Об основных результатах работы внешнего транспорта за 12 месяцев 2025 года : информационная справка* / Комитет по транспорту Санкт-Петербурга, СПб ГКУ «Агентство внешнего транспорта». — Санкт-Петербург, 2025.

1. Фрагментарность причальной инфраструктуры. Городская система общего пользования охватывает только часть причальной инфраструктуры: из 143 причалов лишь 20 относятся к городским причалам общего пользования, тогда как остальные преимущественно находятся в пользовании судоходных компаний[7].

2. Недостаточная выраженность регулярной транспортной функции. Основной пассажирский спрос сосредоточен в экскурсионно-прогулочном и скоростном сегментах, тогда как регулярные маршруты, ориентированные на повседневные перемещения, развиты в меньшей степени.

3. Неполная управляемость и прозрачность рынка перевозок. В Санкт-Петербурге действует более 280 судоходных компаний, однако Ассоциация владельцев пассажирских судов (АВПС) Санкт-Петербурга объединяет только часть перевозчиков: по официальным данным АВПС, в ассоциацию входят 18 судоходных компаний[8].

4. Возрастная и технологическая неоднородность флота. Наибольшая доля пассажирских судов относится к возрастной группе от 30 до 50 лет – 32,8 %, тогда как доля судов моложе 5 лет составляет 9 %[9].

5. Ограниченность контрольного контура. Динамика 2023–2025 гг. показывает рост числа выявленных административных дел более чем вдвое – с 290 до 593 (+104,5 %). Среди типовых нарушений фиксировались плавание без технического освидетельствования, отсутствие бортовых номеров, движение на запрещенных участках и нарушение норм пассажировместимости.

6. Недостаточная межведомственная координация воднотранспортной услуги. Транспортные, имущественные, инфраструктурные, природоохранные и контрольные решения находятся в компетенции разных органов и организаций [7]. В ходе экспертного интервью подчеркнута необходимость централизованного управления отраслью.

Систематизация выявленных характеристик развития пассажирских водных перевозок была проведена с использованием SWOT-анализа (рис. 3).

Результаты SWOT-анализа показывают, что дальнейшее развитие пассажирских водных перевозок зависит от способности города преобразовать

---

[7] *Навигация на водных объектах в Санкт-Петербурге. Итоги 2025 года : презентационные материалы* / СПб ГКУ «Агентство внешнего транспорта». — Санкт-Петербург, 2025.

[8] *Сведения об Ассоциации* // Ассоциация владельцев пассажирских судов Санкт-Петербурга. — URL: https://www.avps.ru/ (дата обращения: 26.05.2026).

[9] *Навигация на водных объектах в Санкт-Петербурге. Итоги 2025 года : презентационные материалы* / СПб ГКУ «Агентство внешнего транспорта». — Санкт-Петербург, 2025.

имеющиеся преимущества водной среды и устойчивый сезонный спрос в устойчивый общественно значимый транспортный ресурс.



Рис. 3. SWOT-анализ рынка пассажирских водных перевозок Санкт-Петербурга[10]

4. Заключение

В ходе исследования было выявлено, что основное ограничение развития пассажирских водных перевозок связано не с недостаточностью водного потенциала Санкт-Петербурга, а с несогласованностью организационных, информационных и сервисных условий его использования.

Учитывая изложенное, развитие пассажирских водных перевозок в Санкт-Петербурге определяется не только наличием водной инфраструктуры, пассажирского спроса и сформированного рынка перевозчиков, но и способностью данной системы обеспечивать устойчивую транспортную доступность, качество пассажирского сервиса и включенность водных маршрутов в городскую мобильность.

[10] *Об основных результатах работы внешнего транспорта за 12 месяцев 2025 года : информационная справка* / Комитет по транспорту Санкт-Петербурга, СПб ГКУ «Агентство внешнего транспорта». — Санкт-Петербург, 2025.

Список использованных источников

1. *Завьялов Д. В.* Управление развитием транспортной мобильности // Вестник университета. – 2023. – № 1. – С. 68-76.
2. *Иванов В. М., Репина Д. А., Мосинцев А. В.* Эффективность проектов организации пассажирских перевозок на водном транспорте // Научные проблемы водного транспорта. – 2021. – № 67. – С. 79–91.
3. *Муфтахова А. Н.* Социально-территориальная мобильность в европейских странах // Российский гуманитарный журнал. – 2023. – Т. 12. – № 3. – С. 157-164.
4. *Марков Л. С.* Экономические кластеры: понятия и характерные черты // Актуальные проблемы социально-экономического развития: взгляд молодых ученых: сборник научных трудов / под ред. В. Е. Селиверстова, В. М. Марковой, Е. С. Гвоздевой. – Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 2005. – Разд. 1. – С. 102-123.
5. *Репина Д. А.* Водные пассажирские перевозки: проблемы и пути развития // Актуальные вопросы экономики: сборник статей III Международной научно-практической конференции, состоявшейся 5 ноября 2020 г. в г. Пензе. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. С. 229–232.
6. *Сакаринен М. А., Муфтахова А. Н.* Факторы дисбаланса в распределении социальной инфраструктуры при территориальном планировании мегаполиса Санкт-Петербурга // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2024. – Т. 14, № 11-1. – С. 366-375. – DOI: 10.34670/AR.2024.16.93.042.
7. *Шестаков С. И., Быкова Г. П.* Анализ востребованности пассажирских перевозок внутренним водным транспортом в Российской Федерации // Вестник евразийской науки. – 2025. – № 2S.

