

Концепция жизненного цикла кибер-физико-социальной транспортной системы в период проведения массовых мероприятий



О. Ю. Булатова,
канд. техн. наук, доцент
кафедры «Организация
перевозок и дорожного
движения» Донского
государственного
технического
университета (ДГТУ),



В. В. Зырянов,
д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Организация перевозок
и дорожного движения»
ДГТУ

Инновационная комплексная модель жизненного цикла кибер-физико-социальной транспортной системы представляется в русскоязычной литературе впервые. Она разработана с целью решения задач обслуживания массовых мероприятий. Исследование призвано начать работу по заполнению теоретического пробела в области управления интегрированными транспортными системами.

Концепция кибер-физико-социальных систем (КФСС) предлагает комплексную методологию для управления транспортной инфраструктурой, интегрируя три ключевых компонента:

- кибернетический — интеллектуальные транспортные системы (автоматизированные системы управления и мониторинга, алгоритмы прогнозирования и оптимизации потоков, цифровые платформы для обработки данных в режиме реального времени);
- физический — инфраструктура (транспортные средства, объекты улично-дорожной сети и т. д.);

- социальный — поведенческие аспекты (психология поведения толпы, культурные особенности, соблюдение/несоблюдение правил дорожного движения).

Современный уровень исследования кибер-физико-социальных систем характеризуется развитием междисциплинарных подходов. В отечественной науке значительный вклад внесли работы Б. А. Левина и В. Я. Цветкова (2018), разработавшие теоретические основы интеграции киберфизических систем в транспортную инфраструктуру, а также исследования В. В. Зырянова, связанные с динамической маршрутизацией и управлением потоками в условиях



Таблица 1. Основные направления деятельности этапа планирования КФСС

Категория	Подкатегория	Элементы/характеристики
Основные направления работ	Определение технических требований	• Потребности целевых групп (организаторы, службы безопасности, медики, участники); • географические особенности территории; • прогнозируемые пиковые нагрузки; • приоритезация трафика
	Разработка архитектурных решений	• Выбор технологий передачи данных; • проектирование сетевой топологии; • стандартизация протоколов взаимодействия
	Организационная подготовка	• Календарный план внедрения; • система резервирования; • инструменты мониторинга; • обучение оперативного персонала; • оформление разрешительной документации; • финансовое планирование
Критические факторы успешной реализации этапа планирования		• Наличие экспертных компетенций; • специализированное ПО для проектирования; • достаточное финансирование; • доступ к актуальным данным
Потенциальные риски		• Неполное техническое задание; • ошибки в расчете нагрузок; • просчеты в архитектуре; • задержки поставок оборудования; • бюджетные ограничения; • административные барьеры; • недостаточная квалификация исполнителей
Критерии эффективности		• Комплексность (полнота учета параметров); • гибкость (адаптивность к изменениям); • надежность (устойчивость к воздействиям); • ресурсная оптимизация; • своевременность выполнения; • согласованность с заинтересованными сторонами

массовых мероприятий. А. В. Смирнов с соавторами (2019) предложили концептуальные модели социокиберфизических систем, акцентируя внимание на взаимодействии технических и социальных компонентов.

В международных исследованиях ключевыми направлениями стали: разработка безопасных аутентификационных протоколов (А. Abed et al., 2024), изучение психологических аспектов взаимодействия человека с КФСС (М. Dimitrova et al., 2024), применение методов искусственного интеллекта для оптимизации городских систем (R. Yu, 2024) и анализ этических последствий внедрения технологий (Chang, 2021).

Особое внимание уделяется вопросам устойчивости и адаптивности КФСС в условиях неопределенности, что нашло отражение в работах Teichmann (2024) по моделированию поведения пользователей в стрессовых ситуациях. Современные исследования демонстрируют переход от узкотехнических решений к комплексному рассмотрению технологических, социальных и организационных аспектов КФСС [1–14].

Кибер-физико-социальные системы представляют собой перспективное направление, позволяющее интегрировать социально-ориентированные модели и методы для разработки интеллектуальных и адаптивных транспортных систем. Особенностью данного подхода является равнозначный учет всех компонентов КФСС, где социальный аспект становится не дополнительным, а системообразующим элементом.

