

БОГДАНОВИЧ С. В., канд. техн. наук, доц.,
доц. каф. «Транспортные системы и технологии»
E-mail: bsw001@gmail.com

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 16.07.2024

МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ И ДОЛГОСРОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ В УПРАВЛЕНИИ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В данной статье представлена комплексная методология системного анализа обратных связей и долгосрочных эффектов в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры. Исследование направлено на разработку инновационного подхода к оценке и повышению безопасности дорожного движения с учетом сложности и динамичности транспортных систем. Методология основана на интеграции системно-динамического моделирования, методов машинного обучения и экспертных оценок. Она позволяет выявлять и анализировать обратные связи в системе безопасности дорожной инфраструктуры, прогнозировать долгосрочные последствия принимаемых решений и разрабатывать более эффективные стратегии управления. В статье рассматриваются теоретические основы системного анализа безопасности дорожной инфраструктуры, методы количественной и качественной оценки обратных связей, а также подходы к анализу долгосрочных последствий. Особое внимание уделяется интегрированному подходу, объединяющему различные методы и инструменты для всестороннего анализа. Автор предлагает рекомендации по внедрению разработанной методологии в практику управления, учитывая возможные ограничения и адаптацию к различным контекстам. Также рассматриваются перспективы развития методологии, включая интеграцию новейших технологий и учет глобальных трендов, влияющих на безопасность дорожного движения. Исследование имеет практическую ценность, предоставляя инструментарий для принятия более обоснованных решений в сфере управления безопасностью дорожной инфраструктуры. Применение предложенной методологии может способствовать снижению числа дорожно-транспортных происшествий и связанных с ними потерь, улучшая качество жизни и экономическое благосостояние общества.

Ключевые слова: безопасность дорожной инфраструктуры, системный анализ, обратные связи, долгосрочные эффекты, системно-динамическое моделирование, управление рисками.

Введение

Безопасность дорожной инфраструктуры в современном мире является критически важным аспектом устойчивого развития общества и экономики. Несмотря на значительные усилия, предпринимаемые во всем мире, проблема дорожно-транспортных происшествий (ДТП) остается одной из главных причин смертности и травматизма. По данным Всемирного банка, ежегодные экономические потери от ДТП составляют около 3 % мирового ВВП, что эквивалентно примерно 2,3 триллиона долларов США [1].

Кроме того, растущая урбанизация и автомобилизация создают дополнительные вызовы

для систем управления дорожной безопасностью. К 2050 году ожидается, что 68 % мирового населения будет проживать в городах [2], что приведет к увеличению нагрузки на городскую дорожную инфраструктуру и потребует инновационных подходов к обеспечению безопасности.

Климатические изменения также оказывают существенное влияние на безопасность дорожной инфраструктуры. Увеличение частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений создает новые риски для дорожных сетей и требует адаптивных стратегий управления [3].

В контексте этих глобальных вызовов становится очевидной необходимость разработки более эффективных и комплексных подходов к управлению безопасностью дорожной инфраструктуры, учитывающих сложные взаимосвязи и долгосрочные последствия принимаемых решений.

Целью данного исследования является разработка комплексной методологии системного анализа обратных связей и долгосрочных эффектов в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ существующих подходов к оценке безопасности дорожной инфраструктуры и выявить их ограничения в контексте современных вызовов.

2. Разработать концептуальную модель безопасности дорожной инфраструктуры как сложной адаптивной системы с учетом множественных обратных связей.

3. Предложить методы выявления и классификации обратных связей в системе безопасности дорожной инфраструктуры, интегрирующие количественные и качественные подходы.

4. Разработать алгоритмы оценки обратных связей и их влияния на долгосрочные результаты, учитывающие неопределенность и динамичность внешней среды.

5. Создать интегрированный подход к анализу обратных связей и прогнозированию долгосрочных последствий принимаемых решений, основанный на современных методах анализа данных и моделирования.

Современные исследования в области безопасности дорожной инфраструктуры все чаще обращаются к системному подходу, признавая сложность и взаимосвязанность факторов, влияющих на безопасность дорожного движения [4]. Концепция «безопасной системы» (Safe System Approach), продвигаемая Всемирным Банком, Всемирной организацией здравоохранения и другими международными организациями, подчеркивает необходимость целостного подхода к управлению безопасностью [5].

Однако, несмотря на растущее признание важности системного подхода, существует значительный разрыв между теоретическими концепциями и их практическим применением в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры. Большинство существующих методов оценки и управления безопасностью по-прежнему основаны на линейных моделях и не учитывают сложные обратные связи и долгосрочные эффекты [6].

Развитие технологий больших данных и искусственного интеллекта открывает новые возможности для более глубокого анализа и прогнозирования в сфере безопасности дорожного движения [7]. Однако интеграция этих технологий в существующие системы управления безопасностью остается сложной задачей, требующей междисциплинарного подхода и новых методологических разработок.

Таким образом, существует необходимость в разработке комплексной методологии, которая могла бы преодолеть ограничения существующих подходов и обеспечить более эффективное и устойчивое управление безопасностью дорожной инфраструктуры в долгосрочной перспективе.

Теоретические основы системного анализа безопасности дорожной инфраструктуры

Безопасность дорожной инфраструктуры представляет собой сложную адаптивную систему, характеризующуюся множеством взаимосвязанных элементов, нелинейными взаимодействиями и динамическим поведением. Эта система включает в себя не только физические компоненты дорожной инфраструктуры, такие как дороги, знаки и светофоры, но и человеческий фактор, транспортные средства, законодательство и социально-экономические условия.

Системный подход к анализу безопасности дорожной инфраструктуры позволяет учитывать многоуровневость проблемы, от микроуровня отдельных элементов дороги до макроуровня национальной транспортной политики. Междисциплинарность является ключевой характеристикой этого подхода, интегрируя знания из инженерии, психологии, экономики и других областей. Важно также отметить эмерджентность системы безопасности дорожной инфраструктуры, где возникают новые свойства, не присущие отдельным ее элементам [8].

Адаптивность системы проявляется в ее способности изменяться в ответ на внешние и внутренние воздействия. Это особенно важно в контексте быстро меняющихся технологий и социальных норм, влияющих на поведение участников дорожного движения. Применение теории сложных систем к безопасности дорожной инфраструктуры позволяет выявить скрытые закономерности и потенциальные точки воздействия для повышения общей эффективности системы.

Обратные связи играют ключевую роль в динамике сложных систем, в том числе

и в системе безопасности дорожной инфраструктуры. Они могут быть как положительными (усиливающими изменения), так и отрицательными (стабилизирующими систему). Понимание и анализ этих обратных связей критически важны для эффективного управления безопасностью дорожного движения [9].