VARIABILITY OF URBAN MOBILITY IN PASSENGER TRANSPORTATION BY WATER

Almira N. Muftakhova, Ph. D.,
Elizaveta I. Gavrilyuk
North-West Institute of Management, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration
Russia, 199178, St. Petersburg, Sredny V.O. Ave., 57/43, letter A
E-mail: msmalmira@yandex.ru, egavriluk10@yandex.ru

Abstract. The conducted research allows us to view passenger water transport in St. Petersburg not only as a seasonal transport and recreational segment, but also as a promising resource for the development of urban mobility, capable of expanding everyday travel scenarios and increasing the accessibility of important urban spaces. In this context, water transport is not seen as a substitute for the existing transport system, but rather as an additional mode of transportation aimed at improving the quality of the passenger experience and expanding the transport options available to the city's residents and visitors.

Keywords: water transport; passenger transportation; urban mobility; berthing infrastructure; government regulation.

УДК 656.073+004.942
doi:10.18720/SPBPU/2/id26-719

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ОПЕРАТИВНЫХ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКЕ

Михаил Андреевич Савинов,
Лиана Артёмовна Киракозова
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
Россия, 125167, Москва, пр-кт Ленинградский, 49/2
E-mail: savinov.m.a@gymn1sam.ru, lianakirakozova@mail.ru

Аннотация. Цель исследования состоит в оценке экономической ценности оперативных данных цифрового двойника транспортно-логистической системы и в определении такой частоты синхронизации, при которой прирост качества решений оправдывает затраты на получение и обработку данных. Предложен вычислительный эксперимент, в котором сопоставлены статический режим, периодическая синхронизация с интервалами 60, 30, 15 и 5 минут, а также событийный режим. Для каждого режима выполнено 30 повторов модели по 1000 отправок с одинаковыми наборами случайных воздействий. В качестве критериев использованы доля отправок, выполненных вовремя и в полном объеме, средняя и 95-процентная задержка, число циклов обработки данных и релевантные затраты. Получено, что сокращение интервала обновления с 60 до 15 минут заметно повышает уровень сервиса, тогда как переход от 15 к 5 минут дает существенно меньший прирост доли отправок, выполненных вовремя и в полном объеме, при росте затрат. Событийная синхронизация обеспечивает качество, сопоставимое с пятиминутным обновлением, при значительно меньшем числе вычислительных циклов. Практическая значимость результата состоит в возможности выбора экономически обоснованной политики обновления цифрового двойника на данных конкретной компании.

Ключевые слова: цифровой двойник; транспортная логистика; оперативные данные; синхронизация; выполнение вовремя и в полном объеме; событийное управление; экономическая эффективность; ценность данных.

1. Введение

В транспортной логистике цифровой двойник постепенно перестает быть только средством визуализации или имитационного моделирования. Его прикладная роль смещается к поддержке оперативных решений: корректировке маршрутов, перераспределению грузов между транспортными средствами, прогнозированию расчетного времени прибытия (ETA, Estimated Time of Arrival), реакции на задержки и управлению ресурсами в условиях изменяющейся обстановки. Для таких задач принципиальным становится не только качество модели, но и то, насколько быстро цифровое

представление получает сведения о фактическом состоянии физической системы.

В русскоязычной литературе уже сформирован базовый корпус работ о применении цифровых двойников в логистике. В исследовании В. В. Дыбской и В. И. Сергеева цифровой двойник рассматривается как инструмент мониторинга процессов цепи поставок товаров повседневного спроса (FMCG, Fast-Moving Consumer Goods) и как элемент конвергенции цифровых моделей продуктов и процессов [1]. А. Д. Столяров, А. М. Файзуллина и В. И. Абрамов связывают применение цифровых двойников с повышением результативности логистики, снижением рисков и улучшением использования физических активов, одновременно отмечая значение обмена данными между реальной системой и ее цифровой моделью [2]. В работе П. Н. Мишкурова показана возможность использования цифрового двойника для оперативного регулирования сложных железнодорожных транспортно-логистических процессов и оценки вариантов диспетчерских решений [3].

Зарубежные исследования развивают ту же линию в направлении динамического управления. Д. Иванов и А. Долгуи предложили концепцию цифрового двойника цепи поставок как инструмента управления рисками и устойчивостью [4], а Д. Бургос и Д. Иванов использовали цифровой двойник для анализа поведения продовольственной цепи поставок при фактических сценариях пандемийных нарушений [5]. Обзор Т. В. Ле и Р. Фан показывает, что среди устойчивых исследовательских разрывов сохраняются вопросы обработки данных в реальном времени, интеграции и стандартизации [6]. Систематический обзор С. А. Х. Заиди, Ш. А. Хана и А. Шаабана также указывает, что полноценная синхронизация и автономное принятие решений остаются для многих решений пилотной стадией [7].

Наиболее точную постановку проблемы предлагают А. Толиа и С. Т. Понис: режим реального времени в цифровом двойнике определяется не абстрактной минимальной задержкой, а согласованием частоты обновления данных, скорости формирования решения и скорости изменения самой системы [8]. Такой подход важен для экономики проекта. Частое обновление требует телематической инфраструктуры, интеграционных интерфейсов, вычислительных ресурсов, хранения и контроля качества данных. Кроме того, каждое новое состояние может инициировать повторную оптимизацию, которая сама по себе имеет вычислительную и организационную

стоимость. Поэтому правило «чем чаще, тем лучше» не обязательно обеспечивает наилучший финансовый результат.

