

7. Богданович, С. В. Концепция создания транспортной информационно-сервисной платформы на основе технологии интернета вещей / С. В. Богданович // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сб. науч. тр. : в 2 т. – Мн. : БНТУ, 2022. – Т. 2. – С. 117–120.

Представлено 24.06.2025

УДК 625.7

КОГНИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ В ФОРМИРОВАНИИ НОВОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

COGNITIVE TECHNOLOGIES AND BIG DATA
IN THE FORMATION OF A NEW APPROACH TO SAFETY
MANAGEMENT OF ROAD TRANSPORTATION SYSTEMS

Богданович С. В., канд. техн. наук, доц., **Бурова М. Г.**,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
S. Bogdanovich, Ph. D. in Eng., Ass. Prof., M. Burova,
Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

В статье обосновывается необходимость формирования новой подхода к управлению рисками в дорожно-транспортных системах (ДТС). Показано, что современные ДТС представляют собой сложные социо-киберфизические системы, характеризующиеся многоуровневыми взаимодействиями между физической инфраструктурой, транспортными потоками, человеческим поведением и цифровыми компонентами. Выявлено противоречие между интегративной природой рисков в таких системах и фрагментарностью существующих подходов к управлению безопасностью. Предложена концепция интегративного управления рисками, основанная на применении когнитивных технологий и архитектур больших данных для проактивного системного управления безопасностью ДТС.

The article substantiates the necessity of forming a new approach to risk management in road transportation systems (RTS). It is shown that modern RTS are complex socio-cyberphysical systems characterized by multilevel interactions between physical infrastructure, traffic flows, human behavior and digital components. The contradiction between the integrative nature of risks in such systems and the fragmentation of existing approaches to security management is revealed. The concept of integrative risk management based on the application of cognitive technologies and big data architectures for proactive systemic safety management of RTS is proposed.

Ключевые слова: *дорожно-транспортная система, социо-киберфизическая система, интегративное управление рисками, когнитивные технологии, большие данные.*

Keywords: *Road transport system, Socio-cyber-physical system, Integrative risk management, Cognitive technologies, Big data.*

ВВЕДЕНИЕ

Дорожно-транспортные системы являются важной инфраструктурой современного общества, обеспечивающей мобильность населения и экономическую активность. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в результате дорожно-транспортных происшествий погибает около 1,19 миллиона человек, а экономические потери составляют до 3 % валового внутреннего продукта большинства стран [1]. При этом традиционные подходы к обеспечению безопасности дорожного движения имеют ограниченную эффективность в условиях возрастающей сложности транспортных систем.

Современные ДТС претерпевают существенные изменения под влиянием процессов цифровизации, автоматизации и урбанизации. Внедрение подключенных и автономных транспортных средств, развитие интеллектуальной транспортной инфраструктуры, появление новых форм мобильности создают качественно новую среду функционирования, в которой традиционные методы управления рисками становятся недостаточными.

Актуальность исследования определяется необходимостью разработки новых теоретических основ и методологических подходов к управлению рисками в ДТС, способных учитывать их системную сложность и обеспечивать проактивное управление безопасностью в условиях динамично изменяющейся транспортной среды.

ОСНОВЫ ПЕРЕХОДА К ИНТЕГРАТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ РИСКАМИ В ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Современная дорожно-транспортная система представляет собой сложную социо-киберфизическую систему (СКФС), интегрирующую множество разнородных компонентов и подсистем. В отличие от традиционного представления ДТС как совокупности дорог, транспортных средств и участников движения, современное понимание включает в себя многоуровневую архитектуру взаимодействующих элементов.

На физическом уровне ДТС включает дорожную инфраструктуру, транспортные средства, системы управления движением, энергетическую и коммуникационную инфраструктуру. Киберуровень представлен информационными системами, алгоритмами управления, протоколами обмена данными, системами мониторинга и аналитики. Социальный уровень охватывает поведение участников движения, социальные нормы, институциональные структуры управления и регулирования.

Важнейшей характеристикой ДТС как СКФС является наличие эмерджентных свойств, возникающих в результате взаимодействия компонентов системы. Заторы на дорогах, волны замедления и повторяющиеся аварии – это сложные явления, которые возникают из-за работы всей транспортной системы в целом. Их нельзя понять, если рассматривать только отдельные транспортные средства или водителей. Нелинейность динамики ДТС проявляется в том, что малые изменения в одной части системы могут приводить к непропорционально большим эффектам в других частях. Например, незначительное снижение пропускной способности на одном участке дороги может вызвать каскадные эффекты, приводящие к системным сбоям на обширной территории.

ДТС характеризуется многомасштабностью протекающих процессов. Временные масштабы изменяются от миллисекунд (реакция водителя или системы автоматического управления) до десятилетий (развитие инфраструктуры, изменение транспортного поведения). Пространственные масштабы охватывают диапазон от локальных взаимодействий между транспортными средствами до региональных и глобальных транспортных сетей.

Эта многомасштабность создает особые проблемы при управлении рисками, поскольку требует одновременного учета процессов, протекающих на различных уровнях организации системы и в различных временных горизонтах.

