

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПОРТА: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ И АНАЛИЗУ

Научная статья

Гладышев М.Д.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-5330-3369;

<sup>1</sup> Астраханский государственный университет, Астрахань, Российская Федерация

<sup>1</sup> ООО «Смелком роботикс», Астрахань, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (mih.gladishev[at]gmail.com)

**Аннотация**

Цифровые двойники, эмулирующие виртуальные версии реальных объектов, становятся важной частью современного цифрового мира. В их разработке ключевую роль играют технологии, обеспечивающие высокую точность и реализм моделей. В этой статье обсуждаются основные технологические аспекты и практические применения цифровых двойников. Рассматриваются методы моделирования, алгоритмы обработки данных и варианты использования в различных областях, что открывает новые возможности для инноваций и оптимизации процессов. Эта перспективная технология уже используется в ряде ведущих портов мира, позволяя значительно улучшить управление и эксплуатацию портовой инфраструктуры. Кроме того, цифровые двойники могут применяться в других сферах, таких как промышленное производство, городское планирование и здравоохранение. Благодаря своей универсальности и эффективности они имеют потенциал стать ключевым фактором развития современной транспортной системы и многих других отраслей, способствуя повышению их конкурентоспособности и устойчивости в условиях глобальной экономики.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, портовые сооружения, технологии, моделирование.

**DIGITAL TWIN PORT: MODERN APPROACHES TO MODELLING AND ANALYSIS**

Research article

Gladishev M.D.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-5330-3369;

<sup>1</sup> Astrakhan State University, Astrakhan, Russian Federation

<sup>1</sup> LLC "Smelcom robotics", Astrakhan, Russian Federation

\* Corresponding author (mih.gladishev[at]gmail.com)

**Abstract**

Digital twins, emulating virtual versions of real objects, are becoming an important part of today's digital world. In their development, technologies that ensure high accuracy and realism of the models play a key role. This article discusses the main technological aspects and practical applications of digital twins. Modelling techniques, data processing algorithms and use cases in various fields are reviewed, opening up new opportunities for innovation and process optimization. This promising technology is already in use in a number of the world's leading ports, enabling significant improvements in the management and operation of port infrastructure. In addition, digital twins can be applied in other areas such as industrial production, urban planning and healthcare. Due to their versatility and efficiency, they have the potential to become a key factor in the development of the modern transport system and many other industries, helping to increase their competitiveness and sustainability in the global economy.

**Keywords:** digital twin, port facilities, technology, modelling.

**Введение**

Для начала хотелось бы определиться с термином, что употреблялся ранее, и будет еще употребляться – цифровой двойник порта ЦДП представляет собой виртуальную модель порта, созданную на основе точных данных о его работе. Эта модель отражает все аспекты функционирования порта, включая грузопотоки, движение судов, работу погрузочно-разгрузочных комплексов, метеорологические условия и многое другое. В современном мире портовая инфраструктура является жизненно важной артерией мировой торговли. В последние годы набирает обороты инновационная технология, способная кардинально изменить подход к управлению портами – система цифрового двойника (ЦДП).

**Методы и принципы исследования**

Многие разработчики программного обеспечения, а также интеграторы новых технологий активно обсуждают и внедряют такую технологию, как «Цифровой двойник». Огромное количество исследований, направлено на расширение данного раздела, а также на упрощение технологии внедрения.

В работе «Implementation of an IoT- and Cloud-based Digital Twin for Real-Time Decision Support in Port Operations» [1] представлен цифровой двойник для помощи операторам диспетчеризации грузовых автомобилей, который позволяет определять оптимальную политику диспетчеризации с использованием прогнозов производительности на основе моделирования. Уникальное программное обеспечение для моделирования с ограниченным интерфейсом, возможность развертывания приложения в требовательных промышленных средах и интеграция информации с датчиков в реальном времени представляют собой три основные проблемы при реализации приложений цифровых двойников для логистических систем. Авторы рассмотрели в своей работе пакет моделирования с открытым исходным

кодом, который сочетается с платформой Интернета вещей (ИОТ) для простой интеграции информации в реальном времени.