В настоящей работе исследуется вопрос, при какой частоте обновления цифрового двойника дополнительная оперативность данных перестает давать соразмерный экономический эффект. В качестве альтернативы фиксированному интервалу рассматривается событийная синхронизация, при которой перерасчет запускается только после существенного отклонения прогнозируемого состояния от плана. Гипотеза исследования состоит в том, что повышение частоты синхронизации улучшает показатели сервиса лишь до некоторой точки насыщения, а событийный режим способен обеспечить близкое качество решений при меньшем числе циклов обработки данных. Научная новизна работы заключается в совместной оценке операционного результата и стоимости информационной оперативности, а также в определении пороговой стоимости цикла данных, после которой более частое обновление становится экономически нецелесообразным.

2. Исследовательский контекст и постановка задачи

Развитие цифровых двойников цепей поставок связано с переходом от периодического анализа исторических данных к замкнутому циклу «физическая система – данные – цифровая модель – решение – физическая система». Д. Иванов рассматривает интеллектуальный цифровой двойник как человеко-машинную систему поддержки решений, способную объединять мониторинг, раннее обнаружение нарушений, событийные реакции и обучение [9]. Для транспортных задач близкая логика реализуется в схемах горизонтального планирования (rolling horizon), когда план пересчитывается по мере поступления новой информации. На примере транспорта по требованию показано, что корректная настройка горизонта и частоты перепланирования непосредственно влияет на эффективность эксплуатации [10].

Особый интерес для настоящего исследования представляет работа Б. Карими, М. Мохаммадпура Омрана и Х. Сахеби, где цифровой двойник логистической сети четвертого уровня (4PL, Fourth-Party Logistics) соединен с схемой горизонтального планирования и событийным запуском повторной оптимизации. В промышленном кейсе вычисления выполнялись по управленческому циклу, а внеплановый перерасчет активировался при превышении порога значимости нарушения [11]. Еще один важный методический шаг сделан Э. Гусманом, Б. Андрес и М. Торрес-Поло: авторы выделяют ценность данных (Value of Data) как самостоятельный объект оценки

и сравнивают режимы информационной интеграции при одинаковых физических условиях [12].

При этом вопрос экономической частоты синхронизации в транспортной логистике остается недостаточно разработанным. Большая часть публикаций отвечает на вопросы о том, какие данные использовать, каким образом построить цифровой двойник и какие решения он может поддерживать. Существенно реже рассматривается цена информационной оперативности: сколько дополнительных обновлений оправдано снижением задержек и штрафных потерь, и в какой момент предельная ценность более свежих данных становится ниже предельных затрат на их получение и обработку.

Для устранения этого разрыва предлагается оценивать режим синхронизации не по одному технологическому параметру, а по паре «качество сервиса – релевантные затраты». В качестве основного показателя качества принята доля отправок, выполненных вовремя и в полном объеме, поскольку она непосредственно связана с соблюдением обещанного срока доставки. Экономическая часть включает потери от опозданий, затраты на корректирующие транспортные действия и стоимость информационно-вычислительного цикла. Такая постановка позволяет интерпретировать частоту данных как управляемый ресурс, а не как безусловное технологическое благо.

3. Методика вычислительного эксперимента

Методика вычислительного эксперимента включает шесть последовательных этапов:

1) формирование для каждого прогона массива из 1000 отправок с плановыми сроками, резервами времени и случайными транспортными нарушениями;

2) использование одного и того же набора случайных воздействий для всех сравниваемых режимов;

3) моделирование момента обнаружения отклонения в соответствии с выбранным режимом синхронизации;

4) расчет возможного корректирующего воздействия с учетом задержки обнаружения и порога запуска перепланирования;

5) вычисление показателей качества сервиса и релевантных затрат для каждого прогона;

6) усреднение результатов по 30 повторам, построение доверительных интервалов с доверительной вероятностью 95% и сопоставление режимов по операционному и экономическому эффекту.

Исследование выполнено в форме имитационного вычислительного эксперимента. Модель описывает региональную автомобильную логистику с потоком отправок, для которых заданы плановый срок, резерв времени и случайные транспортные нарушения. Расчеты не воспроизводят данные конкретной компании; они предназначены для проверки механизма и демонстрации методики. Экономические коэффициенты также являются расчетными. При практическом применении они должны заменяться фактическими значениями, которые исполнитель официально должен соблюдать перед заказчиком (SLA, Service Level Agreement), себестоимости пробега, затрат на системы управления транспортом (TMS, Transportation Management System) и телематики и вычислительной инфраструктуры.

Для каждого режима выполнено 30 повторов по 1000 отправок. Во всех вариантах использованы одинаковые начальные последовательности случайных воздействий, что позволяет сопоставлять режимы на совпадающих сценариях. Вероятность транспортного нарушения принята равной 0,45. Базовая длительность нарушения моделируется гамма-распределением с параметрами формы 2,2 и масштаба 18 минут; для 8 % нарушенных отправок добавляется тяжелая компонента с параметрами 2 и 25 минут. Запас времени до договорного срока формируется из усеченного нормального распределения со средним 35 минут и стандартным отклонением 15 минут в диапазоне от 5 до 80 минут.

Сравниваются шесть режимов: отсутствие оперативной синхронизации; периодическое обновление каждые 60, 30, 15 и 5 минут; событийная синхронизация. В периодическом варианте отклонение становится доступно цифровому двойнику при ближайшем цикле обновления. В событийном варианте сигнал поступает через 1–4 минуты после появления значимого отклонения. Повторная оптимизация допускается, если прогнозируемое нарушение срока превышает 5 минут. Для всех динамических режимов предельная доля компенсируемого нарушения установлена на уровне 68 %, причем эффективность корректирующего действия снижается по мере роста задержки обнаружения.

