

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРЕГРУЗОК В ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

В.Ю. МИШЕПУД, В.О. СОРКИН, М.Ю. ШУХМАН, К.А. ХАДЖИНОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 4 апреля 2025*

**Аннотация.** В статье рассмотрена возможность использования цифровых двойников на основе мультиагентных систем для управления транспортными сетями и прогнозирования перегрузок в них. Приведены преимущества внедрения цифровых двойников и мультиагентных систем для управления потоками в транспортных сетях, особенности и принципы работы данных технологий, а также перспективы и возможности их применения в Беларуси. Описан пример типовой шестимерной структуры цифрового двойника, применяемой для моделирования транспортной сети. Предложен подход применения агентного метода при создании симулятора транспортной сети с целью повышения эффективности принятия решений при регулировании транспортных потоков.

**Ключевые слова:** мультиагентные системы, цифровые двойники, транспортные сети, прогнозирование перегрузки, симуляция транспортных потоков, оптимизация движения, интеллектуальный агент, управление движением.

### Введение

Многоагентные, или мультиагентные, системы (МАС) представляют собой одно из наиболее перспективных направлений в области искусственного интеллекта. Эти системы используются для решения сложных задач, которые требуют координации множества независимых агентов, взаимодействующих между собой. Агент в данном контексте – это автономная сущность (программа, устройство или робот), способная воспринимать окружающую среду, принимать решения и действовать для достижения поставленных целей. МАС находят применение в различных областях, таких как робототехника, управление сетями, включая транспортные, логистика, кибербезопасность и многие другие [1].

Из-за растущего населения, быстрого роста числа транспортных средств и ограниченных возможностей расширения инфраструктуры традиционные методы управления дорожным движением перестают справляться со своими задачами. Их неспособность реагировать на ситуацию в режиме реального времени приводит к возникновению пробок на дорогах, застоев на железнодорожных и морских путях. Это, в свою очередь, приводит к неэффективному расходу топлива, срыву сроков перевозок, увеличению выброса загрязняющих веществ. Поэтому в настоящее время внедрение интеллектуальных систем управления транспортными сетями является одним из наиболее перспективных направлений в данной сфере.

При внедрении интеллектуальных систем, в том числе и транспортных, очень важно создать "полигон" – тестовую среду, которая моделирует процессы, происходящие в реальной физической системе. Для этого применяется технология цифровых двойников. Цифровой двойник (ЦД) – это виртуальный двойник физического объекта, способный работать с данными в режиме реального времени для создания симуляций и моделей прогнозирования. Работа в реальном времени, цифровизация и проактивность позволяют более эффективно оптимизировать работу транспортной системы и оказывают положительное влияние на экономическую и экологическую устойчивость [2].

Целью статьи является исследование возможностей использования технологии ЦД на основе МАС в применении к прогнозированию перегрузок в транспортных сетях.

## **Проблема перегрузок в транспортных сетях**

Главной проблемой стандартных методов управления дорожным движением является неспособность реагировать на текущее состояние на дороге и, соответственно, изменять свою конфигурацию (например, продолжительность сигналов светофора). С ростом числа участников дорожного движения количество возможных состояний транспортной сети становится чрезвычайно велико, и поэтому применение заранее подготовленных планов управления транспортными потоками не имеет большого смысла. Возникновение новых событий приводит к последствиям, которые быстро меняют все состояние сети, в результате чего планы по регулированию трафика часто оказываются неэффективными.

Явным проявлением данной проблемы является перегрузка транспортной сети. Заторы приводят к большому количеству негативных эффектов: потеря времени на передвижение, рост выброса выхлопных газов, возникновение аварийных ситуаций и многое другое. Классифицировать перегрузки можно по причинам возникновения и по характеру распространения. Основными причинами заторов являются ДТП, плохая организация движения, неблагоприятные погодные условия, ремонтные работы. По характеру распространения существуют такие заторы, как точечные (пробка на конкретном перекрестке или светофоре), линейные (пробка на протяженном участке, например, тоннелях или проспектах), волновые (резкое торможение одного автомобиля вызывает волну остановок), регулярные (массовый въезд или выезд автомобилей в одно время).

Основными способами противодействия пробкам являются улучшение инфраструктуры города, изменение транспортной сети, внедрение технологий моделирования и управления дорожным движением. Если первые два способа направлены на создание или изменение элементов системы дорожного движения (строительство новых дорог, оборудование перекрестков, перестройка улиц, организация перекрытий), то последний предполагает использование уже существующей экосистемы, что требует намного меньшего количества денежных и материальных ресурсов. На текущий момент перспективным решением для управления сложными транспортными сетями стали МАС.

