

УДК 004.94; 004.67; 004.031.43
DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.016](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.016)

Цифровой двойник сценического пространства

Л.Н. Теряев, В.А. Дорохин, С.А. Подгорный✉, А.А. Дорохин

Государственный университет «Дубна», Дубна, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматривается концептуальный подход к созданию и использованию цифрового двойника сценического пространства, который позволяет за счет его синхронизации с реальным пространством реализовывать методы управления более высокого уровня с применением автоматизации сценических процессов и их интеллектуального анализа. Предложена модель сценического пространства, включающая в себя статические объекты сцены, динамические акторы и управляемое оборудование, а также промежуточные программные и аппаратные комплексы взаимодействия. На базе модели предложен метод построения цифрового двойника, основывающегося на двунаправленной синхронизации состояний модели и объекта автоматизации в реальном времени. Предложены варианты применения полученного программно-аппаратного комплекса с точки зрения разработки новых методов управления сценическим оборудованием и интеграции иммерсивных технологий в сценическое пространство. Описана архитектура и процесс разработки цифрового двойника и системы управления на его основе. Предложены новые методы управления, основанные на интеллектуальном анализе данных, включая автоматическое наведение световых приборов, переключение сцен по триггерам и интеграцию технологий дополненной реальности. Эти методы позволяют значительно упростить процессы управления и повысить иммерсивность мероприятий.

Ключевые слова: цифровой двойник, моделирование, системы управления, световое оборудование, сцена, театральное освещение, расширенная реальность, кибер-физическая система, интеллектуальное управление, цифровая трансформация.

Для цитирования: Теряев Л.Н., Дорохин В.А., Подгорный С.А., Дорохин А.А. Цифровой двойник сценического пространства. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(3). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1958> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.016

Digital twin of the stage space

L.N. Teryaev, V.A. Dorokhin, S.A. Podgornyi✉, A.A. Dorokhin

Dubna State University, Dubna, the Russian Federation

Abstract. The article examines a conceptual approach to creating and utilizing a digital twin of stage space, which enables the implementation of higher-level control methods through synchronization with the physical space, employing automation of stage processes and their intelligent analysis. A model of stage space is proposed, encompassing static stage objects, dynamic actors, and controllable equipment, as well as intermediate software and hardware interaction systems. Based on this model, a method for constructing a digital twin is introduced, relying on bidirectional real-time synchronization between the model and the automation object. Potential applications of the resulting hardware-software system are discussed, focusing on the development of new methods for managing stage equipment and integrating immersive technologies into the stage environment. The architecture and process of developing a digital twin and a control system based on it are described. New control methods based on intelligent data analysis are proposed, including automated targeting of lighting fixtures, scene switching via triggers, and the integration of augmented reality technologies. These methods significantly streamline control processes and enhance the immersiveness of events.

Keywords: digital twin, simulation, control systems, lighting equipment, stage, theater lighting, augmented reality, cyber-physical system, intelligent control, digital transformation.

For citation: Teryaev L.N., Dorokhin V.A., Podgorny S.A., Dorokhin A.A. Digital twin of the stage space. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1958> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.016

Введение

Современные технологии цифровизации активно трансформируют индустрию развлечений, театральное искусство и *event*-сферу, предлагая инструменты для повышения точности, гибкости и автоматизации управления сценическими процессами, позволяющие поднять сценографию на совершенно иной уровень. Одним из ключевых трендов в этой области является концепция цифрового двойника.

Цифровой двойник – подход к использованию полномасштабных цифровых моделей физических объектов, которые обладают высокой степенью сходства со свойствами и поведением прототипа и, в то же время, обладают зеркальной информационной взаимосвязью с объектом в реальном времени. Это позволяет создавать целостную кибер-физическую систему (*Cyber-Physical System*) с возможностью управления [1]¹.

В контексте сценического пространства цифровой двойник позволяет связать системы управления сценическим оборудованием с моделью сценического пространства в реальном времени. Такой подход позволяет реализовать новые методы управления в рамках предметной области.

В статье представлены анализ компонентов и связей сценического пространства, а также разработка описывающей их модели. На основе полученной модели предлагается ряд методов создания цифрового двойника сцены на основе двунаправленной синхронизации модели и реальной сцены в реальном времени.

На основе полученного цифрового двойника предлагается применение методов интеллектуального и автоматизированного управления, а также выдвигаются гипотезы о возможности интеграции технологий искусственного интеллекта, компьютерного зрения, дополненной и смешанной реальности в бизнес-процессы объекта автоматизации.

Материалы и методы

Свойства, структура и объекты сценического пространства. Сценическое пространство представляет собой обобщенное определение для различных площадок, использующихся в культурно-массовых мероприятиях. Примерами могут выступать: театры, концертные площадки, дома культуры, церкви, дискуссионные клубы, конференц-залы, крупные рестораны и другие.

Сцена представляет собой трехмерное пространство определенного размера, в некоторых случаях, отличающееся по высоте относительно наблюдателя. Пространство может содержать два типа суб-объектов: статические и динамические.

Статические объекты представляют собой неперемещаемые по логике использования в представлении объекты, относительные координаты и размеры которых учитываются системой в процессе построения трехмерной модели сцены.

Динамические объекты отличаются наличием логики перемещения в координатах сцены, что требует наличия механизма синхронизации их состояния между реальным объектом и цифровым двойником в реальном времени. Основным примером

¹ ПНСТ 429-2020. *Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения*. Москва: Стандартинформ; 2020. 7 с.

динамических объектов являются люди: актеры, артисты, танцующие пары, и т. д.). К динамическим объектам также можно отнести определенный сценический реквизит, требующий изменения состояния других элементов модели.

Сценическое пространство, помимо непосредственно сцены, содержит ряд технических и аппаратных подсистем, обеспечивающих звуковое, световое и другое сопровождение происходящего на сцене. Данный набор подсистем является вторым источником, способным влиять на реальное сценическое пространство наравне с динамическими объектами сцены.

Данное оборудование и программное обеспечение, по версии авторов статьи, может быть классифицировано в соответствии с перечисленными далее признаками (Рисунок 1).

- Осветительный. К этому классу объектов относятся различные осветительные приборы, такие как фонари, лазеры, стробоскопы, крутящиеся шары, лампы с управляемым наведением и ряд других смешанных подтипов. Этот класс содержит также аппаратные системы управления световым оборудованием.

- Звуковой. Класс содержит объекты воспроизведения звука. Представлен колонками, сабвуферами, микшерными пультами и другим программно-аппаратным обеспечением [2].