Доля отправок, выполненных в срок, рассчитывается по формуле:

$$OTIF = \frac{N_{\text{on}}}{N} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где N_{on} – число отправок, завершенных не позднее планового срока и в полном объеме; N – общее число отправок.

Для характеристики тяжести отклонений используется средняя положительная задержка:

$$L = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} max(0;\ d_i), \tag{2}$$

где d_{i} – отклонение фактического времени завершения i-й отправки от договорного срока, то есть время опоздания, рассчитанное в минутах; отрицательные отклонения в показатель задержки не включаются.

Экономическая оценка строится на релевантных затратах режима синхронизации:

$$C_s = C_{pen,s} + C_{route,s} + C_{data,s}, \tag{3}$$

где $C_{pen,s}$ – штрафные и сервисные потери из-за просрочки; $C_{route,s}$ – дополнительные затраты, возникающие при перепланировании маршрута; $C_{data,s}$ – затраты на обновление, обработку данных и запуск оптимизационного цикла; s – индекс рассматриваемого режима синхронизации, например, 15 или 30 минут.

Экономическая ценность оперативных данных относительно статического режима определяется как предотвращенные релевантные затраты:

$$V_{\text{s}} = C_0 - C_{\text{s}}. \tag{4}$$

Функция эффективности реакции цифрового двойника на транспортное нарушение задана в форме экспоненциального затухания. Для отражения снижения результативности корректирующего воздействия при увеличении задержки обнаружения нарушения в вычислительном эксперименте принято модельное допущение об экспоненциальном характере данной зависимости. Такой вид функции обеспечивает монотонное снижение эффективности реакции цифрового двойника по мере устаревания информации. Максимальная компенсируемая доля нарушения принята равной 0,68, а характеристическое время снижения эффективности – 45 мин. Указанные параметры являются расчетными и при практическом применении модели подлежат калибровке по фактическим данным транспортно-логистической системы.

$$\eta(\tau) = 0{,}68\, e^{-\frac{\tau}{45}}, \tag{5}$$

где $\eta(\tau)$ – доля транспортного нарушения, компенсируемая корректирующим воздействием цифрового двойника; τ – задержка обнаружения

нарушения, мин; 0,68 – предельная эффективность корректирующего воздействия при отсутствии задержки; 45 мин – принятый в эксперименте параметр скорости снижения эффективности реакции.

Таблица 1. Параметры вычислительного эксперимента (составлена авторами)

Параметр	Принятое значение	Экономический смысл
Число отправок в одном прогоне	1000	Объем условного месячного потока
Число повторов	30	Оценка устойчивости результатов
Вероятность транспортного нарушения	0,45	Неопределенность дорожной и операционной среды
Порог запуска перепланирования	прогноз просрочки > 5 мин	Отсечение несущественных отклонений
Дополнительный пробег при корректировке	в среднем 5,5 км	Цена операционной реакции
Стоимость дополнительного пробега	55 руб./км	Условная переменная транспортная себестоимость
Потери при просрочке	2500 руб. + 120 руб./мин	SLA-потери и стоимость задержки
Периодический цикл данных	120 руб./цикл	Интеграция, обработка и вычисление
Событийный цикл	180 руб./событие	Более тяжелый цикл оптимизации по триггеру

Стоимость периодического цикла трактуется как приведенная стоимость одного полного обновления состояния цифрового двойника: получение данных, контроль целостности, обновление модели и запуск расчетной процедуры. Событийный цикл принят дороже, поскольку предполагает внеплановый запуск оптимизации. Такая схема позволяет проверить не абсолютный уровень затрат, а чувствительность экономического результата к частоте обновления.

Для каждого режима вычислялись среднее значение показателей и 95%-й доверительный интервал. В частности, для показателя доли отправок, выполненных вовремя и в полном объеме (OTIF) доверительный интервал определялся через стандартную ошибку среднего по 30 повторам. Это снижает риск сделать вывод на основании единичной случайной реализации.

4. Результаты эксперимента и оценка ценности данных

Результаты эксперимента рассматриваются в двух взаимосвязанных аспектах. Сначала сопоставляются показатели качества обслуживания и интенсивность вычислительных циклов, затем для тех же режимов оцениваются релевантные затраты и экономическая ценность оперативных данных. Такое представление позволяет отделить операционный эффект более частого обновления от его стоимостных последствий.

Таблица 2. Операционные результаты сравнения режимов синхронизации (составлена на основании расчетов авторов)

Режим	OTIF, %	Средняя задержка, мин	P95 задержки, мин	Циклы данных Q
Без синхронизации	75,43	7,89	50,46	0
60 мин	82,17	3,19	23,07	240
30 мин	85,83	1,92	13,71	480
15 мин	88,40	1,22	7,64	960
5 мин	90,44	0,79	4,16	2880
По событию	90,48	0,79	4,23	216

Таблица 3. Экономические результаты сравнения режимов синхронизации (составлена на основании расчетов авторов)

Режим	Потери от просрочки, тыс. руб.	Стоимость данных, тыс. руб.	Релевантные затраты, тыс. руб.	V, тыс. руб.
Без синхронизации	1560,8	0,0	1560,8	0,0
60 мин	828,9	28,8	923,1	637,7
30 мин	585,3	57,6	708,3	852,5
15 мин	436,6	115,2	617,2	943,6
5 мин	333,7	345,6	744,7	816,1
По событию	332,9	38,8	436,8	1124,0

Результаты в табл. 2 и 3 демонстрируют ожидаемое улучшение качества при сокращении интервала обновления, однако зависимость нелинейна. В статическом режиме показатель доли отправок, выполненных вовремя и в полном объеме (OTIF) составляет 75,43 %. Переход к синхронизации один

раз в час повышает показатель до 82,17 %, одновременно сокращая среднюю задержку с 7,89 до 3,19 минуты. При интервале 15 минут OTIF достигает 88,40 %, а 95-й процентиль задержки уменьшается с 50,46 до 7,64 минуты. Таким образом, именно переход от редкого обновления к интервалу порядка 15 минут дает основную часть операционного эффекта.