## **Применение МАС в транспортных сетях**

Существует множество различных автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД), которые можно классифицировать по различным признакам: метод оптимизации потока в транспортной сети, регулируемые характеристики светофоров, гибкость перестроения, используемые методы детектирования. При рассмотрении возможности применения МАС в транспортных сетях ключевыми характеристиками являются метод оптимизации и гибкость перестройки [3].

Многие компоненты системы, используемые в управлении дорожным движением, такие как светофоры, датчики и детекторы движения, погодные и другие датчики, видеокамеры, проекторы, можно сделать более автономными и, следовательно, более адаптивными, если смоделировать их в качестве агентов. Знания о текущих транспортных потоках и общие данные (ремонтные работы на дороге, аварии, перекрытия и прочее) могут быть собраны локально региональными (зональными) агентами, которые контролируют эффективность дорожного движения в каждом регионе (зоне). Если событие может иметь последствия для районов, находящихся под контролем соседних зон, соответствующие агенты могут быть проинформированы с целью корректировки и координации своего плана соответствующим образом. Преимущество такой системы заключается в том, что изменения и вмешательства рассматриваются на региональном уровне и немедленно устраняются. Если эти события будут иметь последствия для каких-либо других регионов, то только агенты, отвечающие за затронутые регионы, должны будут перепланировать свою деятельность. Следовательно, система может гораздо быстрее реагировать и адаптироваться к новым ситуациям. Вместо автономной системы поддержки принятия решений, с помощью агентов эта поддержка может быть оказана в режиме online [4].

Другим преимуществом применения МАС является возможность прогнозирования перегрузок транспортной сети на основе собранных данных. Прогнозирование позволяет

принять превентивные меры, направленных на оптимизацию транспортных потоков. Анализ исторических данных в сочетании с текущими показателями дает возможность выявлять закономерности возникновения перегрузок, что способствует повышению точности прогнозных моделей. Это, в свою очередь, позволит своевременно выполнять управляющие воздействия, такие как адаптивное регулирование сигнальных светофоров, динамическое изменение маршрутов общественного транспорта или информирование водителей через интеллектуальные транспортные системы. Кроме того, прогнозирование способствует более эффективному планированию дорожной инфраструктуры, поскольку выявленные узкие места и зоны повышенной нагрузки могут быть учтены при проектировании новых магистралей или модернизации существующих.

Несмотря на очевидные преимущества МАС, имеются серьезные сложности для исследователей и разработчиков. Ключевые проблемы включают вопросы масштабирования для крупных городов, интеграции с существующей инфраструктурой и надежной работы в нештатных ситуациях, таких как аварии или неблагоприятные погодные условия. Важно отметить, что большинство текущих исследований основаны на компьютерном моделировании, а не на реальных условиях эксплуатации, что ограничивает понимание практического применения МАС в сложной городской среде. Городской трафик зависит от множества факторов, включая поведение водителей, непредвиденные события и ограничения инфраструктуры. Для успешного развертывания МАС в реальных условиях необходимо решить проблемы масштабируемости, совместимости и координации между агентами [5].

### Цифровые двойники для транспортных систем

ЦД в транспортной инфраструктуре, как правило, имеет шестимерную структуру, как показано на рис. 1.