Анализ существующих подходов к управлению рисками в ДТС выявляет их фрагментарность. Традиционно управление безопасностью осуществляется раздельно для различных компонентов системы: отдельно управляется безопасность инфраструктуры (проектирование дорог, установка знаков и ограждений), отдельно – управление транспортными потоками (светофорное регулирование, управление скоростным режимом), отдельно – воздействие на поведение участников движения (образование, правоприменение).

Если рассматривать проблему по частям, то решения часто оказываются неидеальными. То, что помогает в одном аспекте, может ухудшить ситуацию в другом. Например, при расширении дороги увеличится интенсивность и вырастут скорости. Но из-за этого ДТП могут стать более серьезными.

Доминирующие подходы к управлению рисками в ДТС носят преимущественно реактивный характер. Меры безопасности принимаются после анализа уже произошедших инцидентов и аварий. Статистический анализ аварийности, выявление мест концентрации ДТП, корректировка нормативов – все эти инструменты ориентированы на устранение уже проявившихся проблем.

Реактивность управления особенно проблематична в условиях быстрых изменений транспортной среды. Появление новых типов транспортных средств, изменение привычек пользователей, внедрение автоматизированных систем создают новые типы рисков, которыми сложно управлять на основе исторических данных [2].

Существующие методологии управления рисками недостаточно учитывают системные взаимодействия между компонентами ДТС. Риски рассматриваются изолированно, без учета каскадных эффектов и обратных связей. Например, при оценке рисков, связанных с внедрением автономных транспортных средств, часто не учитывается их влияние на поведение других участников движения и возникающие новые типы взаимодействий. Проведенный анализ позволяет сформулировать новую научную проблему: существует противоречие между интегративной, динамичной и нелинейной природой

рисков в современных ДТС и ограниченностью существующих методологий управления, основанных на принципах фрагментарности, реактивности и линейности.

Это противоречие проявляется в неспособности традиционных подходов обеспечить адекватный уровень безопасности в условиях возрастающей сложности транспортных систем. Несмотря на значительные инвестиции в безопасность дорожного движения, темпы снижения аварийности во многих странах замедлились. Разрешение выявленного противоречия требует не просто совершенствования существующих методов, но формирования нового научного подхода к управлению рисками в ДТС. Этот подход должен основываться на принципах системности, проактивности и адаптивности.

Интегративное управление рисками предполагает переход от управления отдельными компонентами к управлению системой в целом, от реагирования на произошедшие события к предвидению и предотвращению рисков, от статических решений к динамической адаптации управляющих воздействий. Управление рисками должно рассматривать систему как целое, а не как набор отдельных частей. Безопасность здесь – это результат слаженной работы всех элементов системы, а не просто их индивидуальных свойств. Основная идея – «пространство рисков». Его можно представить как многомерную карту, где каждая точка показывает, насколько безопасна система в данный момент.

В этом пространстве риски не являются изолированными событиями, но представляют собой траектории эволюции системы. Управление заключается в направлении этих траекторий в области с приемлемым уровнем риска через координированное воздействие на различные компоненты системы.

Реализация интегративного подхода требует применения принципов когнитивного управления, основанных на способности системы к восприятию, пониманию и предвидению. Когнитивная система управления рисками должна обладать следующими основными способностями.

Способность восприятия. Система анализирует дорожную обстановку, собирая данные с разных источников: датчиков на дорогах, подключенных автомобилей и даже смартфонов водителей и пешеходов. На основе этой информации создается виртуальная копия

транспортной системы, которая обновляется в реальном времени – своего рода «цифровой двойник» дорожной сети.

Аналитическая способность. Позволяет выявлять скрытые зависимости в данных, идентифицировать признаки опасных ситуаций, оценивать вероятности различных сценариев развития событий.

Предиктивная способность обеспечивает прогнозирование развития рисков на различных временных горизонтах – от секунд (предотвращение столкновений) до месяцев и лет (планирование инфраструктурных изменений).

Адаптивная способность позволяет системе обучаться на опыте, корректировать модели и стратегии управления в соответствии с изменяющимися условиями функционирования ДТС.

Технологической основой интегративного управления рисками является архитектура больших данных, способная обрабатывать разнородные потоки информации в режиме реального времени. Эта архитектура должна включать следующие компоненты:

- уровень сбора данных интегрирует информацию от всех доступных источников – от традиционных детекторов транспорта до социальных сетей и краудсорсинговых платформ;

- уровень хранения и обработки должен поддерживать как потоковую обработку данных для оперативного реагирования, так и пакетную обработку для глубокого анализа и обучения моделей;

- уровень аналитики и моделирования реализует алгоритмы машинного обучения, статистического анализа, имитационного моделирования;

- уровень принятия решений интегрирует результаты анализа с экспертными знаниями и нормативными ограничениями для выработки управляющих воздействий. Здесь применяются методы многокритериальной оптимизации и теории принятия решений в условиях неопределенности.