Примером положительной обратной связи может служить ситуация, когда внедрение новых технологий безопасности повышает доверие водителей и стимулирует более рискованное поведение. Это, в свою очередь, может привести к увеличению числа аварий, что потребует дальнейшего усиления мер безопасности. С другой стороны, отрицательная обратная связь может проявляться в том, как улучшение качества дорог приводит к увеличению скорости движения, что потенциально снижает общий уровень безопасности.

Идентификация и анализ таких обратных связей позволяют прогнозировать долгосрочные последствия принимаемых решений и разрабатывать более эффективные стратегии управления безопасностью. Важно отметить, что обратные связи могут действовать на различных временных масштабах, от немедленных эффектов до долгосрочных изменений в поведении участников дорожного движения и структуре транспортной системы [9].

Теория управления рисками предоставляет важный инструмент для анализа и улучшения безопасности дорожной инфраструктуры. В контексте дорожной безопасности риск можно определить как комбинацию вероятности возникновения нежелательного события (например, ДТП) и серьезности его последствий. Управление рисками в этой сфере включает в себя идентификацию, оценку, приоритизацию и минимизацию рисков.

Современные подходы к управлению рисками в дорожной безопасности основываются на принципе «Vision Zero», который предполагает, что ни одна человеческая жизнь не должна быть потеряна в результате дорожно-транспортных происшествий. Этот подход требует системного мышления и признания того, что ответственность за безопасность лежит не только на участниках дорожного движения, но и на проектировщиках дорожной инфраструктуры, производителях транспортных средств и лицах, принимающих политические решения [10].

Интеграция теории управления рисками с системным анализом обратных связей позволяет более точно оценивать долгосрочные последствия различных мер безопасности и раз-

рабатывать более устойчивые стратегии снижения рисков.

Междисциплинарный подход к анализу безопасности дорожной инфраструктуры является необходимым условием для комплексного понимания и эффективного управления этой сложной системой. Он объединяет знания и методы из различных областей, включая инженерию, психологию, социологию, экономику и информатику [11].

Инженерные аспекты фокусируются на проектировании и поддержании физической инфраструктуры, в то время как психологические исследования помогают понять поведение участников дорожного движения и факторы, влияющие на принятие решений в различных дорожных ситуациях. Социологический подход рассматривает влияние культурных норм и социальных факторов на безопасность дорожного движения. Экономические исследования оценивают затраты и выгоды различных мер безопасности, а также экономические последствия дорожно-транспортных происшествий [12].

Информационные технологии и анализ данных играют все более важную роль в этом междисциплинарном подходе, предоставляя инструменты для сбора и анализа больших объемов данных о дорожном движении и безопасности. Интеграция этих различных дисциплин позволяет создать более полную картину системы безопасности дорожной инфраструктуры и разработать более эффективные стратегии ее улучшения.

Таким образом, теоретические основы системного анализа безопасности дорожной инфраструктуры представляют собой синтез различных научных подходов, объединенных общей целью создания более безопасной и устойчивой транспортной системы.

Методология анализа обратных связей в системе безопасности дорожной инфраструктуры

Выявление и классификация обратных связей в системе безопасности дорожной инфраструктуры требует систематического подхода, основанного на ряде ключевых принципов. Холистический подход предполагает рассмотрение системы в целом, а не только отдельных ее компонентов. Это позволяет выявить взаимосвязи, которые могут быть не очевидны при анализе изолированных элементов системы [11].

Междисциплинарность является критически важным принципом, обеспечивающим интеграцию знаний из различных областей, включая

инженерию, психологию, социологию и экономику. Такой подход позволяет учесть многообразие факторов, влияющих на безопасность дорожного движения.

Временная динамика также играет ключевую роль в анализе обратных связей. Необходимо учитывать краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные эффекты, так как некоторые обратные связи могут проявляться только через значительные промежутки времени.

Многоуровневый анализ предполагает рассмотрение обратных связей на микро-, мезо- и макроуровнях системы. Это позволяет выявить взаимодействия между различными уровнями организации дорожной инфраструктуры и безопасности [13].

Для классификации обратных связей предлагается использовать следующие критерии: направление влияния (положительные или отрицательные), временной масштаб (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные), область влияния (технические, поведенческие, социальные, экономические аспекты) и интенсивность влияния (сильные, умеренные или слабые).

В количественной оценке обратных связей ключевую роль играет математическое моделирование. Системно-динамическое моделирование позволяет создавать комплексные модели, описывающие динамику системы с учетом множественных обратных связей. Эти модели могут включать дифференциальные уравнения, описывающие изменения различных параметров системы во времени [13].

Например, модель, описывающая влияние улучшения качества дорог на безопасность, может быть представлена системой уравнений:

$$\begin{cases} dQ/dt = \alpha \cdot I - \beta \cdot Q \\ dS/dt = \gamma \cdot Q - \delta \cdot V, \\ dV/dt = \varepsilon \cdot Q - \zeta \cdot S \end{cases}$$

где Q – качество дорог, которое может быть выражено, например, значением ровности покрытия;

I – инвестиции;

S – уровень безопасности;

V – средняя скорость движения;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$ – коэффициенты, отражающие силу связей между переменными.

Статистические методы, такие как анализ временных рядов и регрессионный анализ, позволяют выявлять статистические закономерности и корреляции между различными показателями безопасности во времени [13]. Например,

метод векторной авторегрессии (VAR) может быть использован для моделирования взаимосвязей между несколькими временными рядами, такими как количество ДТП, интенсивность движения и меры по улучшению безопасности.

Методы машинного обучения, такие как нейронные сети и алгоритмы глубокого обучения, предоставляют мощные инструменты для анализа сложных нелинейных взаимосвязей в системе безопасности дорожной инфраструктуры. Так, рекуррентные нейронные сети (RNN) могут быть использованы для прогнозирования долгосрочных эффектов различных мер безопасности, учитывая временную динамику системы [14].

Качественные методы оценки обратных связей дополняют количественные подходы, позволяя учесть факторы, которые трудно формализовать математически. Экспертные оценки играют важную роль в этом процессе, привлекая специалистов из различных областей для идентификации и оценки обратных связей. Метод Дельфи может быть использован для структурированного сбора и анализа экспертных мнений [15].

Когнитивное картирование представляет собой эффективный инструмент для визуального представления сложных взаимосвязей между элементами системы. Это позволяет наглядно отобразить обратные связи и их влияние на различные аспекты безопасности дорожной инфраструктуры [16].

Сценарный анализ является ценным методом для разработки и анализа различных сценариев развития системы с учетом выявленных обратных связей. Этот подход позволяет оценить потенциальные долгосрочные последствия различных стратегий управления безопасностью [17].

Интеграция количественных и качественных методов анализа обратных связей позволит получить более полное и глубокое понимание динамики системы безопасности дорожной инфраструктуры. Этот интегрированный подход может включать следующие этапы:

1. Предварительный качественный анализ с использованием экспертных оценок и когнитивного картирования для выявления ключевых обратных связей и факторов влияния.

2. Разработка количественных моделей на основе выявленных взаимосвязей, используя методы системной динамики и статистического анализа.