- Механический. К такому классу объектов относятся электромеханические устройства, такие как подъемные штанги светового оборудования, лифты, занавесы и другие управляемые объекты сценического пространства.

- Иммерсивный. В этот класс попадают различные управляемые объекты немеханического воздействия, а именно дымогенераторы, пиропатроны, огненные пушки, проекторы, объекты дополненной и смешанной реальности.

- Вспомогательный. К данному классу относится оборудование и программное обеспечение, необходимое для функционирования системы, но при этом, не продуцирующее прямого воздействия на сценическое пространство. К этому классу могут быть отнесены камеры видимого и инфракрасного света, датчики, логгеры, и т. д. В первую очередь, они необходимы в целях синхронизации состояния динамических объектов сценического пространства и соответствующих суб-моделей цифрового двойника.



Рисунок 1 – Иерархическая структура объектов сценического пространства
Figure 1 – Hierarchical structure of stage space objects

Свойства объектов на сцене описываются в зависимости от прикладной задачи, в которой будет работать цифровая модель. Обязательными свойствами являются координаты объекта в пространстве и состояние наличия (присутствия) на сцене. При необходимости, динамические объекты могут приобретать дополнительные свойства или группы свойств. Например, цвет одежды актера.

Свойства оборудования по большей части формализованы посредством протоколов управления. В большинстве устройств используется модель управления на

основе команд. Команда содержит определенное конечное состояние объекта управления. Команды подаются посредством шины данных. Таким образом, управление происходит удаленно, бизнес-логика оборудования отвечает только за синхронизацию состояния полученной команды и текущих свойств управляемого устройства. Тем не менее, общего протокола для управления всем сценическим оборудованием нет. Из основных, подходящих для работы со всеми обозначенными выше звуковыми и осветительными устройствами, могут быть выделены *DMX-512* [3], *Art-Net*², *MIDI*³ и ряд других. Тем не менее, принципиального отличия в принципах их работы нет, что позволяет частично унифицировать процессы построения цифровой модели.

Модель сценического пространства. Модель сценического пространства представляет собой структурированное описание всех элементов сцены, их взаимосвязей и функциональных характеристик. Она используется для проектирования, управления и анализа сценических систем, включая освещение, звук, механику и спецэффекты. Модель позволит выполнять ряд задач, таких как визуализация сцены, синхронизация оборудования, реализация управления, основанного на данных, внедрение новых элементов визуализации и оптимизация процессов проектирования театральных бизнес-процессов.

Финальная модель представляет собой структурированную информацию о состоянии объекта автоматизации, его компонентов и подсистем. Модель обновляется в режиме реального времени, это происходит посредством ряда отдельных подсистем, преобразующих «сырые» данные в формализованные параметры модели. Входные параметры и общие этапы преобразования данных представлены на Рисунке 2.

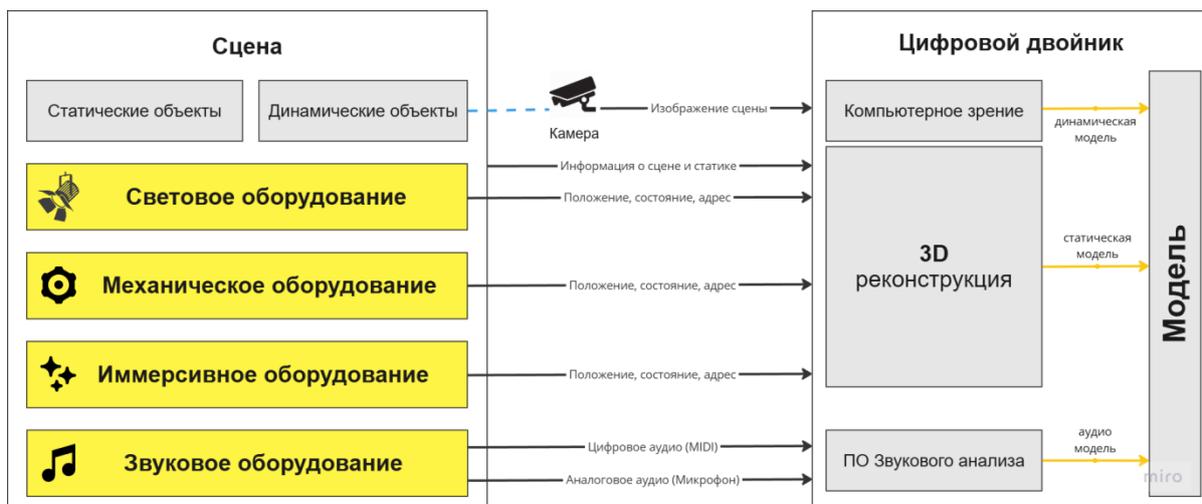


Рисунок 2 – Схема сбора данных о состоянии модели
 Figure 3 – Model state data collection scheme

Для получения состояния всех элементов системы в реальном времени необходимо решение двух отдельных задач, требующих внедрения подсистем распознавания, ввиду необходимости наличия в модели данных о состоянии и положении динамических объектов, а также текущих показателей звукового окружения.

Первая подсистема нормализации отвечает за получение координат и состояний динамических объектов, а именно актеров и реквизита, находящихся на сцене. Основными данными, необходимыми для использования в модели, являются

² Art-Net. URL: <https://art-net.org.uk/> (дата обращения: 01.03.2025).

³ Pejrolo A. *Creative Sequencing Techniques for Music Production: A Practical Guide to Pro Tools, Logic, Digital Performer, and Cubase*. Oxford: Taylor & Francis; 2011. 317 p.

координаты объекта относительно сцены. Вторичными данными являются идентификация объекта, то есть его классификация. Дополнительными данными могут являться другие характеристики, описывающие состояние объекта, например, поза актера или цвет одежды.

Таким образом, в рамках подсистемы решаются задачи распознавания образов и классификации. Что позволяет получить в реальном времени данные о состоянии динамических объектов системы K :

$$K = \langle D, C, P \rangle, \quad (1)$$

где D – набор динамических объектов, для которых производится отслеживание. C – текущие координаты объекта отслеживания, а $P = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – набор свойств объекта, при этом, допускается $P = \emptyset$, означающее, что динамический объект не имеет класса и в качестве полезной нагрузки несет только идентификатор и координаты.

Набор свойств объекта P зависит от класса T , который представляет собой множество $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n \mid n > 0\}$, где $t = (Name, \{p_1, p_2, \dots, p_n \mid n > 0\})$ и определяет, какие свойства могут содержаться заданным классом объекта.