При этом в работе Analysis of real-time tour building and scheduling strategies for in-plant milk-run systems with volatile transportation demand [2] авторы делают акцент на сценариях загрузки системы с точки зрения уровня обслуживания, доставки, времени выполнения заказа, использования систем и необходимого количества поездов, используя модель моделирования дискретных событий. В работе рассматриваются больше циклические системы обработки материалов, которые широко используются и обеспечивают частую доставку деталей в контейнерах небольшими партиями из центрального склада в несколько точек использования на заводе.

В работах Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports [3] и Digital twin framework for large comprehensive ports and a case study of Qingdao Port [4] авторы рассматривают и предлагают перспективные структуры прикладной системы цифрового двойника на основе анализа бизнес-характеристик крупных комплексных портов. Анализируются методы и технологии построения цифровых двойников, и технологии объединение моделей. Предложенные системы реализуют интеллектуальную работу порта с основными функциями трехмерного визуального мониторинга и оптимальной диспетчеризации на основе данных восприятия в реальном времени.

Интересные решения, связанные с системой поддержки принятия решений, методом сбора данных и формированию системы, вокруг портовой инфраструктуры и технологией оцифровки объектов, для оптимизации процессов обслуживания и повышения эффективности, представлены в работах A Digital Twin-Based Operation Status Monitoring System for Port Cranes [5], Analytics with digital-twinning: A decision support system for maintaining a resilient port [6], Renewable Energy System Controlled by Open-Source Tools and Digital Twin Model: Zero Energy Port Area in Italy [7]. Описанные системы, в полной мере являются актуальными и формируют мощную базу для построения цифрового порта вокруг себя. Инновационный подход, и попытка сбора актуальных проблем и предложения по их решениям [8], [9], [10], прослеживаются в работах многих авторов.

Цифровые двойники на сегодняшний день представляют собой виртуальные аналоги реальных объектов или сущностей, созданные с использованием передовых технологий моделирования и визуализации. Эти модели могут варьироваться от простых трехмерных образов до сложных виртуальных ассоциаций, полностью эмулирующих поведение и характеристики оригиналов.

Ключевые технологии и решения, используемые в разработке цифровых двойников, включают в себя:

- трехмерное моделирование;
- сканирование и захват данных;
- методы обработки изображений и видео;
- искусственный интеллект и машинное обучение;
- интерфейсы взаимодействия;

Эти технологии позволяют создавать цифровые модели, которые не только точно отражают внешний вид и характеристики объектов, но и способны эмулировать их поведение и взаимодействие с окружающей средой, структура показана на Рисунке 1.

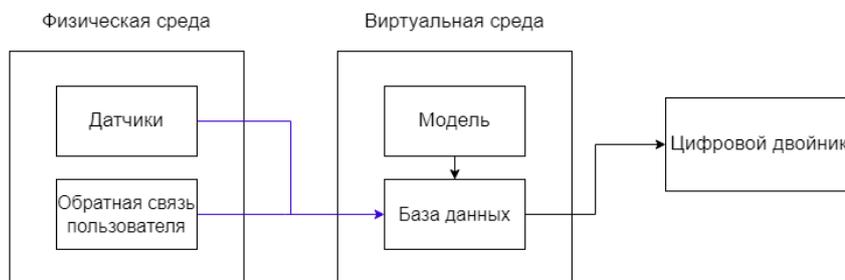


Рисунок 1 - Общая структура цифрового двойника

### Основные результаты

Система цифрового двойника порта (ЦДП) может представлять собой комплексную информационную систему, которая объединяет в себе различные модели, данные и алгоритмы для создания виртуальной копии реального порта. ЦДП позволяет оптимизировать работу порта, повысить его эффективность и безопасность.