3. Калибровка и валидация моделей с использованием исторических данных и экспертных оценок.

4. Проведение сценарного анализа с использованием разработанных моделей для оценки долгосрочных последствий различных стратегий.

5. Итеративное уточнение моделей и сценариев на основе новых данных и экспертных оценок.

Такой комплексный подход позволяет учесть как количественные, так и качественные аспекты обратных связей в системе безопасности дорожной инфраструктуры, обеспечивая более надежную основу для принятия управленческих решений.

Анализ долгосрочных последствий принимаемых решений

Прогнозирование долгосрочных эффектов в сфере безопасности дорожной инфраструктуры представляет собой сложную задачу, требующую комплексного подхода и учета множества факторов. Основной целью такого прогнозирования является выявление потенциальных последствий принимаемых решений в долгосрочной перспективе, что позволяет разрабатывать более эффективные стратегии управления безопасностью.

Системно-динамическое моделирование является одним из ключевых методов прогнозирования долгосрочных эффектов. Этот подход позволяет создавать компьютерные модели сложных систем, учитывающие множество взаимосвязанных факторов и обратных связей. В контексте безопасности дорожной инфраструктуры такие модели могут включать различные аспекты, такие как поведение участников дорожного движения, технические характеристики транспортных средств и дорожной инфраструктуры, экономические факторы и законодательные меры [11].

Например, модель может быть представлена системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} dS / dt = \alpha(I) - \beta(S) \cdot T, \\ dT / dt = \gamma(S) - \delta(E), \\ dE / dt = \varepsilon(T) - \zeta(R), \end{cases}$$

где S – уровень безопасности;

I – инвестиции в инфраструктуру;

T – интенсивность движения;

E – экономическая активность;

R – регуляторные меры;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$ – функции, описывающие взаимосвязи между переменными.

Сценарный анализ является другим важным методом, который предполагает разработку

и оценку различных возможных сценариев развития событий. В контексте безопасности дорожной инфраструктуры этот метод может быть использован для оценки потенциальных последствий внедрения новых технологий, изменений в законодательстве или социально-экономических трендов. Сценарный анализ может быть формализован с использованием методов теории вероятностей и нечеткой логики для учета неопределенности будущих событий [18].

Методы машинного обучения и искусственного интеллекта также находят все большее применение в прогнозировании долгосрочных эффектов. Нейронные сети, особенно рекуррентные нейронные сети (RNN) и долгая краткосрочная память (LSTM), могут быть использованы для прогнозирования долгосрочных трендов в области дорожно-транспортных происшествий на основе исторических данных и множества влияющих факторов [14]. Формально, прогноз может быть представлен как:

$$y(t+h) = f(x(t), x(t-1), \dots, x(t-n), \theta),$$

где $y(t+h)$ – прогнозируемое значение на h шагов вперед;

$x(t)$ – вектор входных переменных в момент времени t ;

θ – параметры модели;

f – нелинейная функция, представленная нейронной сетью.

При долгосрочном планировании в сфере безопасности дорожной инфраструктуры неизбежно возникают риски и неопределенности, которые необходимо учитывать для принятия обоснованных решений. Вероятностный анализ является одним из ключевых подходов к оценке рисков. Этот метод позволяет количественно оценить вероятность возникновения различных событий и их потенциальные последствия.

Байесовские сети представляют собой мощный инструмент для моделирования сложных взаимосвязностей и оценки рисков в условиях неопределенности. Они позволяют интегрировать экспертные знания с эмпирическими данными и обновлять оценки вероятностей по мере поступления новой информации. Формально, байесовская сеть может быть представлена как направленный ациклический граф $G = (V, E)$, где V – множество вершин, представляющих случайные переменные, а E – множество ребер, представляющих условные зависимости между переменными [19].

Анализ чувствительности является важным аспектом оценки рисков и неопределенностей. Этот метод позволяет определить, насколько сильно изменения различных факторов влияют на конечный результат. В контексте безопасности дорожной инфраструктуры анализ чувствительности может быть использован для выявления наиболее критичных факторов, влияющих на долгосрочную безопасность, и разработки стратегий по управлению этими факторами [20]. Математически, анализ чувствительности может быть выражен через частные производные выходной переменной по входным параметрам:

$$S_i = \partial Y / \partial X_i,$$

где S_i – индекс чувствительности;

Y – выходная переменная;

X_i – i -й входной параметр.

Важно отметить, что при долгосрочном планировании необходимо учитывать не только известные риски, но и так называемых «черных лебедей» - редкие и трудно предсказуемые события с потенциально высоким воздействием [21]. Для этого могут быть использованы методы экстремального анализа и теории экстремальных значений, которые позволяют моделировать и оценивать вероятность редких событий [22].

Интеграция различных методов анализа долгосрочных последствий и оценки рисков позволяет создать комплексную систему поддержки принятия решений в сфере управления безопасностью дорожной инфраструктуры. Такая система должна быть адаптивной, способной учитывать новые данные и изменения в окружающей среде, и предоставлять лицам, принимающим решения, актуальную информацию о потенциальных долгосрочных последствиях различных стратегий и мер безопасности [23].

Интегрированный подход к анализу обратных связей и долгосрочных последствий

Интегрированный подход к анализу обратных связей и долгосрочных последствий в сфере безопасности дорожной инфраструктуры требует разработки комплексной модели оценки. Эта модель должна объединять различные методы и инструменты, учитывая многомерность проблемы, взаимосвязанность факторов и динамический характер системы.

Основой комплексной модели служит системно-динамический подход, позволяющий моделировать сложные взаимодействия между

элементами системы безопасности дорожной инфраструктуры во времени. Этот подход, впервые предложенный еще в 1961 г. [24], дополняется методами машинного обучения для обработки больших объемов данных и экспертными оценками для учета качественных факторов.

Интеграция данных из различных источников является ключевым аспектом модели. Она включает статистику ДТП, информацию о состоянии инфраструктуры, данные о поведении участников движения и социально-экономические показатели. Для обработки этого массива информации применяются технологии больших данных и методы интеллектуального анализа данных [25].

Многоуровневое моделирование позволяет учитывать различные уровни анализа: от микроуровня отдельных участков дороги до макроуровня национальной транспортной системы. Этот подход обеспечивает всесторонний анализ взаимодействий между различными уровнями системы [26].

На основе комплексной модели оценки разрабатывается алгоритм принятия решений, учитывающий обратные связи и долгосрочные эффекты. Этот алгоритм обеспечивает систематический подход к анализу проблем и выбору оптимальных решений.

Процесс начинается с идентификации проблемы и определения целей. Затем проводится сбор и анализ данных с использованием методов интеллектуального анализа для выявления скрытых закономерностей и трендов.