Таким образом, общий набор данных о динамических элементах сцены можно обозначить как D , представляющий собой набор элементов с координатами относительно сцены и различным набором свойств, в зависимости от класса объекта. Объекты хранятся в отдельных кортежах, что позволит оптимизировать их обработку по отдельности в процессе реализации логики управления.

$$D = \{\{k_1, k_2, \dots, k_n \mid \forall k_n \in t_1\}, \dots, \{k_1, k_2, \dots, k_n \mid \forall k_n \in t_m\} \mid t \in \{T, \emptyset\} \& k \in K\}. \quad (2)$$

Вторая подсистема отвечает за обработку звука, что тоже может быть важным элементом состояния сцены и использоваться для принятия решений. В качестве примера можно привести переключение световой партитуры на основе ключевой фразы, сказанной актером, или включение определенного устройства в момент удара барабана.

Подсистема работает на базе кортежа «предобученных» моделей, решающих задачи разбиения музыкальной дорожки на отдельные музыкальные инструменты и распознавание речи. Впоследствии модель может быть расширена за счет повышения интеллектуализации подсистемы и увеличения количества потенциально доступной информации.

Выходные сигналы подсистемы, попадающие в модель сцены могут быть представлены в следующем виде:

$$M(t) = (I(t), V), \quad (3)$$

где $I(t)$ содержит временной ряд звуковых данных для каждого распознанного инструмента.

$$I(t) = \{(i_j, v_j(t)) \mid i_j \in I_D\}, \quad (4)$$

где I_D – множество распознаваемых инструментов, а $v_j(t) \in \mathbb{R}^m$ – вектор характеристик (громкость, частота и т. д.) для инструмента i_j в момент t .

V – набор распознанных ключевых фраз. Ключевые фразы содержатся в словаре W . Pr представляет вес ключевой фразы v :

$$V = \{(v_1, Pr_1), \dots, (v_n, Pr_n) \mid n \geq 0 \& V \in W\}. \quad (5)$$

Статическая часть модели содержит информацию о самой сцене и статических объектах на ней. По сути, в контексте модели, статические объекты являются составной частью сцены, позволяющей придать сцене сложную форму. Эта информация вносится в систему оператором. Обновление данных в реальном времени не требуется.

Статические объекты отделены от сцены логически ввиду того, что к статическим объектам относятся декорации, которые могут меняться несколько раз в процессе выступления и требуется необходимость изменения их набора в режиме ручного или полуавтоматического управления.

Сцена $S_c = (width, height, length)$ представляет собой вектор, описывающий размеры основного сценического пространства, в этом случае не учитывается окружающая и вспомогательная территория.

Статические объекты S_o представляют собой множество разнородных объектов, суть которых заключается в пространственном описании реального объекта, требующего симуляции. В сложных ситуациях возможно использование полноценной трехмерной модели объекта. В случае решения задач управления, как правило, будет достаточно графических примитивов. Например, вместо стола может использоваться прямоугольник. Таким образом, в общем виде объект S_o будет иметь вид:

$$S_o = \{(x, y, z, object) \mid (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \ \& \ object \in ObjectTypes\}. \quad (6)$$

Координаты задаются в трехмерном пространстве относительно начала координат. За начало координат предлагается использование левого нижнего угла сцены. Такой подход позволяет в меньшей мере оперировать отрицательными координатами и является более наглядным с точки зрения оператора. *ObjectTypes* – множество всех возможных типов статических объектов.

Оборудование сцены представляет собой набор устройств, не имеющих обратной связи. Каждое устройство имеет определенное состояние, описываемое набором численных переменных. Получая команду с набором данных состояний, устройство приводит свое состояние к полученному в команде.

При этом существует необходимость хранения более высокоуровневой информации об устройстве. В качестве примера можно привести необходимость хранения в модели точки падения луча в координатах сцены, что невозможно ввиду отсутствия таких параметров в командном наборе устройств.

Таким образом, устройства сцены могут быть представлены в виде O :

$$O = \langle L, Ch, Pr \rangle, \quad (7)$$

где L – устройства, $Ch = \{v_1, v_1, \dots, v_n \mid 0 \leq n \leq 512 \ \& \ 0 \leq v \leq 255\}$ – набор низкоуровневых характеристик устройства, отражающих набор каналов протокола DMX-512. Pr – произвольный набор свойств, определяемый в зависимости от класса устройства.

В общем виде, модель сцены, исключая данные, относящиеся к управлению, может быть представлена в виде:

$$S = (S_c, S_o, D, M, O). \quad (8)$$

Формула показывает, что модель состоит из информации о сцене, множества статичных объектов, множества устройств и их состояний, множества динамических объектов и их состояний, а также информации о текущем звуко-лингвистическом состоянии сцены.

Переход состояния модели в общем виде можно представить как

$$S(t + 1) = (S_c, S_o, U(t), Y_D(t + 1), Y_A(t + 1)), \quad (9)$$

где $Y_D(t + 1)$ – измеренные координаты и свойства динамических объектов, $Y_A(t + 1)$ – звуковые данные, а $U(t)$ – набор управляющих команд.

Результаты и обсуждение

Реализация цифрового двойника сценического пространства. Разработка модели данных позволяет реализовать цифровой двойник сценического пространства. В данном случае применяется классический цифровой двойник второго типа [4].

Цифровой двойник (*Digital Twin*) – комплекс цифровых моделей, адекватно отражающих свойства объекта автоматизации, включая данные о производительности, работоспособности и персонале. Виртуальное представление цифрового двойника, получает информацию от физической системы. Полученные данные используются для актуализации состояния виртуального представления и для поддержки принятия решений на всех этапах жизненного цикла системы. Ввиду наличия двунаправленного взаимодействия виртуального представления с физической системой у физического двойника открываются возможность использования знаний из своего виртуального окружения.

Предлагается формат построения *Digital Twin Instance (DTI)* [5]. Это копия конкретного экземпляра продукта после его изготовления, с которой она будет связана на протяжении всего жизненного цикла изделия. Включает информацию о материалах и компонентах, рабочих процессах, результаты тестов, операционные данные от датчиков, параметры мониторинга и т. д.

С помощью цифрового двойника осуществляется сбор всей существенной информации об активах и обеспечивается отображение в реальном времени их состояния и динамических характеристик, а также благодаря зеркальной информационной связи между двойниками и активами, предоставляется возможность манипулирования активами через их цифровые представления. Таким образом, цифровые двойники становятся эффективным инструментом поддержки принятия решений по управлению активами [6].