Для корректной и точной работы разрабатываемой системы, необходимо обеспечить наличие следующих узлов:

#### 1. Сбор и интеграция данных:

- датчики, установленные на различных объектах портовой инфраструктуры (причалах, кранах, судах), собирают данные об их состоянии, местоположении, скорости движения и т.д.;
- системы мониторинга фиксируют информацию о погодных условиях, уровне воды, движении судов в акватории порта; Информационные системы портового оператора предоставляют данные о планируемых и фактических грузопотоках, расписании движения судов, статусе обработки грузов.

#### 2. Обработка и анализ данных:

- полученные данные очищаются, фильтруются и нормализуются;
- аналитические алгоритмы обрабатывают данные и выявляют закономерности, тренды и отклонения от нормы;

- модели прогнозирования предсказывают будущее состояние системы, например, время обработки судна, вероятность поломки оборудования.

### 3. Визуализация и моделирование:

- 3D-модель порта отображает его виртуальную копию, на которой в режиме реального времени отображаются данные о состоянии объектов, движении судов, грузопотоках;  
 - системы имитационного моделирования позволяют проигрывать различные сценарии работы порта, например, изменение грузопотока, внедрение новых технологий.

### 4) Управление и оптимизация:

- на основе информации, полученной от ЦДП, диспетчеры порта принимают решения об оптимизации работы системы;  
 - автоматизированные системы управления могут самостоятельно регулировать работу портового оборудования, оптимизировать маршруты движения судов и распределять ресурсы.

Предположим, что ЦДП используется для оптимизации процесса обработки контейнеров в порту. Система может работать следующим образом:

- Датчики, установленные на кранах, фиксируют время, необходимое для разгрузки/погрузки каждого контейнера.  
 - Аналитический алгоритм на основе этих данных определяет среднее время обработки контейнера.  
 - Модель прогнозирования, учитывая время прибытия судна и количество контейнеров на борту, предсказывает время, необходимое для разгрузки/погрузки судна.  
 - Диспетчер порта: используя информацию, полученную от ЦДП, планирует работу кранов, и распределяет контейнеры по складам, чтобы минимизировать время простоя судна в порту.

Обозначим:

$T_i$  – время, необходимое для разгрузки/погрузки  $i$ -го контейнера;

$n$  – количество контейнеров на судне;

$t_p$  – среднее время обработки контейнера;

$t_r$  – прогнозируемое время разгрузки/погрузки судна.

Тогда:

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (1)$$

$$t_r = n * t_p \quad (2)$$

Диспетчер порта может использовать  $t_r$  для планирования работы кранов и распределения контейнеров по складам.

Система ЦДП может быть представлена в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} x_1 &= f_1(d_1 + d_2 + \dots + d_n) \\ x_2 &= f_2(x_1, d_{n+1} + d_{n+2} + \dots + d_{n+i}) \\ &\dots \\ x_m &= f_m(x_{m-1}, x_{m-2}, x_1, d_{n+m-1} + \dots + d_n) \end{aligned}$$

где:

$x_i$  – выходные переменные системы (например, прогнозируемое время обработки судна);

$d_i$  – входные переменные системы (например, данные с датчиков);

$f_i$  – функции, реализующие алгоритмы обработки данных, прогнозирования и оптимизации.

Эта система уравнений описывает общую структуру ЦДП, но конкретные функции  $f_i$  и входные/выходные переменные  $x_i$  и  $d_i$  будут зависеть от конкретной задачи, для которой используется ЦДП. При этом, как говорилось ранее, ЦДП представляет собой сложную систему, состоящую из множества взаимосвязанных подсистем. Для более подробного описания работы ЦДП можно попробовать использовать систему дифференциальных уравнений, которая учитывает различные факторы, влияющие на работу порта.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t)) \quad (3)$$

$$y(t) = g(x(t)) \quad (4)$$

где:

$x(t)$  – вектор состояния системы в момент времени  $t$ , который может включать в себя такие переменные, как: количество судов, ожидающих обработки в порту, количество судов, находящихся в процессе обработки, время обработки каждого судна, грузопоток в порту, состояние портовой инфраструктуры (например, доступность причалов, кранов), погодные условия, и может выражаться как:

$$x(t) = (n_w, n_p, n_q, t_1 \dots t_{np}, G_1 \dots G_{np}, G_{tot}, s_z \dots s_m, w) \quad (5)$$

$n_w$  – количество судов, ожидающих обработки в порту;

$n_p$  – количество судов, находящихся в процессе обработки;

$n_q$  – количество судов, покинувших порт.