Моделирование системы позволяет анализировать различные сценарии и оценивать потенциальные долгосрочные последствия решений. Это дополняется оценкой рисков и неопределенностей с применением методов вероятностного анализа и анализа чувствительности, как предлагает Р. Элвик в своей модели оценки безопасности дорожного движения [27].

На основе результатов моделирования и оценки рисков формируются альтернативные стратегии. Каждая стратегия оценивается с точки зрения ее потенциальной эффективности, рисков и долгосрочных последствий. Финальным шагом является выбор оптимальной стратегии и разработка плана ее реализации с механизмами мониторинга и обратной связи.

Важно отметить, что этот алгоритм предполагает итеративный подход с постоянной оценкой и корректировкой решений, что соответствует принципам адаптивного управления [28].

Важным элементом комплексной модели является визуализация результатов анализа. Использование современных технологий визуализации данных позволяет представить сложные взаимосвязи и долгосрочные тренды в наглядной форме, что облегчает принятие решений и коммуникацию между заинтересованными сторонами.

Визуализация может включать динамические графики, интерактивные карты и диаграммы причинно-следственных связей. Эти инструменты помогают лицам, принимающим решения, лучше понять сложные взаимодействия в системе и потенциальные последствия различных стратегий.

Интерпретация результатов анализа требует междисциплинарного подхода, объединяющего знания из области транспортной инженерии, психологии, экономики и других релевантных дисциплин. Это соответствует подходу «инженерии устойчивости», который подчеркивает важность системного мышления в управлении безопасностью [29].

Ключевым аспектом интерпретации является понимание ограничений модели и неопределенностей, связанных с долгосрочными прогнозами. Как отмечает С. Деккер, важно рассматривать результаты анализа не как окончательные предсказания, а как инструмент для лучшего понимания динамики системы и потенциальных последствий различных решений [30].

Применение этого интегрированного подхода позволяет принимать более обоснованные и эффективные решения в сфере управления безопасностью дорожной инфраструктуры, обеспечивая всестороннее понимание сложных взаимосвязей в системе и долгосрочных эффектов принимаемых решений.

Преимущества и ограничения методики

Предлагаемый подход имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными подходами к оценке безопасности дорожной инфраструктуры:

1. **Комплексность.** Методика учитывает широкий спектр факторов и их взаимосвязей, в отличие от традиционных подходов, часто фокусирующихся на отдельных аспектах безопасности.

2. **Долгосрочность.** Анализ долгосрочных эффектов позволяет выявлять отложенные последствия принимаемых решений, что редко учитывается в стандартных подходах.

3. **Адаптивность.** Итеративный характер методики позволяет корректировать стратегии на основе новых данных, что повышает эффек-

тивность управления в динамично меняющихся условиях.

4. **Интеграция количественных и качественных методов.** Это обеспечивает более полное понимание проблемы, учитывая как статистические данные, так и экспертные оценки.

5. **Визуализация результатов.** Использование современных методов визуализации облегчает понимание сложных взаимосвязей и принятие решений.

Однако следует отметить, что предложенная методика требует более значительных ресурсов и экспертизы для реализации по сравнению с традиционными подходами. При ее применении необходимо учитывать следующие ограничения и потенциальные проблемы:

1. **Сложность модели.** Комплексность модели может затруднять ее интерпретацию и применение лицами, принимающими решения, не имеющими специальной подготовки.

2. **Потребность в данных.** Методика требует большого объема разнообразных данных, что может быть проблематично при ограниченных ресурсах для сбора и анализа информации, что, в частности, свойственно для Республики Беларусь.

3. **Неопределенность долгосрочных прогнозов.** Несмотря на использование передовых методов моделирования, долгосрочные прогнозы всегда содержат элемент неопределенности, особенно в быстро меняющейся технологической и социальной среде.

4. **Риск переоценки технологических решений.** Существует опасность чрезмерного фокуса на технологических инновациях в ущерб другим аспектам безопасности, таким как человеческий фактор и социальные нормы.

5. **Этические вопросы:** Использование больших данных и методов машинного обучения может поднимать вопросы приватности и этики, требующие тщательного рассмотрения.

Для преодоления этих ограничений можно предпринять следующие действия:

– проводить регулярное обучение лиц, принимающих решения, основам системного анализа и интерпретации результатов моделирования;

– развивать партнерства между государственными органами, исследовательскими институтами и технологическими компаниями для обеспечения доступа к необходимым данным и экспертизе;

– использовать сценарный анализ и методы оценки рисков для учета неопределенности в долгосрочных прогнозах;

– обеспечивать баланс между технологическими и нетехнологическими мерами повышения безопасности;

– разработать четкие этические правила для использования данных и алгоритмов в управлении безопасностью дорожного движения.

Рекомендации по внедрению методики в практику управления

Внедрение разработанной методики системного анализа обратных связей и долгосрочных эффектов в управление безопасностью дорожной инфраструктуры требует комплексного подхода и поэтапной реализации (рис. 1).

Для успешного применения методики на практике необходимо учитывать особенности конкретной транспортной системы, имеющиеся ресурсы и институциональные рамки.

Первым шагом в процессе внедрения является формирование междисциплинарной команды специалистов, включающей экспертов

в области транспортной инженерии, анализа данных, системной динамики и управления проектами. Эта команда должна пройти специальное обучение по применению разработанной методики, включая освоение инструментов системно-динамического моделирования и методов машинного обучения.

Следующим этапом является проведение аудита существующих систем сбора и анализа данных о безопасности дорожного движения. На основе этого аудита разрабатывается план модернизации информационной инфраструктуры, включая внедрение современных систем мониторинга дорожной ситуации, интеграцию различных источников данных и создание единой аналитической платформы.



Рисунок 1 – Этапы внедрения методики системного анализа в управление безопасностью дорожной инфраструктуры

Параллельно с техническими аспектами внедрения необходимо проводить работу по адаптации нормативно-правовой базы. Это может включать внесение изменений в стандарты проектирования дорожной инфраструктуры, методики оценки эффективности мер безопасности и процедуры принятия решений в сфере управления дорожным движением.

Важным аспектом внедрения методики является разработка системы ключевых показателей эффективности (КРП), отражающих как краткосроч-

ные, так и долгосрочные эффекты принимаемых решений. Эта система должна учитывать не только традиционные показатели безопасности, такие как количество ДТП и число пострадавших, но и более широкий спектр факторов, включая экономические, социальные и экологические аспекты.

Пилотное внедрение методики рекомендуется проводить на ограниченной территории или в рамках конкретного проекта по улучшению безопасности дорожной инфраструктуры. Это позволит отработать все ас-

пекты применения методики, выявить потенциальные проблемы и разработать пути их решения.

Для адаптации методики к различным контекстам и условиям необходимо учитывать специфику местной транспортной системы, культурные особенности и экономические факторы. В развивающихся странах, где ресурсы для сбора и анализа данных могут быть ограничены, рекомендуется начинать с упрощенной версии методики, постепенно наращивая ее сложность по мере развития информационной инфраструктуры.