Основные потоки входных и выходных данных системы отображены на Рисунке 3. Входные данные можно классифицировать следующим образом: сырые данные, формализованные данные, сигналы, управляющие команды. После обработки посредством промежуточных модулей из данных извлекаются релевантные данные в формализованном виде.

Управленческие команды поступают в систему посредством пользовательского интерфейса. В основном содержат информацию о системе и правила поведения, на основе которых будут рассчитаны низкоуровневые команды ответов.

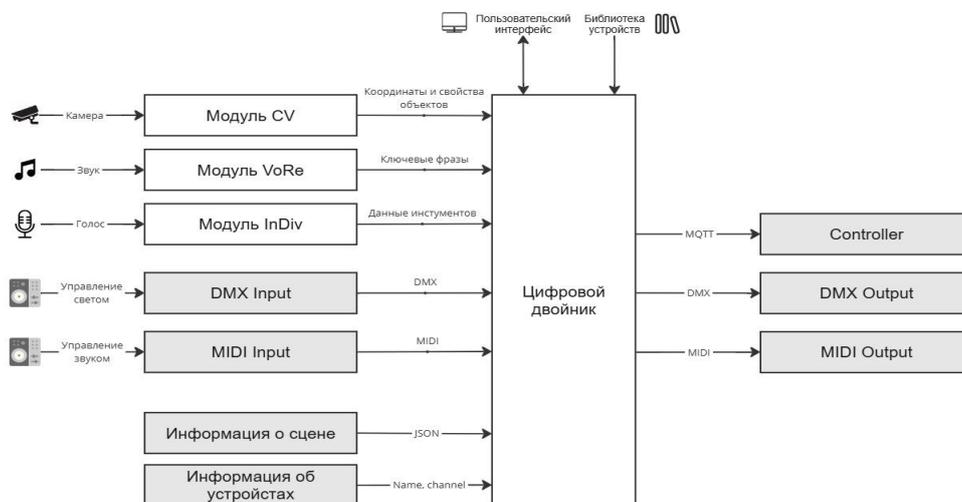


Рисунок 3 – Диаграмма потоков данных цифрового двойника сценического пространства
 Figure 3 – Data flow diagram of the digital twin of the stage space

Для реализации цифрового двойника использовался ряд технологий. Ядро системы, включающее в себя основную логику и хранящее модель данных, разработано с использованием технологии .NET. Хранение модели состояния сцены и вспомогательных данных происходит с использованием ORM системы *Entity Framework*, что позволяет использовать в зависимости от необходимости как локальные, так и сетевые СУБД. Схема базы данных, используемой на текущий момент представлена на Рисунке 4.

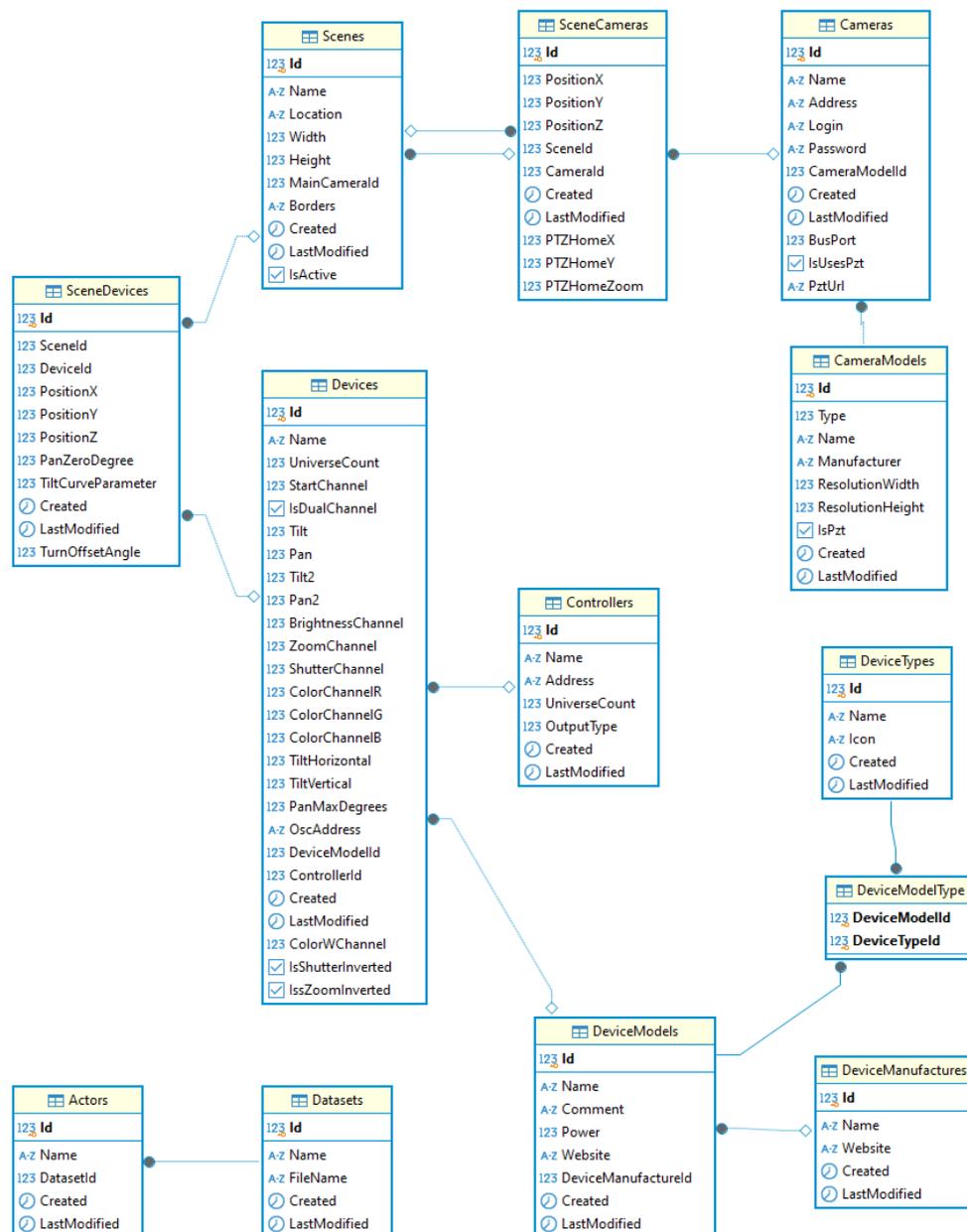


Рисунок 4 – Схема базы данных цифрового двойника
 Figure 4 – Digital twin database scheme

Пользовательский интерфейс разработан в виде веб-приложения на основе фреймворка *Angular*. Взаимодействие между ядром и клиентами происходит посредством *REST* и шины данных. Шина данных реализована с помощью протокола

MQTT. Транспортный слой изолирован и при необходимости протокол может быть изменен на более производительный.