Методология синтеза интеллектуальных систем интегративного управления рисками основывается на системном подходе, рассматривающем процесс проектирования как итеративный цикл анализа, синтеза и валидации. Здесь главным является совместное проектирование технических, организационных и социальных компонентов системы.

Процесс начинается с системного анализа существующей ДТС, выявления основных источников рисков, картирования взаимосвязей между компонентами системы. На этом этапе формируется модель

предметной области, определяющая основные сущности, их атрибуты и отношения. Эта модель служит основой для всех последующих этапов проектирования.

Следующим шагом является определение целевой архитектуры системы управления рисками. Перспективным является подход Model-Based Systems Engineering (MBSE), позволяющий формализовать требования к системе и проследить их реализацию на всех уровнях проектирования [3]. Архитектура разрабатывается с учетом принципов модульности, масштабируемости и эволюционного развития. Особое внимание уделяется определению границ системы и интерфейсов взаимодействия с внешней средой: существующими системами управления движением, информационными системами участников движения, органами управления.

Процесс синтеза включает выбор и адаптацию алгоритмических решений, проектирование информационной архитектуры, разработку протоколов взаимодействия компонентов. Применяется принцип разделения ответственности, позволяющий независимо разрабатывать и модифицировать отдельные компоненты системы.

Валидация проектных решений осуществляется через серию симуляционных экспериментов, пилотных внедрений и натурных испытаний. Разрабатывается комплексная методика оценки эффективности системы, включающая как количественные метрики безопасности, так и качественные показатели удобства использования и социальной приемлемости.

Центральным элементом методологии является создание комплексных моделей ДТС, способных воспроизводить динамику рисков на различных уровнях детализации. Применяется многоуровневый подход к моделированию, включающий микроскопические модели взаимодействия отдельных участников движения, мезоскопические модели транспортных потоков и макроскопические модели функционирования транспортной сети.

Разработка алгоритмов управления основывается на методах искусственного интеллекта, адаптированных к специфике задач управления рисками в ДТС. Основными классами алгоритмов являются:

- алгоритмы обнаружения аномалий и предвестников опасных ситуаций, основанные на глубоком обучении и анализе временных рядов;
- алгоритмы прогнозирования эволюции рисков, использующие рекуррентные нейронные сети и методы ансамблевого обучения;

– алгоритмы оптимизации управляющих воздействий, основанные на методах обучения с подкреплением и многоагентной оптимизации.

Важным аспектом методологии является проектирование эффективного человеко-машинного взаимодействия. Интеллектуальная система управления рисками должна функционировать не как «черный ящик», но как партнер человека-оператора, обеспечивая прозрачность принимаемых решений и возможность экспертного вмешательства. Особое внимание уделяется проблеме доверия к автоматизированным системам.

Реализация интегративного управления рисками неизбежно столкнется с рядом технологических сложностей. Обработка больших объемов разнородных данных в реальном времени требует развития новых вычислительных архитектур, способных обеспечить необходимую производительность при приемлемых затратах.

Внедрение интегративного управления рисками требует изменения организационных структур и процессов управления ДТС. Необходима интеграция традиционно разрозненных служб и ведомств, создание новых форм межведомственного взаимодействия и координации.

Социальная приемлемость новых технологий управления представляет отдельную проблему. Вопросы приватности, связанные со сбором и анализом данных о перемещениях, этические аспекты автоматизированного принятия решений, влияющих на безопасность людей, требуют тщательной проработки и общественного диалога.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные дорожно-транспортные системы представляют собой сложные социо-киберфизические системы, управление рисками, в которых требует принципиально новых подходов. Выявленное противоречие между интегративной природой рисков и фрагментарностью существующих методов управления обуславливает необходимость формирования новой научной парадигмы – парадигмы интегративного управления рисками.

Предложенная концепция основывается на применении когнитивных технологий и архитектур больших данных для создания интеллектуальных систем управления, способных к проактивному, системному управлению безопасностью ДТС.

Реализация парадигмы интегративного управления рисками требует междисциплинарных усилий, объединяющих достижения в области искусственного интеллекта, теории управления, транспортной инженерии, социальных наук.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на детальную проработку предложенных концепций, создание прототипов интеллектуальных систем управления и их апробацию в реальных условиях. Особое внимание следует уделить вопросам масштабирования решений и обеспечения их социальной приемлемости. Формирование новой парадигмы управления рисками в ДТС является не только научной, но и социальной задачей, требующей активного вовлечения всех заинтересованных сторон.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Health Organization. Global status report on road safety 2023. – URL: iris.who.int/bitstream/handle/10665/375016/9789240086517-eng.pdf (date of access: 14.06.2025).

2. Капский, Д. В. Влияние дорожной и интеллектуальной транспортной инфраструктуры на безопасность движения: новые подходы к классификации рисков / Д. В. Капский, С. В. Богданович, М. Г. Бурова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – № 1. – С. 39–48.

3. Shevchenko, N. An Introduction to Model-Based Systems Engineering (MBSE) / N. Shevchenko // Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute's Insights. – (blog), Accessed June 17, 2025.

Представлено 24.06.2025