Ключевым фактором успешного внедрения методики является обеспечение поддержки со стороны лиц, принимающих решения на высоком уровне. Для этого необходимо проводить регулярные презентации и семинары, демонстрирующие потенциальные выгоды от применения системного подхода к управлению безопасностью дорожной инфраструктуры.

Мониторинг и оценка эффективности применения методики должны проводиться на регулярной основе (рис. 2). Для этого рекомендуется использовать комбинацию количественных и качественных методов, включая анализ статистических данных, экспертные оценки и опросы заинтересованных сторон. Результаты мониторинга должны использоваться для непрерывного улучшения методики и ее адаптации к меняющимся условиям.



Рисунок 2 – Цикл мониторинга и улучшения методики

В заключение следует отметить, что внедрение разработанной методики системного анализа обратных связей и долгосрочных эффектов в управление безопасностью дорожной инфраструктуры является сложным, но необходимым шагом для повышения эффективности транспортных систем и снижения числа дорожно-транспортных происшествий. Успешное применение методики требует не только

технических и аналитических навыков, но и изменения культуры управления, перехода к более комплексному и долгосрочному видению проблем безопасности дорожного движения.

Перспективы развития методологии

Разработанная методология системного анализа обратных связей и долгосрочных эффектов в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры открывает широкие возможности для дальнейшего развития и совершенствования.

Одним из ключевых направлений развития методологии является ее интеграция с новейшими технологиями (рис. 3).



Рисунок 3 – Интеграция новых технологий в методологию системного анализа

Искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение могут значительно усилить аналитические возможности методологии [31]. Например, использование глубоких нейронных сетей позволит более точно прогнозировать долгосрочные эффекты принимаемых решений, учитывая сложные нелинейные взаимосвязи между различными факторами.

Технология Интернета вещей (IoT) открывает новые возможности для сбора данных о состоянии дорожной инфраструктуры и поведении участников движения в режиме реального времени [32]. Интеграция этих данных в модели системной динамики позволит создать более точные и адаптивные системы управления безопасностью.

Технологии виртуальной (VR) и дополненной (AR) реальности могут быть использованы для создания более наглядных и интерактивных визуализаций результатов анализа. Это поможет лицам, принимающим решения, лучше понять сложные взаимосвязи и потенциальные последствия различных стратегий.

Блокчейн технология может быть использована для системного анализа обратных связей и долгосрочных эффектов в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры, обеспечивая централизованное хранение данных, автоматический сбор и анализ данных, управление идентификацией и доступом, интеграцию с другими системами, а также прозрачность и отчетность.

Широкие перспективы открывают квантовые вычисления: квантовые компьютеры могут быть задействованы для задач моделирования, оптимизации, машинного обучения, симуляции различных сценариев на дороге, криптографии при обеспечении безопасности и целостности данных о дорожной инфраструктуре и ДТП.

Развитие методологии должно учитывать глобальные тренды, которые будут оказывать существенное влияние на транспортные системы и безопасность дорожного движения в будущем (табл. 1).

К особенностям адаптации методологии при этом относятся следующие аспекты:

1. Урбанизация и развитие мегаполисов. Этот тренд требует адаптации методологии к специфике управления безопасностью в условиях сверхплотной городской застройки и сложных транспортных потоков [33].

2. Климатические изменения. Методология должна учитывать возрастающие риски, связанные с экстремальными погодными явлениями и их влиянием на дорожную инфраструктуру [34].

3. Переход к электромобилям и альтернативным видам транспорта. Необходимо адаптировать модели к изменяющимся характеристикам транспортных средств и новым паттернам мобильности.

4. Развитие шеринговой экономики в сфере транспорта. Методология должна учитывать влияние каршеринга, райдшеринга и других форм совместного использования транспорта на безопасность дорожного движения.

5. Старение населения в развитых странах. Это требует адаптации моделей к изменяющимся потребностям и возможностям участников дорожного движения.

Таблица 1 – Влияния глобальных трендов на безопасность дорожной инфраструктуры

Глобальный тренд	Потенциальное влияние на безопасность	Необходимые адаптации методологии
Урбанизация	Увеличение плотности движения, рост числа конфликтных точек	Разработка моделей для сверхсложных урбанистических систем
Климатические изменения	Повышение рисков, связанных с экстремальными погодными явлениями	Интеграция климатических моделей в анализ рисков
Электромобили и альтернативный транспорт	Изменение динамики ДТП, новые риски (например, бесшумность электромобилей)	Адаптация моделей к характеристикам новых видов транспорта
Шеринговая экономика	Изменение паттернов использования транспорта, новые риски для неопытных водителей	Учет влияния шеринга на поведение участников движения
Старение населения	Изменение психофизических характеристик водителей и пешеходов	Адаптация моделей к потребностям старшего поколения

Для дальнейшего развития методологии системного анализа в сфере безопасности дорожной инфраструктуры предлагаются следующие направления исследований:

1. Разработка методов интеграции качественных данных, таких как экспертные оценки и результаты социологических опросов, в количественные модели системной динамики.

2. Исследование возможностей применения теории сложных адаптивных систем для моделирования эволюции транспортных систем и поведения участников дорожного движения.

3. Разработка методов оценки долгосрочных социальных и экономических эффектов от повышения безопасности дорожной инфраструктуры, включая влияние на качество жизни и экономическое развитие.

4. Исследование этических аспектов применения методов искусственного интеллекта и больших данных в управлении безопасностью дорожного движения, разработка принципов этичного использования данных и алгоритмов.

5. Изучение возможностей применения концепций поведенческой экономики для разработки более эффективных стратегий влияния на поведение участников дорожного движения.

6. Исследование методов интеграции микро- и макроуровневых моделей для создания многомасштабных симуляций транспортных систем.

7. Разработка методов оценки устойчивости и адаптивности транспортных систем к различным шокам и долгосрочным изменениям.

В заключение следует отметить, что развитие методологии системного анализа обратных связей и долгосрочных эффектов в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры является непрерывным процессом. По мере развития технологий, изменения социально-экономических условий и появления новых вызовов в сфере безопасности дорожного движения, методология должна адаптироваться и совершенствоваться. Междисциплинарный подход и открытость к инновациям будут ключевыми факторами успешного развития методологии в будущем.

Заключение

В результате проведенного исследования была предложена комплексная методология системного анализа обратных связей и долгосрочных эффектов в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры. Ключевым достижением стало создание интегрированного подхода, объединяющего различные методы и инструменты для всестороннего анализа сложной динамики транспортных систем.

Исследование показало, что безопасность дорожной инфраструктуры представляет собой сложную адаптивную систему с множеством взаимосвязанных элементов и нелинейными взаимодействиями. Выявление и анализ обратных связей в этой системе позволяет прогнозировать долгосрочные последствия принимаемых решений и разрабатывать более эффективные стратегии управления безопасностью.