Дальнейшее сокращение интервала до 5 минут повышает OTIF лишь на 2,04 процентного пункта – до 90,44 %. При этом число циклов данных возрастает с 960 до 2880. В принятой экономической модели релевантные затраты увеличиваются с 617,2 до 744,7 тыс. руб., то есть на 20,7 %. Полученный результат иллюстрирует точку насыщения: дополнительная свежесть данных продолжает улучшать сервис, но предельная экономическая отдача уже отрицательна.

Событийный режим дает иной профиль. Его показатель доли отправок, выполненных вовремя и в полном объеме (OTIF) составляет 90,48 % при доверительном интервале ±0,37 п.п., что практически совпадает с пятиминутным режимом – 90,44 ±0,34 п.п. Средняя задержка также одинакова с точностью до сотых. Однако среднее число расчетных событий составляет около 216 против 2880 периодических циклов, то есть снижается на 92,5 %. Релевантные затраты уменьшаются до 436,8 тыс. руб., или на 41,3 % относительно режима обновления каждые 5 минут. Экономическая ценность оперативных данных относительно статического управления достигает 1,124 млн руб. на модельный объем 1000 отправок.

Важно, что высокий результат событийного режима не связан с отказом от оперативных данных. Напротив, данные поступают быстро, но вычислительно дорогой управленческий цикл запускается селективно – только для состояния, способного нарушить условия, которые исполнитель официально должен соблюдать перед заказчиком (SLA). За счет этого разделяются две функции цифрового двойника: постоянное наблюдение за физической системой и повторная оптимизация. Такое разделение особенно важно в системах с большим числом объектов, где полное перепланирование после каждого сообщения телематики технически возможно, но экономически избыточно.

На рис. 1 сопоставлены столбчатый ряд релевантных затрат и ломаная, соединяющая значения доли отправок, выполненных вовремя и в полном объеме (OTIF) для рассматриваемых режимов. Показатель качества сервиса монотонно растет при учащении периодического обновления, тогда как релевантные затраты после 15-минутного режима увеличиваются.

Событийная схема занимает отдельное положение: она сохраняет высокий OTIF, но не несет избыточной стоимости регулярного полного перерасчета.

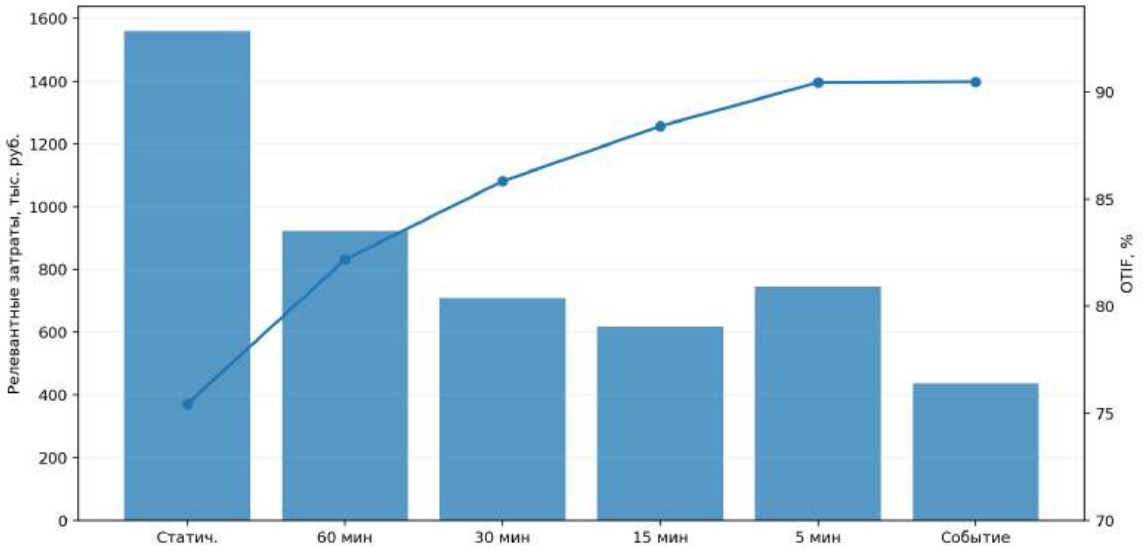


Рис. 1. Влияние режима синхронизации на OTIF и релевантные затраты (расчеты авторов)

Для практической настройки цифрового двойника полезно определить предельную стоимость одного дополнительного цикла данных, при которой пятиминутный режим сравнивается по затратам с 15-минутным. Если из релевантных затрат временно исключить стоимость самих информационных циклов, разность между режимами составляет около 102,9 тыс. руб. в пользу пятиминутного варианта. Дополнительное число циклов равно 1920. Пороговая стоимость рассчитывается следующим образом:

$$c^* = \frac{102\,922}{1\,920} = 53{,}6 \text{ руб./цикл.} \quad (6)$$

Следовательно, если приведенная стоимость дополнительного обновления цифрового двойника превышает примерно 54 руб. за цикл, переход с интервала 15 минут на 5 минут в заданных условиях уже не окупается только за счет снижения просрочек. При меньшей стоимости частое обновление может быть оправдано. Эта величина не является универсальным нормативом: ее значение определяется конкретными штрафами, условиями, соблюдаемые исполнителем перед заказчиком (SLA), архитектурой данных и стоимостью вычислений компании. Методически важно само наличие такого порога, который можно рассчитать до масштабирования инфраструктуры.

