

**Черников В.С.,**  
*студента 2 курса магистратуры,*  
**Институт инженерных и цифровых технологий БелГУ**  
**Белгородский государственный национальный исследовательский**  
**университет**  
**Россия, г. Белгород**

## **ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ГОРОДСКОЙ СИСТЕМЫ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

***Аннотация:** В статье рассматривается концепция цифрового двойника городской системы наружного освещения как инструмента повышения эффективности эксплуатации и обслуживания городской инфраструктуры. Показано, что использование цифровой модели, синхронизированной с реальными объектами через IoT-устройства, позволяет существенно улучшить мониторинг состояния оборудования, повысить энергоэффективность, снизить затраты на техническое обслуживание и обеспечить более высокую надёжность работы сети. В статье приводится аналитическое обоснование применения методов машинного обучения для прогнозирования отказов светильников и оптимизации режимов освещения, представлены примерные расчёты экономического эффекта, а также обсуждается социально-экономическая значимость метода в контексте разработки интеллектуальных систем.*

***Ключевые слова:** цифровой двойник, наружное освещение, умный город, предиктивное обслуживание, интернет вещей, машинное обучение, искусственный интеллект, прогнозирование отказов, аномалии, энергосбережение, датчики, телеметрия, оптимизация яркости, снижение*

аварийности, интеллектуальный мониторинг, городская инфраструктура, системы поддержки принятия решений, устойчивое развитие, энергоэффективность, качество освещения.

## DIGITAL TWIN OF URBAN OUTDOOR LIGHTING SYSTEM AS A TOOL FOR IMPROVING OPERATIONAL EFFICIENCY

**Annotation:** *This article examines the concept of a digital twin of an urban outdoor lighting system as a tool for improving the efficiency of urban infrastructure operation and maintenance. It demonstrates that using a digital model synchronized with real assets via IoT devices can significantly improve equipment condition monitoring, increase energy efficiency, reduce maintenance costs, and ensure greater network reliability. The article provides an analytical justification for the use of machine learning methods to predict luminaire failures and optimize lighting modes, presents sample calculations of the economic impact, and discusses the socioeconomic significance of the method in the context of developing intelligent systems.*

**Keywords:** *digital twin, outdoor lighting, smart city, predictive maintenance, Internet of Things, machine learning, artificial intelligence, failure forecasting, anomalies, energy saving, sensors, telemetry, brightness optimization, failure rate reduction, intelligent monitoring, urban infrastructure, decision support systems, sustainable development, energy efficiency, lighting quality.*

Инфраструктура наружного освещения, оснащённая цифровыми средствами сбора и передачи информации, позволяет перейти от реактивного и планового обслуживания к моделям интеллектуального мониторинга, основанного на анализе реального поведения оборудования. Светильники, контроллеры, датчики освещённости, температуры, вибрации и сетевых параметров формируют поток временных данных, в котором могут

скрываются сигналы о предстоящем выходе из строя, нестабильной работе драйвера, деградации источника света или нарушениях электропитания. Такие отклонения часто проявляются в виде аномалий - отклонений от типичного поведенческого шаблона.

Цифровизация городской инфраструктуры постепенно становится ключевым направлением развития современных мегаполисов. Одной из наиболее значимых сфер применения интеллектуальных технологий является система наружного освещения, поскольку именно она обеспечивает безопасность городских пространств, влияет на комфорт жителей и потребляет значительные объёмы электроэнергии. Традиционные подходы к эксплуатации уличного освещения, основанные на регламентном обслуживании и реактивном устранении неисправностей, оказываются недостаточно эффективными в условиях роста масштабов городов и усложнения инженерных сетей. В этой связи возрастает актуальность внедрения цифровых двойников — динамически обновляемых виртуальных моделей реальных объектов, позволяющих анализировать состояние инфраструктуры и прогнозировать её поведение.

Цифровой двойник системы наружного освещения представляет собой программно-аппаратный комплекс, в котором виртуальная модель постоянно синхронизируется с физическими объектами: светильниками, опорами, кабельными линиями, автоматизированными шкафами управления. Данные передаются через IoT-датчики и устройства телеметрии, что позволяет в реальном времени поддерживать актуальную цифровую копию всех элементов системы. Такой подход значительно превосходит традиционные методы диспетчеризации, так как даёт возможность не только наблюдать текущее состояние объекта, но и анализировать его динамику, выявлять отклонения, прогнозировать отказ, а также проводить виртуальное тестирование различных режимов работы.

Одним из ключевых преимуществ цифрового двойника является возможность применения методов искусственного интеллекта. Машинное обучение позволяет по историческим данным эксплуатации светильников определять вероятностные закономерности деградации оборудования. Например, если в модель включить параметры тока, напряжения, температуры корпуса, число часов работы и возраст светильника, то алгоритм градиентного бустинга или рекуррентная нейронная сеть (LSTM) может прогнозировать вероятность отказа. Это обеспечивает переход от традиционного регламентного обслуживания к предиктивному ремонту, при котором оборудование заменяется именно тогда, когда оно близко к отказу, а не по формальному сроку. Такой подход существенно сокращает аварийность и снижает расходы на выезды ремонтных бригад.