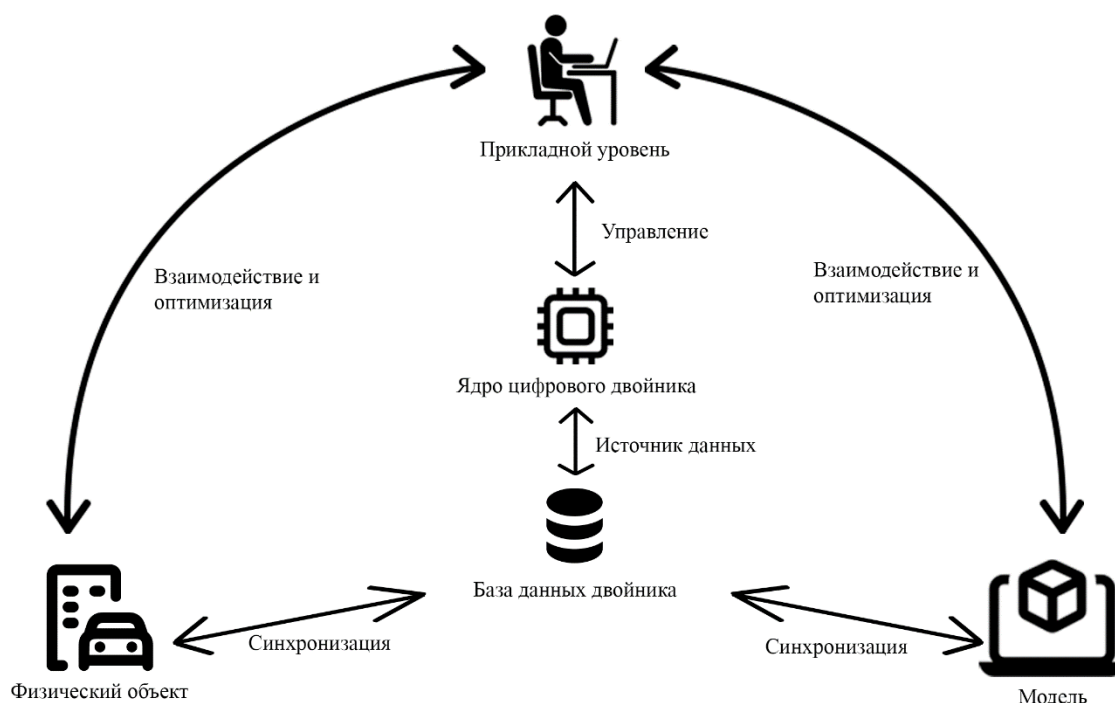


Рис. 1. Шестимерная структура цифрового двойника

Такой ЦД объединяет физические объекты и виртуальные модели с помощью "ядра цифрового двойника" для обеспечения взаимодействия с данными в реальном времени, оптимизации моделирования и прогнозного анализа. Физические транспортные средства представляются в интерактивном режиме с высокой степенью точности.

Система обеспечивает взаимодействие с данными в режиме реального времени, оптимизацию моделирования и прогнозирование с помощью ядра ЦД. Она охватывает все

аспекты транспортной инфраструктуры, начиная от планирования, проектирования и строительства и заканчивая эксплуатацией, техническим обслуживанием и обновлением.

Источником данных является физический объект, составляющий основу транспортной инфраструктуры. Сюда входят все объекты, связанные с транспортом в реальном мире: дороги, мосты, транспортные средства, автобусные станции, дорожные знаки и так далее. У всех физических объектов имеется свой набор свойств, который учитывается при расчетах инфраструктуры: материалы, прочность, износ, размеры и так далее. Транспортные средства различаются по типам моделей, скорости, пассажироместимости и нормам выбросов. Каждый объект является активным динамичным элементом, тесно связанным с жизнью транспортной сети. ЦД предоставляет отражение реального мира с помощью таких датчиков, как камеры, инфракрасные датчики, GPS, акселерометры и датчики температуры.

Виртуальная модель является главным рабочим компонентом ЦД, храня и представляя собой очень точное отображение физического мира в электронном виде. Модель имитирует поведение, атрибуты и взаимодействия физических объектов, что позволяет проводить динамическое моделирование производительности инфраструктуры. Виртуальная модель – это не просто статичное трехмерное представление, она охватывает динамическое поведение, механические характеристики, свойства материалов и взаимодействие физических объектов с окружающей средой.

Эта интеграция позволяет проводить моделирование, начиная от прогнозирования транспортных потоков и заторов в определенных местах и в определенное время и заканчивая производительностью и реакцией конструкций на определенные нагрузки, а также долгосрочными потребностями в техническом обслуживании. Кроме того, виртуальная модель открыта для подключения к другим цифровым моделям, источникам данных и приложениям, объединяясь в единую цифровую экосистему.

База данных двойника является источником данных виртуальной модели, представляя состояние, поведение и экологический контекст каждого физического объекта, а также прогнозы и обратную связь, которые фундаментально управляют всей системой. Данные также включают непрерывный ввод в режиме реального времени, такой как состояние транспортного потока, поведение транспортных средств и данные об окружающей среде, которые позволяют ЦД с высокой точностью отражать реальный мир. Все эти данные разнообразны, гетерогенны и крупномасштабны по своей природе, поскольку они поступают от разных датчиков и устройств, каждое из которых имеет разные форматы и структуру.

Ядро ЦД служит движущей силой всей системы. Оно обрабатывает, анализирует и интерпретирует данные, поступающие от двойников, для реализации синхронной работы физических объектов с виртуальными моделями в режиме реального времени. Ядро выполняет моделирование, оптимизацию транспортных потоков, прогнозы относительно будущих условий и интеллектуальную аналитику. Передовые алгоритмы в сочетании с крупномасштабным анализом данных используются для обеспечения возможностей прогнозирования, что позволяет оптимизировать управление сигналами и планирование маршрутов, а также другие эксплуатационные возможности транспортной системы.