5. Практическая ценность для транспортно-логистического бизнеса

Полученные результаты переводят вопрос о «реальном времени» из технической плоскости в управленческую. Для бизнеса оптимальная частота цифрового двойника должна задаваться не минимально возможной задержкой передачи данных, а стоимостью ошибки, динамикой процесса и ценой очередного управленческого цикла. В системах, где отклонение на несколько минут не влияет на условия, соблюдаемые исполнителем перед заказчиком (SLA), постоянное полное перепланирование способно лишь создавать нагрузку на системы управления транспортом, интеграционную шину и расчетный модуль. Напротив, для дорогостоящих или критичных грузов даже небольшой выигрыш во времени может оправдывать более частую синхронизацию.

Практическая схема внедрения может быть трехуровневой. На первом уровне компания оценивает фактическую стоимость просрочки: штрафы, компенсации клиенту, простой следующего звена, срочные перевозки и трудозатраты диспетчера. На втором уровне фиксируется стоимость информационного цикла – телематика и цифровой посредник, позволяющий программе общаться и передавать данные другой программе (API, Application Programming Interface), интеграция, обработка, лицензии, вычислительная инфраструктура и сопровождение. На третьем уровне строится экспериментальная кривая, аналогичная рис. 1, после чего выбирается минимальная частота, обеспечивающая заданные условия, которые исполнитель официально должен соблюдать перед заказчиком (SLA), при минимуме совокупных релевантных затрат.

Для неоднородного грузопотока целесообразна не единая частота, а политика классов обслуживания. Например, стандартные перевозки могут обновлять расчетное состояние раз в 15–30 минут, грузы с жестким временным окном – раз в 5 минут, а внеплановая оптимизация должна запускаться по событиям. В качестве триггеров могут использоваться прогноз опоздания относительно SLA, изменение расчетного времени прибытия (ETA) выше установленного порога, выход транспортного средства из геозоны, незапланированный простой, превышение загрузки терминала или потеря доступности ресурса. При таком подходе телематика остается непрерывной, но дорогая функция принятия решения включается только тогда, когда новая информация способна изменить действие.

Экономический эффект цифрового двойника в этом случае формируется не столько из максимального объема данных, сколько из правильного

отбора данных, имеющих управленческую ценность. С точки зрения архитектуры это означает необходимость раздельно проектировать контур наблюдения и контур оптимизации. Первый может принимать поток глобальной системы позиционирования (GPS, Global Positioning System)/ГЛОНАСС, статусы системы управления транспортом/системы управления складом и события внешней среды с высокой частотой. Второй должен иметь механизм приоритизации и порогов, чтобы не запускать полную оптимизацию после каждого обновления координаты.

Для бизнеса особенно важен показатель V_S из формулы (4). Он позволяет сопоставить затраты на цифровизацию с предотвращенными потерями на одном и том же горизонте. Если компания подставляет в модель собственные ставки штрафов, себестоимость километра, число отправок и стоимость инфраструктуры, результат становится основой для технико-экономического обоснования: можно определить требуемую производительность интеграционной платформы, выбрать тариф телематического сервиса, задать частоту пересчета расчетного времени прибытия (ETA) и оценить окупаемость модуля динамического планирования. В этом состоит основная практическая ценность предложенного подхода – цифровой двойник рассматривается не как абстрактная технология, а как управляемый инвестиционный объект с измеримым эффектом от качества и оперативности данных.

6. Ограничения исследования

Полученные значения не следует переносить в конкретную компанию без калибровки. В модели не детализирована дорожная сеть, не учитывается разная грузоподъемность транспортных средств, сменные ограничения водителей, неоднородность клиентов и зависимость времени обслуживания от типа груза. Стоимостные коэффициенты заданы расчетно, а функция компенсации задержки упрощенно описывает эффект оперативного перепланирования.

Вместе с тем эти ограничения не меняют основной исследовательской конструкции. Дальнейшая работа должна быть направлена на калибровку модели по журналам системы управления транспортом и телематики реального перевозчика, оценку индивидуальных функций потерь по сегментам клиентов и проверку событийной политики на реальной дорожной сети. Отдельного анализа требует устойчивость порогов при сезонных изменениях трафика и при росте числа одновременно управляемых отправок.

7. Заключение

Проведенный вычислительный эксперимент подтверждает, что экономическая ценность оперативных данных цифрового двойника определяется не максимальной частотой их обновления, а соответствием этой частоты динамике управляемого процесса и цене ошибки. В модельной транспортно-логистической системе сокращение интервала синхронизации с 60 до 15 минут дало значимое повышение доли отправок, выполненных вовремя и в полном объеме (OTIF) и существенное снижение задержек. Переход с 15 до 5 минут улучшил OTIF только на 2,04 п.п., но при принятой стоимости информационного цикла увеличил релевантные затраты на 20,7 %. Таким образом, повышение технологической оперативности после определенной точки перестает быть тождественным росту экономической эффективности.

Наиболее результативным оказался событийный режим. При практически одинаковом с пятиминутной синхронизацией OTIF он потребовал на 92,5 % меньше расчетных циклов и снизил релевантные затраты на 41,3 %. Это позволяет сделать вывод о целесообразности гибридной архитектуры: физическая система наблюдается непрерывно, однако полная оптимизация запускается по пороговым событиям, способным повлиять на SLA или стоимость перевозки.