Предлагаемая методология включает в себя системно-динамическое моделирование, методы машинного обучения, экспертные оценки и современные технологии визуализации данных. Такой комплексный подход обеспечивает более глубокое понимание факторов, влияющих на безопасность дорожного движения, и позволяет учитывать долгосрочные эффекты принимаемых решений.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их применения для повышения эффективности управления безопасностью дорожной инфраструктуры. Методология предоставляет инструментарий для принятия более обоснованных решений с учетом сложных взаимосвязей и долгосрочных последствий.

Внедрение данной методологии в практику управления позволит улучшить прогнозирование потенциальных рисков и эффективности мер безопасности, что в конечном итоге может привести к снижению числа дорожно-

транспортных происшествий и связанных с ними человеческих и экономических потерь.

Следует отметить возможность адаптации методологии к различным контекстам и условиям, что делает ее применимой как в развитых, так и в развивающихся странах. Предложенные рекомендации по внедрению методологии учитывают возможные ограничения ресурсов и существующие институциональные рамки.

Перспективы дальнейшего развития темы связаны с несколькими ключевыми направлениями. Во-первых, интеграция новейших технологий, таких как искусственный интеллект, Интернет вещей и квантовые вычисления, открывает новые возможности для более точного анализа и прогнозирования в сфере безопасности дорожного движения.

Во-вторых, учет глобальных трендов, таких как урбанизация, климатические изменения и переход к электромобилям, требует постоянной адаптации методологии к меняющимся условиям. Это предполагает разработку новых моделей и подходов, учитывающих эти долгосрочные изменения.

В-третьих, существует потребность в дальнейших исследованиях для улучшения интеграции качественных и количественных данных, разработки многомасштабных моделей и изучения этических аспектов применения новых технологий в управлении безопасностью дорожного движения.

Развитие методологии системного анализа в сфере безопасности дорожной инфраструктуры представляет собой непрерывный процесс, требующий междисциплинарного подхода и открытости к инновациям. Продолжение исследований в этой области имеет потенциал для существенного улучшения безопасности дорожного движения и, как следствие, повышения качества жизни и экономического благосостояния общества.

Литература

1. Wambulwa, William Majani; Job, Raymond Franklin Soames; Turner, Blair Matthew. Guide for Road Safety Opportunities and Challenges : Low and Middle Income Country Profiles (English). Washington, D.C. : World Bank Group : [website]. – URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/447031581489115544/Guide-for-Road-Safety-Opportunities-and-Challenges-Low-and-Middle-Income-Country-Profiles> (date of access: 15.07.2024).
2. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revi-

sion : [website]. – URL: [https:// population.un.org/wup/Publications/Files/ WUP 2018-Report.pdf](https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP_2018-Report.pdf). (date of access: 15.07.2024).

3. Капский, Д. В. Методология оценки воздействия изменения климата, уязвимости и климатических рисков в транспортной системе в Республике Беларусь / Д. В. Капский, С. В. Богданович, Ю. В. Буртыль. – Минск: БНТУ, 2022. – 256 с.

4. Salmon, Paul M.; Lenné, Michael G. . (2015). Miles away or just around the corner? Systems thinking in road safety research and practice. *Accident Analysis & Prevention*, 74, 243–249.

5. Global status report on road safety 2023. Geneva: World Health Organization; 2023. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO : [website]. – URL: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/375016/97892400865_17-eng.pdf (date of access: 15.07.2024).

6. Khan, Md Nasim & Das, Subasish. (2024). Advancing Traffic Safety through the Safe System Approach: A Systematic Review. *Accident Analysis & Prevention*. 199.

7. Shi, Qi & Abdel-Aty, Mohamed (2015). Big Data applications in real-time traffic operation and safety monitoring and improvement on urban expressways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 58.

8. Salmon, Paul M.; Lenné, Michael G. (2015). Miles away or just around the corner? Systems thinking in road safety research and practice. *Accident Analysis & Prevention*, 74(), 243–249.

9. Leveson, N. (2011). Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety. MIT press. IGO [website]. – URL: <http://sunnyday.mit.edu/safer-world.pdf> (date of access: 15.07.2024).

10. Wegman F.; Aarts L.; Bax Ch. (2008). Advancing sustainable safety: National road safety outlook for The Netherlands for 2005–2020. *Accident Analysis & Prevention*, 46(2), 323–343.

11. Sterman, John. (2000). *Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World* : [website]. – URL: [http://lst-iiiep.iiep-unesco.org/cgi-bin/wwwi32.exe/\[in=epidoc1.in\]/?t2000=013598/\(100\).19](http://lst-iiiep.iiep-unesco.org/cgi-bin/wwwi32.exe/[in=epidoc1.in]/?t2000=013598/(100).19) (date of access: 15.07.2024).

12. Nævestad, T. O., & Bjørnskau, T. (2011). How Can the Safety Culture Perspective be Applied to Road Traffic? *Transport Reviews*, 32(2), 139–154.

13. Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons : [website]. – URL: [http:// repo.darmajaya.ac.id/4781/1/Time%20Series%20Analysis_%20Forecas](http://repo.darmajaya.ac.id/4781/1/Time%20Series%20Analysis_%20Forecas)

[ting%20and% 20Control% 20%28%20PDFDrive% 20%29.pdf](http://repo.darmajaya.ac.id/4781/1/Time%20Series%20Analysis_%20Forecas) (date of access: 15.07.2024).

14. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT press : [website]. – URL: http://imlab.postech.ac.kr/dkim/class/csed514_2019s/DeepLearningBook.pdf (date of access: 15.07.2024).

15. Linstone, H. A., & Turoff, M. (Eds.). (1975). *The Delphi method: Techniques and applications*. Reading, MA: Addison-Wesley : [website]. – URL: [https:// www.foresight.pl/assets/downloads/publications/Turoff_Linstone.pdf](https://www.foresight.pl/assets/downloads/publications/Turoff_Linstone.pdf) (date of access: 15.07.2024).

16. Eden, C. (2004). Analyzing cognitive maps to help structure issues or problems. *European Journal of Operational Research*, 159(3), 673–686.

17. Amer, M., Daim, T. U., & Jetter, A. (2013). A review of scenario planning. *Futures*, 46, 23–40.

18. Schoemaker, P. J. (1995). Scenario planning: a tool for strategic thinking. *Sloan management review*, 36(2), 25–40.

19. Pearl, J. (2009). *Causality: Models, reasoning, and inference*. Cambridge university press.

20. Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., ... & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons : [website]. – URL: [http://www.andreasaltelli.eu/file/ repository/A_Saltelli_Marco_Ratto_Terry_Andres_Francesca_Campolongo_Jessica_Cariboni_Debora_Gatelli_Michaela_Saisana_Stefano_Tarantola_Global_Sensitivity_Analysis_The_Primer_Wiley_Interscience_2008_.pdf](http://www.andreasaltelli.eu/file/repository/A_Saltelli_Marco_Ratto_Terry_Andres_Francesca_Campolongo_Jessica_Cariboni_Debora_Gatelli_Michaela_Saisana_Stefano_Tarantola_Global_Sensitivity_Analysis_The_Primer_Wiley_Interscience_2008_.pdf) (date of access: 15.07.2024).