Прикладной уровень преобразует эти возможности в полезные приложения для пользователей. Он включает в себя инструменты и сервисы поддержки принятия решений: мониторинг дорожного движения, прогнозирование заторов, реагирование на аварии и городское планирование.

Другие сервисы, которые позволяют транспортным менеджерам и населению взаимодействовать с ЦД для получения ценной информации об условиях в режиме реального времени.

API-интерфейсы позволяют интегрировать другие объекты в систему с помощью сторонних приложений, тем самым предоставляя разработчикам гибкость в создании новых инструментов на основе данных и функциональности, вытекающих из ЦД.

Уровень подключения выступает в роли посредника между физическим миром и виртуальной моделью, обеспечивая постоянный поток данных между компонентами системы. Этот уровень поддерживает синхронизацию в реальном времени, позволяя ЦД точно отражать текущее состояние физической инфраструктуры. Он отвечает за целостность и точность данных,

используя надежные протоколы и технологии для управления большими объемами передачи данных с минимальными задержками и потерями.

Вместе шесть компонентов образуют единую сеть, которая обеспечивает функционирование всей транспортной инфраструктуры, обеспечивая существенную технологическую поддержку для непрерывного, интеллектуального и эффективного развития городских транспортных систем [2].

### **Перспективы применения ЦД на основе МАС для прогнозирования перегрузок**

ЦД с интегрированными многоагентными системами предоставляют возможности для прогнозирования и предотвращения перегрузок транспортных сетей. Такие системы позволяют тестировать управленческие решения в виртуальной среде перед их реализацией в реальном транспортном потоке. Это особенно важно для предсказания критических ситуаций, таких как заторы на магистралях, перегруженность узловых развязок или резкое увеличение трафика в определенные часы пик.

Использование агентного подхода в ЦД обеспечивает распределенное принятие решений, когда каждый элемент – будь то светофор, датчик или транспортное средство – действует автономно, но при этом координируется с остальными участниками системы. В контексте предсказания перегрузок это позволяет моделировать поведение отдельных участников транспортной системы, таких как автомобилисты, водители общественного транспорта или пешеходы, и анализировать их совокупное влияние на общий поток. Например, если в систему поступают данные о росте интенсивности движения на одном из участков дороги, МАС может автоматически скорректировать работу светофоров, предложить альтернативные маршруты или даже временно ограничить доступ к перегруженным участкам.

Для транспортной системы Беларуси внедрение МАС в ЦД транспортных сетей актуально с точки зрения оптимизации существующей инфраструктуры без необходимости масштабного строительства. Это позволит адаптироваться к растущей транспортной нагрузке и повысить пропускную способность дорог. Особенно эффективным становится использование таких технологий для прогнозирования перегрузок в условиях массовых мероприятий, праздничных дней или спортивных событий. ЦД могут моделировать сценарии, учитывающие как текущую загруженность дорог, так и исторические данные о трафике в аналогичных ситуациях, что позволяет заранее выявить потенциальные "узкие места" и разработать планы их разгрузки.

Одним из ключевых преимуществ комбинации ЦД и МАС является возможность работы с большими данными в режиме реального времени. Система может интегрироваться с датчиками движения, видеонаблюдением, мобильными приложениями и GPS-трекерами, чтобы получать актуальную информацию о состоянии транспортной сети. На основе этих данных алгоритмы машинного обучения могут выявлять закономерности, предсказывать вероятность возникновения пробок и предлагать меры предварительного реагирования для их предотвращения. Например, если система обнаруживает, что в определенное время дня трафик на конкретной магистрали начинает расти, она может заранее рекомендовать изменение светофорных циклов или информировать водителей о наличии альтернативных маршрутов через мобильные приложения.

ЦД играют ключевую роль в долгосрочном планировании. Они позволяют моделировать последствия изменения светофорных циклов, тестировать различные схемы организации движения, оценивать эффективность новых маршрутов общественного транспорта и прогнозировать влияние дорожных работ и временных ограничений. В условиях активного участия Беларуси в международных торговых маршрутах, особенно в рамках инициативы "Один пояс, один путь", такие технологии становятся важным инструментом для управления логистическими потоками. ЦД могут предсказать, как изменения в транспортной инфраструктуре или в графике грузоперевозок повлияют на загруженность транспортных узлов, и предложить оптимальные решения для минимизации задержек.