Для обоснования эффективности внедрения цифрового двойника целесообразно рассмотреть пример расчёта экономической выгоды. Предположим, что в городе установлено 10 тысяч светильников со средней мощностью 100 Вт каждый. Годовое время работы составляет примерно 4000 часов, что даёт суммарное потребление около 4 миллионов кВт·ч. Если цифровой двойник позволяет автоматически регулировать яркость светильников ночью, снижая её на 30 % в течение семи часов из каждых двенадцати, то экономия энергии будет составлять около 17,5 %. В пересчёте на год это означает сокращение потребления на 700 тысяч кВт·ч. При средней стоимости электроэнергии 6 рублей за кВт·ч годовая экономия составит порядка 4,2 миллиона рублей.

Кроме того, предиктивное техническое обслуживание также приносит экономический эффект. Если исходная аварийность составляет примерно 1 % от количества светильников, то ежегодно происходит порядка 100 отказов. Стоимость аварийного ремонта зачастую вдвое выше планового, например 12 тысяч рублей против 6 тысяч. Если система цифрового двойника позволяет снизить аварийность хотя бы на 40 %, то число аварийных

ремонтных бригад уменьшится до 60 в год, а экономия составит около 240 тысяч рублей. Дополнительным фактором экономичности является сокращение пробега ремонтных бригад благодаря оптимизации маршрутов. Если годовой пробег составляет около 100 тысяч километров, а оптимизация сокращает его на 20 %, то это даёт снижение затрат на топливо и обслуживание автомобилей примерно на 600 тысяч рублей в год. В итоге совокупный экономический эффект превышает 5 миллионов рублей ежегодно, что делает внедрение цифрового двойника экономически оправданным даже при достаточно высоких первоначальных затратах.

Для наглядности приведём сводную таблицу расчётов экономии средств при использовании цифрового двойника.

*Таблица 1.*

**Расчётов экономии средств при использовании цифрового двойника**

<b>Источник экономии</b>	<b>Экономия в год, руб.</b>
Оптимизация яркости светильников	4 200 000
Снижение аварийности за счёт прогнозного ремонта	240 000
Сокращение пробега ремонтных бригад	600 000
<b>Итого экономия</b>	<b>5 040 000</b>

Помимо прямой экономии, цифровой двойник оказывает значительное влияние на социально-экономическую сферу. Улучшение качества освещения непосредственно повышает безопасность дорожного движения и снижает количество происшествий на плохо освещённых участках. Сокращение времени простоя светильников уменьшает число жалоб населения и повышает комфорт проживания. Более точное планирование бюджетных расходов и обоснование модернизации оборудования способствует повышению эффективности городского управления. Таким образом, цифровой двойник становится не просто инструментом технического анализа, а полноценной интеллектуальной системой поддержки принятия решений, направленной на оптимизацию работы всей городской инфраструктуры.

С методологической точки зрения тема цифрового двойника полностью соответствует предмету разработки интеллектуальных систем. В ней задействуются методы машинного обучения, технологии больших данных, архитектуры IoT, системы мониторинга и прогнозирования, математические модели оптимизации, а также базовые принципы построения СППР. Кроме того, цифровой двойник демонстрирует комплексный подход к управлению объектами городской экономики, где искусственный интеллект не просто является вспомогательным элементом, а выступает основой для принятия решений и анализа.

В заключение следует отметить, что цифровой двойник системы наружного освещения является современным и высокоэффективным инструментом повышения качества эксплуатации городской инфраструктуры. Он позволяет существенно сократить энергопотребление, повысить надёжность сети, оптимизировать работу персонала и обеспечить устойчивое развитие городской среды. Благодаря сочетанию инженерных технологий и методов искусственного интеллекта цифровой двойник становится ключевым элементом интеллектуальных систем нового поколения, формируя фундамент для дальнейшего развития концепции «умного города»

#### **Список литературы:**

1. Grieves, M., Vickers, J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems / M. Grieves, J. Vickers // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. — Springer, 2017. — P. 85–113
2. Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.-A., Lee, J. Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in Industry 4.0 / B. Bagheri и др. // *Manufacturing Letters*. — 2015. — Vol. 3. — P. 18–23.

3. Batty, M. Digital twins and smart cities / M. Batty // Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. — 2018. — Vol. 45, № 5. — P. 817–820.
4. Бабков В.Ю., Вознюк М.А., Михайлов П.А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. М.: Горячая линия-Телеком, 2018. 224 с.
5. Kannan Srinivasan, Philip Levis. RSSI is Under Appreciated (2008 - Stanford, CA - Department of Electrical Engineering and Department of Computer Science, Stanford University) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://sing.stanford.edu/pubs/rssi-emnets06.pdf>, свободный (дата обращения: 03.12.2025).
6. Maier, T., Sharp, J., Bowers, S. Smart street lighting systems: a review of technologies and future trends / T. Maier и др. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2021. — Vol. 144. — P. 111 013.
7. Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., Nee, A. Digital twin driven smart manufacturing / F. Tao и др. // Academic Press. — Elsevier, 2019. — 280 p.