21. Галеб, Н. Н. Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости. – 2-е изд., доп. – М. : Ко-Либри, Азбука-Аттикус, 2020. – 736 с.

22. Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer.

23. Paté-Cornell, M. E. (2012). On Black Swans and Perfect Storms: risk analysis and management when statistics are not enough. *Risk analysis*, 32(11), 1823–1833.

24. Forrester, J.W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press : [website]. – Mode of access: http://www.lapropective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester-1961.pdf (date of access: 15.07.2024).

25. Vlek, C., & Steg, L. (2007). Human Behavior and Environmental Sustainability: Problems, Driving Forces, and Research Topics. *Journal of Social Issues*, 63(1), 1–19.

26. Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety Science*, 27(2–3), 183–213.
27. Elvik, R. (2009). The Power Model of the relationship between speed and road safety: update and new analyses. Institute of Transport Economics, Oslo : [website]. – URL: <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=13206>. (date of access: 15.07.2024).
28. Senge, P.M. (1990). *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Doubleday/Currency : [website]. – URL: <https://www.e-education.psu.edu/geog468/sites/www.e-education.psu.edu/geog468/files/TheFifthDiscipline.pdf> (date of access: 15.07.2024).
29. Hollnagel, E., Woods, D.D., & Leveson, N. (2006). *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate Publishing : [website]. – URL: <https://www.ida.liu.se/~729A98/Seminarier/articles/woods.pdf> (date of access: 15.07.2024).
30. Dekker, S. (2011). *Drift into Failure: From Hunting Broken Components to Understanding Complex Systems* (1st ed.). CRC Press.
31. Богданович, С. В. Анализ возможностей применения методов машинного обучения и анализа больших данных для выявления факторов риска в управлении безопасностью дорожной инфраструктуры / С. В. Богданович, Д. В. Капский // *Современные технологии в транспортной отрасли : электрон. сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25–26 апр. 2024 г. / Полоц. гос. ун-т имени Евфросинии Полоцкой*. – Новополоцк, 2024. – С. 114–117.
32. Богданович, С. В. Концепция создания транспортной информационно-сервисной платформы на основе технологии интернета вещей / С. В. Богданович // *Автотракторостроение и автомобильный транспорт. Сборник научных трудов : в 2 томах*. – Минск : БНТУ, 2022. – Том 2. – С. 117–120.
33. Капский, Д. В. Дизайн города и «транспортный» прогресс, обусловленный технологическим сдвигом / Д. В. Капский, С. В. Богданович, С. А. Ляпин // *Мир транспорта и технологических машин*. – Минск : БНТУ, 2024. – № 1-1(84). – С. 119–130.
34. Капский, Д. В. Чувствительность транспортной отрасли к изменению климата / Д. В. Капский, С. В. Богданович, Ю. В. Буртыль // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В*. – №1 – 2023. – Полоцк, 2023. – С. 54–59.

BOGDANOVICH Sergey V., Ph. D. in Eng., Ass. prof.,
Ass. prof. of the department «Transport systems and technologies»
email: bsw001@gmail.com

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 16 July 2024

METHODOLOGY FOR SYSTEMATIC ANALYSIS OF FEEDBACK LOOPS AND LONG-TERM EFFECTS IN ROAD INFRASTRUCTURE SAFETY MANAGEMENT

This article presents a comprehensive methodology for systematic analysis of feedback loops and long-term effects in road infrastructure safety management. The research aims to develop an innovative approach to assessing and improving road safety, taking into account the complexity and dynamism of transport systems.

The methodology is based on the integration of system dynamics modeling, machine learning methods, and expert assessments. It allows for identifying and analyzing feedback loops in the road infrastructure safety system, predicting long-term consequences of decisions, and developing more effective management strategies.

The article discusses the theoretical foundations of systematic analysis of road infrastructure safety, methods for quantitative and qualitative assessment of feedback loops, and approaches to analyzing long-term consequences. Special attention is paid to an integrated approach that combines various methods and tools for comprehensive analysis.

The author provides recommendations for implementing the developed methodology in management practice, considering possible limitations and adaptation to different contexts. The prospects for the development of the methodology are also discussed, including the integration of the latest technologies and consideration of global trends affecting road safety.

The research has significant practical value, providing tools for making more informed decisions in the field of road infrastructure safety management. The application of the proposed methodology can contribute to reducing the number of road traffic accidents and associated losses, improving the quality of life and economic well-being of society.

Keywords: Road infrastructure safety, Systems analysis, Feedback loops, Long-term effects, System dynamics modeling, Risk management

References

1. Wambulwa, William Majani; Job, Raymond Franklin Soames; Turner, Blair Matthew. Guide for Road Safety Opportunities and Challenges : Low and Middle Income Country Profiles (English). Washington, D.C. : World Bank Group : [website]. – URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/447031581489115544/Guide-for-Road-Safety-Opportunities-and-Challenges-Low-and-Middle-Income-Country-Profiles> (date of access: 15.07.2024).

2. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision : [website]. – URL: [https:// population.un.org/wup/Publications/Files/ WUP 2018-Report.pdf](https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP_2018-Report.pdf). (date of access: 15.07.2024).

3. Kapsky, D. V. Methodology for assessing the impact of climate change, vulnerability and

climatic risks in the transport system in the Republic of Belarus/ D. V. Kapsky, S. V. Bogdanovich, Yu. V. Burtyl. – Minsk: BNTU, 2022. – 256 p. (in Russian)

4. Salmon, Paul M.; Lenné, Michael G. . (2015). Miles away or just around the corner? Systems thinking in road safety research and practice. Accident Analysis & Prevention, 74, 243–249.

5. Global status report on road safety 2023. Geneva: World Health Organization; 2023. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO : [website]. – URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/375016/9789240086517-eng.pdf> (date of access: 15.07.2024).

6. Khan, Md Nasim & Das, Subasish. (2024). Advancing Traffic Safety through the Safe System Approach: A Systematic Review. Accident Analysis & Prevention. 199.