Для нормализации и синхронизации данных различного рода используются отдельные программные модули. За запуск и поддержание функционирования модулей отвечает ядро. Ядро имеет абстракцию для запуска и управления любым программным модулем, что позволяет использовать для каждого модуля различные технологии и языки разработки, более подходящие для решения конкретной задачи. Подсистема управления модулями имеет две основных абстракции *ScriptProcess* и *ScriptJobProcess*, отвечающие за постоянно работающий модуль и выполняемую процедуру соответственно. На Рисунке 5 представлен пример реализации модуля трансляции изображения камеры в пользовательский интерфейс. Система запускает скрипт, прописанный в конфигурации системы и задает ряд стартовых параметров, таких как UDP порт источника изображения. Запускаемый процесс реализован с помощью Python скрипта, получающего изображение и генерирующего потоковое изображение. Модули являются отдельными, независимыми процессами системы, что позволяет проводить распараллеливание задач синхронизации и управления.

```

internal class CameraWebBusScriptProcess : ScriptProcess
{
    Ссылка: 1
    public CameraWebBusScriptProcess(CreateCameraDto camera, IConfiguration config) : base()
    {
        Type = ScriptType.CameraWebBusScript;
        Id = camera.Id;
        var scriptsPath = config.GetValue<string>("AppSettings:ScriptsPath");
        var scriptPath = config.GetValue<string>("AppSettings:CameraBusScript");

        var args = $"-id {(int)Type} + ":" + Id} -port {camera.BusPort}";
        Init(scriptsPath + scriptPath, args);
    }
}

```

Рисунок 5 – Пример модуля системы
Figure 5 – System module example

Для отслеживания состояния модулей и взаимодействия между ними используется шина данных. При запуске, остановке или ошибке оповещаются все модули системы. Обмен результатами работы модуля также обеспечивается посредством шины данных, что позволяет проводить независимое реагирования на события внутри системы.

За взаимодействие с каждым отдельным протоколом либо типом данных отвечает отдельный модуль. На текущий момент это:

- Модуль *ArtNet* – отвечает за получение управляющих сигналов от физических пультов управления и отправку *DMX* сигналов к оборудованию. Получает и отдает данные посредством отдельного канала шины данных.

- Модуль камеры – отвечает за получение изображения с сетевых либо проводных камер и его трансляцию в локальный broadcast поток. Это позволяет различным модулям работать с изображением параллельно и с разной скоростью обработки кадров. Для каждой отдельной камеры запускается отдельный модуль и используется отдельный *UDP* порт трансляции.

- Модуль *CV* – отвечает за подсистему компьютерного зрения и получения данных о динамических объектах сцены (актеры, реквизит, и т. д). Использует модель *YOLO* [7] для распознавания и трекинга объектов. После чего данные проходят нормализацию, происходит преобразование координат в относительные координаты сцены. По шине данных отправляются идентификаторы объектов трекинга и их координаты.

– Модуль *VoRe* – принимает на вход звуковой поток микрофона, в реальном времени распознает заранее описанные ключевые фразы, после чего отправляет по шине данных команду обновления состояния представления. Используется для синхронизации модели и сценария. Для распознавания используется модель GigaAM [8].

– Модуль *ReID* – принимает на вход по шине данных информацию о детекциях и изображение камеры, используется для классификации актеров. Это дает возможность хранить в модели и оперировать в процессе управления не абстрактным, а конкретным актером. Для классификации используется собственная реализация алгоритма сбора датасета и классификации на основе модели «*mgn_sbs_S50_ibn_fastreid*», показавшей лучшие результаты в рамках тестирования более 100 моделей на данных театральных постановок (Рисунок 6).

Цифровой двойник может расширяться за счет новых модулей, повышающих объем данных модели. В том числе выбранный подход позволяет при необходимости провести замену модуля. Для этого необходимо реализовать в новом модуле протокол обмена по шине данных и поддержку заданных стартовых параметров.

Данные о статических объектах сцены и оборудовании вносятся посредством пользовательского интерфейса. Для приведения сырых значений, отвечающих за положение устройств в пространстве к единым координатам сцены применяется ряд алгоритмов калибровки и конвертации значений. Процесс калибровки каждого устройства проводится путем совмещения ряда точек падения луча и координат сцены, после чего проводится автоматический расчет координат устройства в пространстве и подбор преобразующих коэффициентов.

| Dataset | Model | Top1 | Top5 | mAP | mINP | MACs | Params |
|------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|
| market1501 | sbs_R101_ibn_fastreid | 0.956 | 0.985 | 0.894 | 0.687 | 6.488G | 42.453M |
| market1501 | sbs_S50_fastreid | 0.957 | 0.985 | 0.883 | 0.657 | 4.665G | 25.370M |
| market1501 | sbs_R50_fastreid | 0.957 | 0.984 | 0.881 | 0.653 | 4.057G | 23.475M |
| market1501 | mgn_R50_ibn_fastreid | 0.942 | 0.979 | 0.876 | 0.649 | 9.312G | 68.680M |
| market1501 | mgn_sbs_S50_ibn_fastreid | 0.959 | 0.986 | 0.895 | 0.675 | 9.924G | 73.946M |
| market1501 | mgn_sbs_R50_ibn_fastreid | 0.958 | 0.986 | 0.893 | 0.667 | 9.312G | 68.680M |
| market1501 | agw_R50_ibn_fastreid | 0.955 | 0.982 | 0.889 | 0.674 | 4.059G | 23.478M |
| market1501 | bagtricks_R101_ibn_fastreid | 0.955 | 0.983 | 0.886 | 0.674 | 6.481G | 42.401M |
| market1501 | mgn_sbs_R50_fastreid | 0.955 | 0.989 | 0.886 | 0.644 | 9.309G | 68.675M |
| market1501 | resnet50_agw | 0.955 | 0.983 | 0.883 | 0.653 | 4.094G | 23.541M |
| market1501 | mgn_sbs_S50_fastreid | 0.954 | 0.985 | 0.895 | 0.680 | 9.924G | 73.946M |
| market1501 | sbs_R50_ibn_fastreid | 0.954 | 0.984 | 0.883 | 0.657 | 4.059G | 23.478M |
| market1501 | bagtricks_R50_ibn_fastreid | 0.954 | 0.982 | 0.879 | 0.647 | 4.056G | 23.457M |
| market1501 | agw_R101_ibn_fastreid | 0.953 | 0.985 | 0.891 | 0.682 | 6.488G | 42.453M |
| market1501 | agw_R50_fastreid | 0.953 | 0.987 | 0.883 | 0.654 | 4.057G | 23.475M |
| market1501 | densenet121_abd | 0.953 | 0.984 | 0.876 | 0.639 | 5.619G | 37.719M |
| market1501 | agw_S50_fastreid | 0.952 | 0.983 | 0.892 | 0.684 | 4.665G | 25.370M |