Внедрение таких технологий сопряжено с рядом вызовов. Основной проблемой является интеграция с устаревшими системами. Для эффективной обработки больших объемов данных необходимо использование граничных вычислений, а для обеспечения кибербезопасности может применяться технология блокчейна. Кроме того, успешное функционирование системы зависит

от качества входных данных: чем точнее и полнее информация о текущем состоянии транспортной сети, тем выше точность прогнозов и эффективность принимаемых решений.

Комбинация ЦД и многоагентных систем представляет собой мощный инструмент для предсказания и предотвращения перегрузок транспортных сетей. Это позволяет не только решать текущие проблемы, но и создавать устойчивую транспортную инфраструктуру, способную адаптироваться к будущим вызовам.

### Заключение

Внедрение ЦД с применением МАС может дать значительный импульс развитию в сфере транспорта, поскольку эта концепция открывает возможности для мониторинга всего жизненного цикла транспортной инфраструктуры. Благодаря развитию ИТ-технологий появляется доступ к данным о дорожном движении в реальном времени, что создает основу для моделирования и формирования детального цифрового отображения транспортных потоков в режиме online.

Ключевое предложение – разработка симулятора, работающего в реальном времени, в котором с помощью агентного моделирования воспроизводится и предсказывается поведение динамически синхронизируемых цифровых копий транспортных потоков с их последующей оптимизацией. В качестве исходных данных используется информация с IoT-датчиков, установленных на дорожной сети (например, на автомагистралях).

Принцип работы ЦД (симулятора) основан на постоянной корректировке модельных сценариев в соответствии с изменениями реальной дорожной обстановки. Обработывая поступающие с датчиков данные в режиме реального времени, система способна не только точно воспроизводить текущую дорожную ситуацию, но и прогнозировать вероятные точки возникновения перегрузок. Благодаря такому подходу становится возможным заранее выявлять потенциально проблемные участки дорожной сети и своевременно принимать меры для предотвращения образования заторов. Это позволяет перевести управление транспортными потоками на принципиально новый уровень, где решения принимаются на основе прогнозного моделирования.

Такая система создает основу для внедрения интеллектуальных методов анализа транспортной нагрузки, что имеет ключевое значение для повышения безопасности и эффективности дорожного движения. Результаты моделирования открывают перспективы для создания комплексной системы мониторинга транспортной инфраструктуры Беларуси, способной оперативно реагировать на изменения дорожной ситуации.

## DIGITAL TWINS FOR CONGESTION FORECASTING IN TRANSPORT NETWORKS BASED ON MULTI-AGENT SYSTEMS

V.Y. MISHEPUD, V.O. SORKIN, M.Y. SHUHMANN, K.A. KHADZHYNAVA

**Abstract.** The article examines advanced technologies for managing transportation networks and forecasting congestion. The primary focus is on digital twins, which enable the modeling of complex systems, including real-world transportation networks, and multi-agent systems that facilitate efficient real-time decision-making. The advantages of integrating digital twins and multi-agent systems for traffic management are outlined, along with the key features and operational principles of these technologies. The prospects and potential applications of these approaches in Belarus are also discussed. A typical six-dimensional structure of a digital twin used for transportation network modeling is described. Additionally, the implementation of an agent-based approach in the development of a transportation network simulator is proposed, which is expected to enhance decision-making efficiency in traffic flow regulation.

**Keywords:** multi-agent systems, digital twins, transport networks, congestion forecasting, traffic flow simulation, movement optimization, intelligent agent, traffic management.

### Список литературы

1. Мультиагентные системы искусственного интеллекта : научные труды КубГТУ / М. П. Малыхина, Д. А. Герасимов ; Кубан. гос. технологический ун-т. – Краснодар : КубГТУ, 2018. – 9 с. – URL: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0051/2074.pdf> (дата обращения: 04.03.2025).
2. Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Survey of Current Applications, Challenges, and Future Directions / Di Wu, Ao Zheng, Wenshuai Yu [et al.]. – Basel : Licensee MDPI, 2025. – 5 p.
3. Горошко, В. С. Классификация характеристик адаптивных систем управления дорожным движением / В. С. Горошко. – Красноярск : Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2013. – 1 с.
4. Burmeister, B. Application of Multi-Agent Systems in Traffic and Transportation / B. Burmeister, A. Haddadi, G. Matylis. – Berlin : IEE Proceedings-Software, 1997. – 8 p.
5. Utilization of Multi-Agent Systems in Managing Smart Transportation Systems in Urban Areas / Amelia Hayati, Rachmat Prasetyo, Mariana Diah Puspitasari, Deng Jiao. – Indonesia: Journal of Computer Science Advancements, 2024. – 367 p.