Практическая ценность исследования для бизнеса заключается в возможности до внедрения или масштабирования цифрового двойника определить экономически оправданную частоту синхронизации на собственных данных. Предложенная методика связывает показатели сервиса с фактическими затратами на просрочку, корректирующие действия и информационно-вычислительный контур. Это дает возможность обосновывать требования к TMS, телематике и вычислительной инфраструктуре не по принципу «максимально быстро», а по принципу «достаточно быстро для принятия выгодного решения». Для транспортно-логистической компании такой подход способен снизить избыточные расходы на цифровую инфраструктуру, сохраняя требуемый уровень клиентского сервиса.

Список использованных источников

1. *Дыбская В. В., Сергеев В. И.* Использование цифровых двойников при мониторинге цепей поставок товаров FMCG // Логистика и управление цепями поставок. – 2020. – № 3(98). – С. 3–15. – ISSN 2587-6775.
2. *Столяров А. Д., Файзуллина А. М., Абрамов В. И.* Цифровая трансформация логистики предприятия с использованием цифровых двойников // BENEFICIUM. – 2024. – № 2(51). – С. 23–31. – DOI:10.34680/BENEFICIUM.2024.2(51).23-31.
3. *Мишкуров П. Н.* Цифровой двойник железнодорожных транспортно-логистических процессов промышленного предприятия // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-1(90). – С. 124–133. – DOI: 10.33979/2073-7432-2025-3-1(90)-124-133.
4. *Ivanov D., Dolgui A. A* digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0 // Production Planning & Control. – 2021. – Vol. 32. – No. 9. – Pp. 775–788. – DOI: 10.1080/09537287.2020.1768450.
5. *Burgos D., Ivanov D.* Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2021. – Vol. 152. – Art. 102412. – DOI: 10.1016/j.tre.2021.102412.
6. *Le T. V., Fan R.* Digital twins for logistics and supply chain systems: Literature review, conceptual framework, research potential, and practical challenges // Computers & Industrial Engineering. – 2024. – Vol. 187. – Art. 109768. – DOI: 10.1016/j.cie.2023.109768.
7. *Zaidi S. A. H., Khan S. A., Chaabane A.* Unlocking the potential of digital twins in supply chains: A systematic review // Supply Chain Analytics. – 2024. – Vol. 7. – Art. 100075. – DOI: 10.1016/j.sca.2024.100075.
8. Tolia A., Ponis S. T. Digital Twins for Real-Time Decision-Making in Supply Chain Management and Logistics: A Systematic Review // Information. – 2026. – Vol. 17. – No. 8. – Art. 732. – DOI: 10.3390/info17080732.
9. *Ivanov D.* Intelligent digital twin (iDT) for supply chain stress-testing, resilience, and viability // International Journal of Production Economics. – 2023. – Vol. 263. – Art. 108938. – DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108938.
10. *Lu C., Maciejewski M., Wu H., Nagel K.* Optimization of demand-responsive transport: The rolling horizon approach // Procedia Computer Science. – 2023. – Vol. 220. – Pp. 145–153. – DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.021.
11. *Karimi B., Mohammadpour Omran M., Sahebi H.* A State-Synchronized Digital Twin-Driven Framework for Adaptive Optimization of Fourth-Party Logistics Networks in Off-Site Construction // Computers & Industrial Engineering. – 2026. – Vol. 218. – Art. 112116. – DOI: 10.1016/j.cie.2026.112116.
12. *Guzmán E., Andres B., Torres-Polo M.* A cooperative digital twin-multi-agent reinforcement learning for circular supply chains: balanced control across production, logistics, and sustainability // Computers & Industrial Engineering. – 2026. – Vol. 218. – Art. 112044. – DOI: 10.1016/j.cie.2026.112044.

ECONOMIC VALUE OF REAL-TIME DIGITAL TWIN DATA IN TRANSPORT LOGISTICS

Mikhail A. Savinov,
Liana A. Kirakozova
Financial University under the Government of the Russian Federation
Russia, 125167, Moscow, Leningradsky Ave., 49/2
E-mail: savinov.m.a@gymn1sam.ru, lianakirakozova@mail.ru

Abstract. The paper evaluates the economic value of real-time data used by a digital twin of a transport logistics system and determines a synchronization frequency at which additional decision quality justifies the cost of data acquisition and processing. A simulation experiment compares a static regime, periodic synchronization at 60-, 30-, 15- and 5-minute intervals, and an event-driven regime. Each scenario is evaluated in 30 replications of 1,000 shipments under matched random disturbances. The evaluation criteria included the proportion of shipments completed on time and in full, average and 95th-percentile delay, the number of data processing cycles, and relevant costs. The results show that shortening the update interval from 60 to 15 minutes provides most of the service improvement, while a further reduction to 5 minutes yields a relatively small proportion of shipments completed on time and in full gain and higher costs. Event-driven synchronization achieves service quality comparable to five-minute updates with substantially fewer optimization cycles. The practical significance of these findings lies in the ability to select an economically justified digital twin update policy based on a specific company's data.

Keywords: digital twin; transport logistics; real-time data; synchronization; on time in full; event-driven control; economic efficiency; value of data.