Несмотря на существующий прогресс в изучении кибер-физико-социальных систем, их применение в транспортной сфере, а также проблема управления их жизненным циклом в условиях массовых мероприятий остается недостаточно разработанной. Представленное исследование восполняет этот пробел, предлагая комплексную модель жизненного цикла КФСС, которая обеспечивает устойчивость, гибкость и эффективность транспортного обслуживания в условиях повышенных нагрузок. Данный подход позволяет минимизировать вероятность возникновения рисков и оптимизацию использования ресурсов.

В отличие от существующих моделей КФСС общего назначения, предлага-

емая методология специализирована для транспортных систем в условиях проведения массовых мероприятий через привязку к этапам мероприятия, а также учитывает транспортно-релевантные социальные факторы и обеспечивает адаптацию киберфизических компонентов под транспортную инфраструктуру. Работа позволяет устранить ключевой пробел в исследованиях КФСС — отсутствие отраслевых решений для транспортного сектора.

Задачи и подход к их решению

Проведение городских массовых мероприятий обусловлено существенными вызовами: резким возрастанием транспортной нагрузки (до 300–500% по сравнению с существующей), непредсказуемостью поведения участников (выбор вида транспортных средств, маршрутов и т. д.), рисками возникновения чрезвычайных ситуаций, экологическим воздействием (выбросы от движения транспортных средств, шумовое загрязнение).

Таким образом, можно выделить следующие ключевые требования к транспортному обслуживанию массовых мероприятий:

- обеспечение надежности при пиковых нагрузках;
- интеграция с городской инфраструктурой;
- учет особенностей различных групп населения;
- обеспечение психологического комфорта зрителям и участникам мероприятия;
- адаптация к культурным особенностям гостей мероприятия;
- межведомственная координация;
- обеспечение комплексной безопасности на территории проведения мероприятия.

Перечисленные задачи необходимо решать при помощи комплексного, интегрированного подхода, который обеспечивает реализация концепции кибер-физико-социальных систем [15–20].

С целью эффективного управления сложной, интегрированной системой КФСС необходимо поэтапное управление ее жизненным циклом. Он включает в себя различные стадии развития: планирование, развертывание, завершение, анализ и разработку рекомендаций.

Следует подчеркнуть, что управление жизненным циклом кибер-физико-социальной системы имеет ключевое зна-

Таблица 2. Основные направления деятельности этапа развертывания КФСС

Категория	Подкатегория	Элементы/характеристики
Основные задачи	Реализация системы связи	• Монтаж и конфигурирование оборудования (серверного, сетевого, телекоммуникационного); • установка и настройка ПО; • обеспечение совместимости с существующей ИТ-инфраструктурой
	Тестирование системы	• Проверка функциональной готовности; • тестирование производительности; • контроль безопасности
	Обучение пользователей	• Проведение тренингов; • разработка инструкций; • поддержка адаптации
Ключевые процессы	Ввод в эксплуатацию	• Перевод системы в рабочий режим; • назначение ответственных; • организация технической поддержки
Необходимые ресурсы		• Квалифицированный персонал; • техническое оснащение; • лицензионное ПО; • проектная документация; • финансирование
Потенциальные риски		• Технические ошибки монтажа; • проблемы интеграции; • недостаточное тестирование; • низкая подготовка пользователей; • аппаратные сбои; • угрозы информационной безопасности; • отклонения от сроков и бюджета
Критерии успешной реализации второго этапа		• Соблюдение сроков; • техническая исправность; • устойчивость работы; • защита информации; • удовлетворенность пользователей; • соблюдение бюджета

Таблица 3. Основные направления деятельности этапа завершения мероприятия

Категория	Подкатегория	Элементы/характеристики
Ключевые процедуры	Демонтаж инфраструктуры	• Консервация оборудования; • очистка носителей от конфиденциальных данных; • финансовое закрытие проекта
	Аналитическая работа	• Оценка технических показателей системы; • анализ удовлетворенности пользователей; • расчет ROI и эффективности
	Подготовка отчетной документации	• Подготовка итогового отчета; • формирование базы знаний; • разработка рекомендаций
Необходимые ресурсы		• Команда технических специалистов; • оборудование для демонтажа; • ПО для архивации данных; • бюджет на завершающие работы
Потенциальные риски		• Компрометация данных при передаче; • повреждение оборудования при демонтаже; • необъективность обратной связи; • превышение сроков закрытия
Критерии успешности		• Безопасный вывод оборудования; • полнота архивированных данных; • качество аналитического отчета; • своевременность завершения; • удовлетворенность заинтересованных сторон

чение в ряде аспектов. В частности, оно способствует повышению уровня безопасности за счет своевременного выявления и устранения угроз на всех этапах работы системы, что минимизирует риски возникновения аварийных ситуаций.