Рисунок 6 – Лучшие модели ReID при работе с датасетом театральных постановок
Figure 6 – Top ReID models on theater scene dataset

Синхронизация модели и объекта автоматизации происходит по двум основным алгоритмам. Актуализация управляемого оборудования сценического пространства проводится путем генерации набора низкоуровневых сигналов на основе дерева модели. Генерация пакета сигналов происходит в режиме реального времени. Задержка, в данном случае, зависит от частоты работы алгоритма сборки пакета. Тестирование системы

показало высокую скорость работы, на порядок превосходящую допустимые ограничения по скорости синхронизации цифрового двойника.

Для обновления данных о динамических объектах в модели используются модули компьютерного зрения и нейросетевой классификации. Скорость и качество работы данных модулей оценивалось с использованием следующих метрик:

Twin Alignment Ratio (τ) – ключевой параметр, характеризующий соответствие частоты обновления цифрового двойника ($f_{digital}$) частоте изменения физической системы (f_{phys}):

$$\tau = \frac{f_{digital}}{f_{phys}} \times 100\%,$$

где $f_{phys} = 60$ Гц (частота обновления сенсорных систем). Оптимальное значение $\tau \geq 98\%$ достигается при задержке синхронизации $\Delta t \leq 16$ мс. Допустимо понижение показателя до 50 % что не приводит к заметному ухудшению времени реакции системы.

NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) для позиционирования вычисляется как:

$$NRMSE_{pos} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{real,i} - P_{digital,i})^2}}{L_{max}} \times 100\%,$$

где $L_{max} = \sqrt{w^2 + h^2 + d^2}$ – максимальная диагональ сцены, w, h, d – габариты сценического пространства. Допустимое значение $NRMSE_{pos} \leq 2,5$ %.

Имитация работы системы с 10+ динамическими объектами (актеры) проводилась на стенде с параметрами:

- размеры сцены: 8×8×6 м;
- частота обновления сенсоров: 60 Гц;
- сетевая задержка: 20±15 мс;
- процессор 4 ядра, 4.3 ГГц;
- видеокарта с поддержкой 3840 CUDA ядер.

Таблица 1 – Зависимость метрик от числа объектов
Table 1 – Dependence of metrics on the number of objects

| Количество объектов | τ , % | $NRMSE_{pos}$, % | Задержка, мс |
|---------------------|------------|-------------------|--------------|
| 1 | 81,2 | 1,1 | 20 |
| 2 | 75,7 | 1,2 | 22 |
| 5 | 65,1 | 1,6 | 25 |
| 10 | 58,5 | 2,1 | 28 |

Как видно из Таблицы 1, показатели точности и задержки синхронизации модели и сценического пространства остаются в допустимых диапазонах. Вертикальное масштабирование аппаратного обеспечения системы позволит повысить данные показатели.

Тестовые внедрения программного обеспечения и сбор данных для обучения моделей проводились на площадке Театрального института им. Б. Щукина. На Рисунке 7 представлен интерфейс управления системы, функционирующей на основе цифрового двойника. На рисунке видно отображение зоны распознавания актера, а также определенный класс. В базовом исполнении система способна получать данные, синхронизировать модель и сценическое пространство в реальном времени и проводить базовое управление световым оборудованием, изменяя отдельные параметры. Для реализации более сложных методов управления был разработан отдельный слой,

позволяющий в автоматическом режиме проводить изменение модели на основе ее текущего состояния.

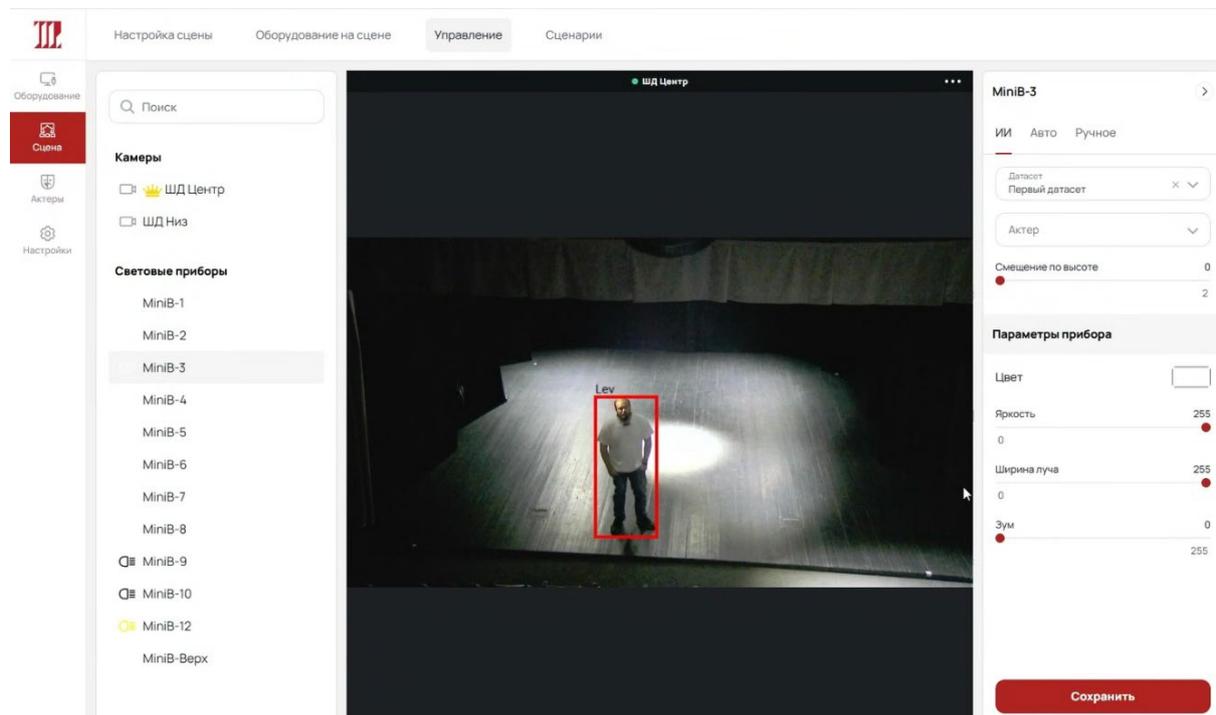


Рисунок 7 – Интерфейс управления разработанной системы
Figure 7 – Developed system control UI

Интеллектуальные методы управления. За счет наличия в модели данных информации о динамических объектах на сцене, обновляемых в реальном времени, появляется возможность реализации более высокого уровня управления, основанного на программировании правил поведения системы.