7. Shi, Qi & Abdel-Aty, Mohamed (2015). Big Data applications in real-time traffic operation and safety monitoring and improvement on urban expressways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58.
8. Salmon, Paul M.; Lenné, Michael G. (2015). Miles away or just around the corner? Systems thinking in road safety research and practice. *Accident Analysis & Prevention*, 74(), 243–249.
9. Leveson, N. (2011). *Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety*. MIT press. IGO [website]. – URL: <http://sunnyday.mit.edu/safer-world.pdf> (date of access: 15.07.2024).
10. Wegman F.; Aarts L.; Bax Ch. (2008). Advancing sustainable safety: National road safety outlook for The Netherlands for 2005–2020. *46(2)*, 323–343.
11. Stermann, John. (2000). *Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World* : [website]. – URL: [http://lst-iiiep.unesco.org/cgi-bin/wwwi32.exe/\[in=epidoc1.in\]/?t2000=013598/\(100\)](http://lst-iiiep.unesco.org/cgi-bin/wwwi32.exe/[in=epidoc1.in]/?t2000=013598/(100)). 19 (date of access: 15.07.2024).
12. Nævestad, T. O., & Bjørnskau, T. (2011). How Can the Safety Culture Perspective be Applied to Road Traffic? *Transport Reviews*, 32(2), 139–154.
13. Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons : [website]. – URL: http://repo.darmajaya.ac.id/4781/1/Time%20Series%20Analysis_%20Forecasting%20and%20Control%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf (date of access: 15.07.2024).
14. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT press : [website]. – URL: http://imlab.postech.ac.kr/dkim/class/csed514_2019s/DeepLearningBook.pdf (date of access: 15.07.2024).
15. Linstone, H. A., & Turoff, M. (Eds.). (1975). *The Delphi method: Techniques and applications*. Reading, MA: Addison-Wesley : [website]. – URL: https://www.foresight.pl/assets/downloads/publications/Turoff_Linstone.pdf (date of access: 15.07.2024).
16. Eden, C. (2004). Analyzing cognitive maps to help structure issues or problems. *European Journal of Operational Research*, 159(3), 673–686.
17. Amer, M., Daim, T. U., & Jetter, A. (2013). A review of scenario planning. *Futures*, 46, 23–40.
18. Schoemaker, P. J. (1995). Scenario planning: a tool for strategic thinking. *Sloan management review*, 36(2), 25–40.
19. Pearl, J. (2009). *Causality: Models, reasoning, and inference*. Cambridge university press.
20. Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., ... & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons : [website]. – URL: http://www.andreasaltelli.eu/file_repository/A_Saltelli_Marco_Ratto_Terry_Andres_Francesca_Campolongo_Jessica_Cariboni_Debora_Gatelli_Michaela_Saisana_Stefano_Tarantola_Global_Sensitivity_Analysis_The_Primer_Wiley_Interscience_2008.pdf (date of access: 15.07.2024).
21. Taleb, N. N. *Black Swan. Under the sign of unpredictability*. – 2nd ed., supplement. – N. N. Taleb. – M. : KoLibri, Azbukatticus, 2020. – 736 p. (in Russian)
22. Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer.
23. Paté-Cornell, M. E. (2012). On "Black Swans" and "Perfect Storms": risk analysis and management when statistics are not enough. *Risk analysis*, 32(11), 1823–1833.
24. Forrester, J.W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press : [website]. – Mode of access: http://www.lapropective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester-1961.pdf (date of access: 15.07.2024).
25. Vlek, C., & Steg, L. (2007). Human Behavior and Environmental Sustainability: Problems, Driving Forces, and Research Topics. *Journal of Social Issues*, 63(1), 1–19.
26. Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety Science*, 27(2–3), 183–213.
27. Elvik, R. (2009). *The Power Model of the relationship between speed and road safety: update and new analyses*. Institute of Transport Economics, Oslo : [website]. – URL: <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=13206> (date of access: 15.07.2024).
28. Senge, P.M. (1990). *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Doubleday/Currency : [website]. – URL: https://www.e-education.psu.edu/geog468/sites/www.e-education.psu.edu/geog468/files/The_FifthDiscipline.pdf (date of access: 15.07.2024).
29. Hollnagel, E., Woods, D.D., & Leveson, N. (2006). *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate Publishing : [website]. – URL: <https://www.ida.liu.se/~729A98/Seminarier/articles/woods.pdf> (date of access: 15.07.2024).
30. Dekker, S. (2011). *Drift into Failure: From Hunting Broken Components to Understanding Complex Systems* (1st ed.). CRC Press.
31. Bogdanovich, S. V. *Analysis of possibilities of using machine learning methods and big data analysis to identify risk factors in road infrastruc-*

ture safety management / S. V. Bogdanovich, D. V. Kapsky // Modern technologies in the transport industry [Electronic resource]: Electronic collection of articles. International scientific-technical conf., Novopolotsk, April 25–26, 2024 / Polotsk. 2024 / Polotsk State University named after Euphrosyne Polotskaya. – Novopolotsk, 2024. – pp. 114–117. (in Russian)

32. Bogdanovich, S. V. Concept of creation of transport information-service platform based on the Internet of Things technology / S. V. Bogdanovich // Autotractor building and automobile transport. Collection of scientific works.

In 2 volumes. – Vol. 2. – Minsk: BNTU. 2022. – pp. 117–120. (in Russian)

33. Kapsky, D. V. City design and "transport" progress due to technological shift / D. V. Kapsky, S. V. Bogdanovich, S. A. Lyapin // World of transport and technological machines. – 2024. – № 1-1(84). – pp. 119–130. (in Russian)

34. Kapsky, D. V. Sensitivity of the transport industry to climate change / D. V. Kapsky, S. V. Bogdanovich, Y. V. Burtyl // Bulletin of Polotsk State University. Series B. – №1. – 2023. – Polotsk, 2023. – pp. 54–59. (in Russian)

УДК 53.083.7, 621.33

ГУРСКИЙ А. С., канд. техн. наук, доц.,
зав. кафедрой «Техническая эксплуатация автомобилей»
E-mail: ASGURSKI@bntu.by

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 01.10.2024

СПОСОБЫ УЧЕТА УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРИОДИЧНОСТИ И ТРУДОЕМКОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА.

Оперативное управление техническим обслуживанием и ремонтом электрических автотранспортных средств (ЭАТС) значительно улучшается благодаря качественному анализу их состояния в процессе эксплуатации. Корректирование режимов эксплуатации электрических автотранспортных средств с использованием автоматизированной системы учета фактической работы ЭАТС позволит рассчитывать периодичности и трудоемкости технического обслуживания и ремонта, общего пробега до капитального ремонта или списания с учетом коэффициентов. Идеальным решением для функционирования автоматизированной системы является оперативный контроль ЭАТС объема выполненной работы при движении в различных условиях эксплуатации путем считывания комплекса технических эксплуатационных параметров. Одним из способов является определение коэффициента суммарного дорожного сопротивления на основании информации датчиков тока, скорости движения электрического автотранспортного средства, частоты вращения вала электродвигателя и нагрузки на ось. Значение коэффициента суммарного дорожного сопротивления может быть заложено в основу автоматизированного расчета коэффициента, учитывающего условия эксплуатации при выполнении фактической работы ЭАТС. Наибольшей точностью и информативностью обладает способ учета условий эксплуатации при определении коэффициента корректирования нормативов, на основании данных, получаемых от системы транспортной телематики предварительно сформированными в блоке