Также данный подход обеспечивает эффективное распределение ресурсов благодаря планированию и эффективному выполнению операций. Анализ взаимозависимостей между стадиями жизненного цикла системы позволяет формировать более устойчивую инфраструктуру, способную гибко реагировать на изменения внешней среды и непредвиденные события [11, 12].

Рассмотрим подробнее выявленные этапы жизненного цикла КФСС в период проведения массовых мероприятий.

Планирование

На начальной стадии проектирования КФСС осуществляется определение параметров системы связи, которая служит основой для интеграции кибернетических, физических и социальных компонентов (табл. 1).

Развертывание

Данный этап обеспечивает переход от теоретических разработок к функционированию инфраструктуры, создавая технологическую основу для интеграции кибернетических, физических и социальных компонентов системы (табл. 2).

Этап завершения мероприятия

Заключительная фаза жизненного цикла КФСС обеспечивает системный анализ результатов и методологическую базу для будущих проектов. Этап направлен на сохранение критически важных данных и оптимизацию организационных процессов (табл. 3).

Анализ и формирование рекомендаций

Данный этап обеспечивает системную оценку работы КФСС, выявляя ключевые направления для оптимизации (табл. 4).

Таким образом, жизненный цикл КФСС является структурированной последовательностью взаимосвязанных этапов, каждый из которых вносит свой вклад в общую эффективность транспортного обслуживания.

Интегральная эффективность кибер-физико-социальной транспортной системы может быть определена

Таблица 4. Основные направления деятельности этапа анализа и формирования рекомендаций

Этап	Компоненты	Характеристики
Системная оценка		- Выявление сильных/слабых сторон КФСС; - формирование рекомендаций; - обеспечение преемственности разработок
Анализ	Консолидация данных	- Показатели мониторинга; - статистика пассажиропотоков; - финансовая отчетность; - обратная связь участников
	Исследование	- Применение аналитических методов; - оценка КРІ (время ожидания, пропускная способность); - сравнение с плановыми значениями
	Разработка предложений	- Приоритезация по степени влияния; - проверка реализуемости; - соответствие критериям
Ресурсы		- Квалифицированные аналитики; - специализированное ПО; - техническое оборудование; - финансирование
Риски		- Неполнота данных; - ошибки интерпретации; - недостаток экспертизы; - нереалистичные рекомендации
Критерии успешной реализации этапа		- Полнота данных; - глубина анализа; - практическая ценность предложений; - поддержка заинтересованных сторон

Таблица 5. Сравнительная оценка эффективности функционирования транспортной системы в условиях Чемпионата мира по футболу 2018 г. в г. Ростов-на-Дону

Категория	Без КФСС (фактические показатели 2018 г.)	С КФСС
Общие затраты $S_{\text{общ}}$, млрд руб.	50	65
Время t , год	0,25	0,25
Ставка дисконтирования r	0,05	0,05
Коэффициент затухания λ	0,01	0,01
Волатильность σ	0,05	0,05
Случайная величина $\xi(t)$	0,1	0,05
Дополнительные затраты $R_j(t)$, млрд руб.	2	1
Коэффициент дополнительных затрат δ_j	0,1	0,1
Кибернетический аспект $I_{\text{кибер}}(t)$	0,5	0,9
Физический аспект $I_{\text{физ}}(t)$	0,8	0,9
Социальный аспект $I_{\text{соц}}(t)$	0,7	0,95
Весовые коэффициенты $\alpha_p, \beta_p, \gamma_i$	0,4; 0,3; 0,3	0,4; 0,3; 0,3

$$\mathcal{E}_{\text{КФСС}} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i I_{\text{кибер}}(t) K_{\text{тех}}(t) + \beta_i I_{\text{физ}}(t) K_{\text{инфр}}(t) + \gamma_i I_{\text{соц}}(t) K_{\text{адап}}(t)) e^{-\lambda t}}{(S_{\text{общ}}(1+r)^t + \sum_{j=1}^m \delta_j R_j(t))(1+\sigma \xi(t))},$$

следующим образом:

где $I_{\text{кибер}}(t)$, $I_{\text{физ}}(t)$, $I_{\text{соц}}(t)$ — динамические индикаторы, зависящие от времени t ;

$K_{\text{тех}}(t)$, $K_{\text{инфр}}(t)$, $K_{\text{соц}}(t)$ — адаптивные весовые коэффициенты, меняющиеся в зависимости от фазы жизненного цикла;

$\alpha_p, \beta_p, \gamma_i$ — коэффициенты взаимодействия между компонентами системы;

$e^{-\lambda t}$ — фактор дисконтирования;

$R_j(t)$ — дополнительные затраты;

$\sigma \xi(t)$ — стохастическая компонента (учет случайных факторов: погодные условия, чрезвычайные

ситуации и т. д.).

Рассмотрим эффективность реализации КФСС в условиях проведения чемпионата мира по футболу в г. Ростов-на-Дону в 2018 г. Для этого используем ретроспективные данные, предоставленные в открытых источниках и отчетных документах (табл. 5) ^{1,2}.

Проведенные расчеты интегральной эффективности транспортной системы в период проведения чемпионата мира демонстрируют значимость учета социального компонента при проектировании кибер-физико-социальных систем. Фактическая эффективность транспортного обслуживания в рамках традиционного подхода составила 0,0042, тогда как прогнозные расчеты с применением КФСС позволяют достичь значения 0,0047, что соответствует росту эффективности на 11,9%.

Поскольку в условиях массовых мероприятий транспортные системы работают на пределе пропускной способности, повышение эффективности функционирования транспортной системы почти на 12% явилось бы существенным достижением.

Данная оптимизация работы транспорта включает в себя снижение нагрузки и оптимизацию использования ресурсов, а также создание более комфортных условий дорожного движения, в которых повышение скорости потока на 12% может снизить вероятность возникновения транспортного затора с 25 до 5% [21, 22].

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что интеграция социального компонента в управление транспортными системами в условиях массовых мероприятий не только повышает устойчивость инфраструктуры, но и обеспечивает значимый экономический эффект.

Заключение

Исследование демонстрирует, что применение системного подхода к управлению жизненным циклом кибер-физико-социальной системы в условиях транспортного обслуживания массовых мероприятий формирует методологическую базу для организации эффективной адаптации транспортной инфраструктуры под требования массовых мероприятий. Предложенная кон-

¹ Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 21 июля 2014 г. № 1358-р.

² Концепция транспортного обеспечения Чемпионата мира по футболу FIFA 2018 в России. Утверждена Министром транспорта Российской Федерации М. С. Соколовым 16.12.2013.

цепция жизненного цикла КФСС является специализированным решением для их транспортного обеспечения.

Основные научные достижения исследования включают:

- Определение четырех этапов жизненного цикла КФСС (планирование, развертывание, завершение, анализ), адаптированных к специфике функционирования транспортных систем в условиях проведения массовых мероприятий.
- Формулировку принципов интеграции кибернетических, физических и социальных компонентов в единую управляемую систему.
- Представленные результаты создают методологическую основу для дальнейших исследований в области адаптивных транспортных систем и их жизненных циклов.

Предложенная концепция жизненного цикла кибер-физико-социальной транспортной системы обладает прикладной значимостью для Российской Федерации, особенно в контексте проведения массовых мероприятий различного уровня. Она позволит оптимизировать транспортное обслуживание в условиях пиковых нагрузок, снизить риски возникновения чрезвычайных ситуаций и повысить комфорт участников мероприятий, что соответствует целям национальных проектов «Безопасные качественные дороги» и «Умный город».

Дальнейшее развитие данной концепции может стать основой для создания стандартов управления транспортом при проведении массовых событий в РФ, способствуя укреплению имиджа страны как организатора крупных международных мероприятий.