Слой управления встраивается в систему между блоками нормализации и конвертации выходных сигналов. На вход слоя подаются подготовленные для принятия решений линейные и дискретные значения, отражающие состояние объекта автоматизации на текущий момент времени. В качестве выходных данных отдаются высокоуровневые команды изменения состояния. Данные команды сохраняются в модели данных и отправляются на конечные устройства для исполнения.

Непосредственно логика управления представляет собой машину состояний, на вход и выход которой подается модель сценического пространства в виде формализованного набора данных. Переходы между состояниями осуществляются на основе логических правил. Переходы выхода изменяют параметры модели, после чего система в автоматическом режиме синхронизирует это состояние с состоянием реальных управляемых устройств. Концептуальная схема реализации метода в управленческом слое цифрового двойника представлена на Рисунке 8.

На основе предложенной модели данных и подхода к построению цифрового двойника сценического пространства может быть реализован ряд недоступных ранее методов управления сценическим освещением, звуком и другими элементами представления. В долгосрочной перспективе цифровой двойник становится катализатором инноваций и новых подходов к выполнению бизнес-процессов предметной области [9], в частности, позволяет применять методы машинного обучения.

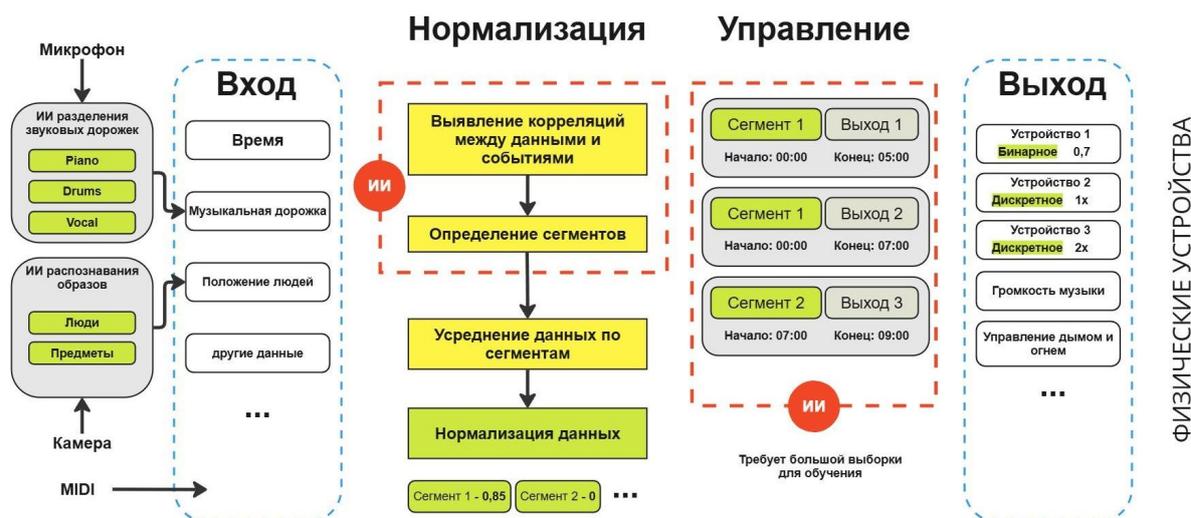


Рисунок 8 – Общая схема реализации управленческого слоя цифрового двойника
Figure 8 – General scheme of management layer implementation in digital twin

Наведение устройств по точке изображения. Классическое управление наводимыми световыми устройствами осуществляется путем задания двух целочисленных значений, что не позволяет пользоваться низкоуровневыми командами ввиду полного отсутствия привязки этих значений к реальному пространству. Использование камеры, наведенной на сцену, дает возможность получения в качестве входного параметра точки на сцене в реальных координатах.

В совокупности с данными о расположении и направлении устройства в общей координатной системе позволяет посредством ряда математических преобразований добиться направления устройства в определенную точку.

Данный подход позволит путем синхронизации различных координатных систем реализовать управление световым лучом по точке изображения. Этократно ускоряет и упрощает процесс наведения светового оборудования.

Метод управления был реализован на базе созданного цифрового двойника и программного комплекса управления. Процесс управления отображен на Рисунке 9.



Рисунок 9 – Пример метода наведения луча по точке изображения
Figure 9 – Light ray positioning based on image point

Переключение световых сцен на основе изменений на сцене. В современных системах управления отсутствует возможность реагирования на происходящие на сцене действия. Задача переключения активного поведения световых и звуковых приборов производится оператором в ручном режиме [10]. Наличие в модели данных динамических объектов позволяет программировать это действие на основе правил.

Например, световая партитура может переключаться на основе правила «Актёр 1 находится в радиусе 1 метра от заданной точки в пространстве сцены». Помимо визуальных триггеров могут использоваться и звуковые.

Использование технологии распознавания речи позволяет использовать в сцене триггеры на основе ключевых фраз, что очень полезно в театральных представлениях, где большая часть действий аппаратуры завязана на сценарий и фразы, из которых он состоит.

Помимо выполнения бинарного действия могут быть запрограммированы и дискретные реакции. В качестве примера можно привести изменение громкости звука в зависимости от удаления актёра от объекта или точки на сцене.

Внедрение технологий расширенной реальности. Технологии расширенной реальности, а именно дополненная и смешанная реальность, напрямую завязаны на реальное пространство. Наличие подробных координат всех объектов на сцене в реальном времени позволяет решать целый ряд задач с использованием иммерсивных технологий.

При решении задачи привязки координатной системы носимого устройства расширенной реальности и координат сцены открывается целый ряд возможностей, например:

- Разработка тренажеров для актёров, предоставляющего метаинформацию о спектакле с указанием траекторий движения, подсказок о действиях и тексте;
- Расширение представления за счет виртуальных объектов. Как пример – введение на сцену виртуальных актёров или объектов, которые не могли быть использованы в живую по техническим причинам;
- Создание визуального аккомпанемента происходящему на сцене с помощью визуальных эффектов дополненной реальности, например, окружение сцены огнем.