СОДЕРЖАНИЕ

Интеллектуальные транспортные системы

Андрей Евгеньевич Сорокин
Вероятностная оценка безопасности системы обнаружения препятствий и предотвращения наездов трамвайного вагона 10

Евгений Михайлович Тарасов, Анна Евгеньевна Тарасова,
Наталья Станиславовна Степнова, Константин Афанасьевич Бочков
Самоорганизация решающих функций распознавания состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики 20

Андрей Ильич Городнов, Сергей Александрович Гусев, Игорь Юрьевич Куверин
Концепция интегрированной платформы интеллектуальной транспортной системы на примере Саратовской агломерации 30

Николай Иванович Григоренко, Владимир Анатольевич Гутников
Цифровые двойники в задачах мониторинга и моделирования городских транспортных систем 42

Николай Иванович Григоренко
Тенденции развития систем восприятия автономного транспорта в интеллектуальных транспортных системах 51

Кристина Юрьевна Петрова, Ксения Владимировна Катковская
Разработка программы для расчета параметров судовой грозозащиты 60

Методы синтеза устройств и систем управления на транспорте

Дмитрий Викторович Ефанов
Самопроверяемые тестеры композиции равновесных кодов «1 из 5» и «4 из 5»..... 70

Есения Игоревна Елина
О самоподобии контрольных групп модульного взвешенного кода 79

Мария Сергеевна Мащалкина
Моделирование неисправностей как основа для выбора порождающего полинома при синтезе самопроверяемого цифрового устройства 88

Данил Маратович Ахмеров
Повышение эффективности управления бесколлекторным двигателем постоянного тока в транспортных системах 97

Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Александр Витальевич Ащеулов, Данил Евгеньевич Бортяков,
Сергей Васильевич Никитин, Дмитрий Иванович Ковалев
Динамическая модель грузовой машины с учетом работы сцепления и двигателя..... 104

Иван Андреевич Васильев, Максим Валерьевич Пичугин
Оценка распределения напряжений по сечению круглого стержня при одноосном растяжении для определения напряжений отрыва 115

Егор Олегович Забродкин, Максим Денисович Ожигин, Роман Юрьевич Добрецов
Концепция электромеханической подвески быстроходной гусеничной машины 122

Игорь Вадимович Лесковец, Алексей Андреевич Грачев
Нагруженность опорных катков и траков гусеничного движителя бульдозера при работе в режиме копания грунта..... 132

Алексей Александрович Луковников
Анализ особенностей процесса поворота гусеничной машины..... 141

Бо Ню, Роман Юрьевич Добрецов
Адаптивное гибридное траекторное управление беспилотным трактором на основе LQR–Pure Pursuit с нейросетевой настройкой весового коэффициента..... 152

Алексей Владимирович Юшкевич
Портативное устройство для мониторинга параметров работы электронных систем автомобиля..... 161

Дмитрий Сергеевич Неверовский
Разворот гусеничной машины с нулевым радиусом как предельный режим тягового расчета..... 168

Максим Валерьевич Пичугин, Иван Андреевич Васильев
Аналитическая модель стрелового устройства портального крана с учетом отклонения грузового каната для цифрового двойника системы мониторинга..... 176

Алексей Игоревич Васильев, Александр Георгиевич Семенов
Разработка рулевого управления тяжёлых полноприводных машин с независимой подвеской колёс..... 185

Иван Андреевич Васильев, Лев Максимович Федоров
Разработка математической модели судового крана для исследования активной компенсации качки..... 194

Ростислав Валентинович Хабаров
Исследование функциональных параметров работы портального крана с шарнирно-сочлененным стреловым устройством с качающейся опорой оттяжки 203

Сергей Владимирович Мещеряков, Данил Евгеньевич Бортяков, Дима Арус, Иван Сергеевич Мещеряков
Интегрированная база данных для технического обслуживания промышленных транспортных систем 211

Новые материалы и технологии для транспортных систем

Марина Анатольевна Рябикина, Виктор Иванович Бурлаков, Галина Юрьевна Бурлакова
Влияние химического состава на механические свойства стали HC260LA: статистический и регрессионный анализ 222

Цифровые технологии и моделирование транспортных систем

Кирилл Игоревич Камаев
Методика оценки эффективности организации дорожного движения на регулируемом перекрестке на основе ресурсного подхода 232

Сергей Владимирович Мещеряков, Данил Евгеньевич Бортяков, Дима Арус, Иван Сергеевич Мещеряков
Графическое моделирование участков поверхности транспортных систем вычислительными методами 244

Транспортная логистика и управление цепями поставок

Мария Игоревна Абдулазянова, Валерия Сергеевна Мацаренко, Кира Дмитриевна Татаренко
Потери ресурсов в транспортно-логистической компании: систематизация по методологии бережливого производства 252

Галина Юрьевна Бурлакова, Наталья Сергеевна Захаренко
Взаимовлияние городской транспортной логистики и градостроительства 261

Цифровая экономика

Альмира Нургалиевна Муфтахова, Иван Игоревич Семенов
Цифровая трансформация применения объектно-ориентированной модели в рамках исполнения государственных задач в Санкт-Петербурге 274

Лиана Артёмовна Киракозова, Михаил Андреевич Савинов
Совершенствование транспортно-логистического планирования в секторе товаров повседневного спроса на основе интегрированной предиктивной модели с учетом критичности сроков годности 283

Фёдор Андреевич Шильников
Повышение уровня развития общественного наземного транспорта как эффективность городской мобильности 293

Альмира Нургалиевна Муфтахова, Елизавета Ивановна Гаврилюк
Вариативность городской мобильности при осуществлении пассажирских перевозок водным транспортом 303

Михаил Андреевич Савинов, Лиана Артёмовна Киракозова
Экономическая ценность оперативных данных цифрового двойника в транспортной логистике 313