Источники

1. Левин Б. А., Цветков В. Я. Киберфизические системы в управлении транспортом // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 2. С. 138–145. DOI: 10.30932/1992-3252-2018-16-2-13.
2. Зырянов В. В., Феофилова А. А., Чулкинов Н. Н. Динамическая маршрутизация транспортных потоков как метод снижения транспортной нагрузки на элементы УДС // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 1(60). С. 74–80. EDN: XMPWOL (дата обращения: 25.05.2025).
3. Зырянов В. В., Загидуллин Р. Р. Методика оценки и выбора варианта организации движения транспорта при проведении масштабных массовых

- мероприятий // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 2. С. 43–47. EDN: YNLKBF (дата обращения: 03.06.2025).
4. Смирнов А. В., Безручко В. В., Басов О. О. Теоретические основы построения социоконвергентных систем // Экономика. Информатика. 2019. № 3. С. 532–539. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-532-539
5. Abed A., Abdelkader T., Hashem M. SLACPSS: Secure Lightweight Authentication for Cyber-Physical-Social Systems // Computers. 2024. № 13. P. 225. DOI: 10.3390/computers13090225.
6. Dimitrova M., Chehlarova N., Madzharov A. et al. Psychophysics of user acceptance of social cyber-physical systems // Frontiers in Robotics and AI. 2024. № 11. DOI: 10.3389/frobt.2024.1414853.
7. Koubâa A., Andersson B. A vision of cyber-physical internet // 8th International Workshop on Real-Time Networks. 2009.
8. Molina E., Jacob E. Software-defined networking in cyber-physical systems: a survey // Comput Electr Eng. 2018. № 66. P. 407–419.
9. Yu R., Zhao X., Lu S. et al. Intelligent Game-Theoretic Approach for Resilient Robust Control Design of Cyber-Physical Systems: Application to Intelligent Transportation Systems // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2024. P. 1–12. DOI: 10.1109/TITS.2024.3407721.
10. Zeng J., Yang L. T., Lin M. et al. A survey: cyber-physical-social systems and their system-level design methodology // Fut Gener Comput Syst. 2020. № 105. P. 1028–1042. DOI: 10.1016/j.future.2016.06.034.
11. Lee E. A. Cyber physical systems: Design challenges // 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). IEEE, 2008. P. 363–369.
12. Liu Z., Wang J. Human-cyber-physical systems: concepts, challenges, and research opportunities // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2020. Vol. 21 (11). P. 1535–1553.
13. Yilma B. A., Panetto H., Naudet Y. A Meta-Model of Cyber-Physical-Social System: The CPSS Paradigm to Support Human-Machine Collaboration in Industry 4.0 // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2019. Vol. 568. P. 11–20. DOI: 10.1007/978-3-030-28464-0_2.
14. Булатова О. Ю. Применение киберфизико-социальных систем (КФСС) в транспортной отрасли // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования: Материалы международной научно-практической конференции, 10–11 апреля 2025 г., Казань, Россия. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. С. 96–100. EDN: OYPIUJ.
15. Булатова О. Ю. Применение элементов интеллектуальных транспортных систем при организации транспортно-логистического обслуживания во время проведения массовых городских мероприятий // Дороги и мосты. 2022. № 1(47). С. 294–304. EDN: HCIDVX.
16. Зедгенизов А. В. Формирование типологии территорий/центров массового тяготения // Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ. 2016. № 1(8). С. 76–83. EDN: WABUFL.
17. Novikov I., Vasilyeva V., Kravchenko A., Shevtsova A. Development of an approach to the environmental and economic assessment of the effectiveness of changing the traffic management regime // MATEC Web of Conferences. 2021. Vol. 334. P. 01016. DOI: 10.1051/mateconf/202133401016. EDN: RMOQGO.
18. Шевцова А. Г., Бурлуцкая А. Г., Юнг А. А. Оценка влияния параметров автомобилей на значение потока насыщения // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2022. № 1. С. 126–134. DOI: 10.25198/2077-7175-2022-1-126. EDN: DBSYGJ.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669870 Российская Федерация. Система оценки эффективности модели транспортного обслуживания населения / М. С. Присяжнюк, Н. В. Подпригора. Заявл. 02.08.2024. Оpubл. 22.08.2024. EDN: AMCEGV.
20. Булатова О. Ю. Принципы функционирования транспортной инфраструктуры в умных городах // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3–1(78). С. 73–78. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-1(78)-3-73-78. EDN: LUOATD.
21. Juhász M., Koren C. Analysing the Speed-flow Relationship in Urban Road Traffic // Acta Technica Jaurinensis. 2016. № 9. P. 128. DOI: 10.14513/actatechjaur.v9.n2.403.
22. Yang J., Jinliang X., Chao G. et al. Modeling of the Relationship Between Speed Limit and Characteristic Speed of Expressway Traffic Flow // Sustainability. 2019. № 11. P. 4621. DOI: 10.3390/su11174621.