Дополненная и смешанная реальность применяются в сценическом пространстве отдельно от светового и звукового оборудования [9]. Интеграция виртуальных объектов в общую модель сценического пространства позволит строить более сложные иммерсивные конструкции.

Использование технологии создания мета-пространств внутри помещений [11] позволит создавать подобные решения без необходимости привлечения дорогостоящих разработчиков и значительно упростит процессы автоматизации бизнес-процессов или создания визуальных эффектов.

Предложенные методы интеллектуального управления и интеграции новых технологий в сценическое пространство являются примерами возможностей, доступных при оперировании данными, описывающими сценическое пространство в реальном времени. Управление, основанное на логике, позволяет достичь высокого уровня автоматизации процессов, повторяемости сценариев и значительно снижает порог вхождения пользователей за счет большей интуитивности процесса управления.

Заключение

Сценическое пространство является сложной динамической системой и требует высокой квалификации персонала для управления различным набором аппаратного и

программного обеспечения, использующихся для повышения иммерсивности происходящих на сцене действий.

В рамках работы предложен концепт цифрового двойника сценического пространства, описывающий объект автоматизации комплексно. Предлагается применять цифровой двойник для реализации новых подходов к управлению сценическим оборудованием и внедрения иммерсивных технологий в различные бизнес-процессы представления и предшествующих ему действий.

Была предложена классификация объектов сценического пространства, описана структура объекта автоматизации.

Для реализации цифрового двойника второго типа была предложена модель представления данных сценического пространства. Предложенная модель, в отличие от существующих подходов, учитывает большее количество данных, в первую очередь, за счет внесения в модель информации о динамических объектах.

Проведена реализация прототипа цифрового двойника сценического пространства и программного обеспечения управления на его основе.

За счет предложенной архитектуры и ряда интеграций с внешними подсистемами и устройствами сценического пространства достигается двусторонняя синхронизация цифрового двойника и объекта автоматизации в реальном времени.

На основе полученной системы были предложены варианты новых методов управления более высокого уровня, строящихся на основе логических правил и реакций на изменения состояния сценического пространства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт*. Москва: АльянсПринт; 2020. 401 с.
2. Хмыров А.В. Современные технологии в создании театральных постановок. *Проблемы современной науки и образования*. 2020;(4–1):90–93.
Khmyrov A.V. Modern Technologies in the Creation of Theater Settings. *Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniya*. 2020;(4–1):90–93. (In Russ.).
3. Байнева И.И. Системы управления освещением на современном производстве. В сборнике: *Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы IV Национальной научно-практической конференции. Том 2, 06–07 декабря 2018 года, Казань, Россия*. Казань: Казанский государственный энергетический университет; 2019. С. 589–595.
Baineva I.I. Lighting Management Systems in Modern Manufacture. In: *Priborostroenie i avtomatizirovannyi elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaistve: materialy IV Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii: Volume 2, 06–07 December 2018, Kazan, Russia*. Kazan: Kazan State Power Engineering University; 2019. P. 589–595. (In Russ.).
4. Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*. 2019;7(1). <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
5. Сухомлин В.А., Намиот Д.Е., Гапанович Д.А. Анализ тенденций развития цифровых двойников нового поколения. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024;12(7):119–130.
Sukhomlin V.A., Namiot D.E., Gapanovich D.A. Analysis of Development Trends of New Generation Digital Twins. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024;12(7):119–130. (In Russ.).

6. Лапина М.А., Багаутдинова А.Р., Лапин В.Г., Лапин В.В. Цифровые двойники: обзор решений и перспективы развития. *Auditorium*. 2024;(3):88–93.
Lapina M.A., Bagautdinova A.R., Lapin V.G., Lapin V.V. Digital Twins: Overview of Solutions and Technology Development Prospects. *Auditorium*. 2024;(3):88–93. (In Russ.).
7. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. In: *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 27–30 June 2016, Las Vegas, NV, USA*. IEEE; 2016. P. 779–788. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
8. Kutsakov A., Maximenko A., Gospodinov G., Bogomolov P., Minkin F. GigaAM: Efficient Self-Supervised Learner for Speech Recognition. [Preprint]. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2506.01192> [Accessed 1st March 2025].
9. Cadena R. *Automated Lighting: The Art and Science of Moving Light in Theatre, Live Performance, Broadcast, and Entertainment*. New York: Routledge; 2006. 496 p. <https://doi.org/10.4324/9780080464534>
10. Jin T., Wu Sh., Dasari M., Apicharttrisorn K., Rowe A. StageAR: Markerless Mobile Phone Localization for AR in Live Events. In: *2024 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 16–21 March 2024, Orlando, FL, USA*. IEEE; 2024. P. 1000–1010. <https://doi.org/10.1109/VR58804.2024.00119>
11. Дорохин В.А., Теряев Л.Н., Нечаевский А.В. Технология создания мета-пространств расширенной реальности внутри помещений без предварительного сканирования. *Информационно-технологический вестник*. 2024;(2):14–35.
Dorohin V.A., Teryaev L.N., Nechaevskiy A.V. Technology for Indoor Extended Reality Meta-Spaces Creation Without Pre-Scan. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik*. 2024;(2):14–35. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Теряев Лев Николаевич, аспирант, руководитель студии инженерного моделирования Государственного университета «Дубна», Дубна, Российская Федерация.
e-mail: vr.lab@uni-dubna.ru

Lev N. Teryaev, Postgraduate, head of the engineering modeling studio, Dubna State University, Dubna, the Russian Federation.

Дорохин Виктор Александрович, старший преподаватель Государственного университета «Дубна», Дубна, Российская Федерация.
e-mail: victor.doroh@gmail.com

Victor A. Dorokhin, Associate lecturer of Dubna State University, Dubna, the Russian Federation.

Подгорный Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор Государственного университета «Дубна», Дубна, Российская Федерация.
e-mail: saptich@rambler.ru

Sergei A. Podgornyi, Doctor of Engineering Science, Professor of Dubna State University, Dubna, the Russian Federation.

Дорохин Артём Александрович, программист Государственного университета «Дубна», Дубна, Российская Федерация.
e-mail: vr.lab@uni-dubna.ru

Artem A. Dorokhin, Programmer of Dubna State University, Dubna, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 16.05.2025; одобрена после рецензирования 28.06.2025; принята к публикации 10.07.2025.

The article was submitted 16.05.2025; approved after reviewing 28.06.2025; accepted for publication 10.07.2025.