$t_i$  – время обработки  $i$ -го судна, где  $i = 1, 2, \dots, n_p$ ;

$t_{avg}$  – среднее время обработки судна.

$G_i$  – грузопоток  $i$ -го судна, где  $i = 1, 2, \dots, n_p$ ;

$G_{tot}$  – общий грузопоток в порту.

$s_j$  – состояние  $j$ -го элемента портовой инфраструктуры, где  $j = 1, 2, \dots, m$ , (например, причал, кран, склад);

$s_j = 1$  – элемент доступен;

$s_j = 0$  – элемент недоступен.

$w$  – вектор погодных условий, который может включать в себя такие переменные, как: скорость ветра, волнение моря, видимость.

$u(t)$  – вектор управляющих воздействий на систему, который может включать в себя: решения диспетчеров порта о распределении ресурсов, изменения в расписании движения судов, ремонтные работы портовой инфраструктуры.

$$u(t) = (R, P, t_m, d_m, w_c)$$

$r_i$  – количество ресурсов, выделенных для обработки  $i$ -го судна, где  $i = 1, 2, \dots, n_p$ ;

$R$  – вектор распределения ресурсов:  $R = [r_1, r_2, \dots, r_{n_p}]$ .

$p_i$  – приоритет обработки  $i$ -го судна, где  $i = 1, 2, \dots, n_p$ ;

$P$  – вектор приоритетов:  $P = [p_1, p_2, \dots, p_{n_p}]$ .

$t_m$  – время начала ремонтных работ на  $m$ -ом элементе портовой инфраструктуры;

$d_m$  – продолжительность ремонтных работ на  $m$ -ом элементе портовой инфраструктуры.

$w_c$  – решение о корректировке работы порта в связи с погодными условиями.

$f(x(t), u(t))$  – векторная функция, описывающая динамику системы, т.е. изменение состояния системы в зависимости от управляющих воздействий.

$g(x(t))$  – векторная функция, описывающая выходные переменные системы, которые представляют интерес для пользователя, например, время ожидания судов в порту, пропускная способность порта.

### **Заключение**

Система цифрового двойника порта представляет собой многопараметрическую и динамическую систему, предназначенную для моделирования и оптимизации работы порта в режиме реального времени. ЦДП состоит из множества взаимосвязанных подсистем, каждая из которых описывает один из аспектов работы порта. В рамках работы, была предложена система линейных уравнений, дополняющая и расширяющая уже имеющиеся системы. Уравнения не являются полными и отражающими весь возможный список тех или иных переменных – событий. Но являются хорошей базой для выстраивания вокруг себя дополнительных функций и встраивания дополнительных переменных для расширения системы и увеличения количества данных, что могут работать с ней.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Астраханского государственного университета (Приоритет 2030).

### **Конфликт интересов**

Не указан.

#### **Рецензия**

Кузичева Н.Ю., ФГБОУ ВО Мичуринский государственный аграрный университет, Мичуринск, Российская Федерация

### **Conflict of Interest**

None declared.

#### **Review**

Kuzicheva N.Y., Michurinsky State Agrarian University, Michurinsk, Russian Federation

### **Список литературы на английском языке / References in English**

1. Hofmann W. Implementation of an IoT- and Cloud-based Digital Twin for Real-Time Decision Support in Port Operations / W. Hofmann, F. Branding // IFAC-PapersOnLine. — 2019. — Vol. 52. — Iss. 13. — P. 2104-2109
2. Klenk E. Analysis of real-time tour building and scheduling strategies for in-plant milk-run systems with volatile transportation demand / E. Klenk, S. Galka // IFAC-PapersOnLine. — 2019. — Vol. 52. — Iss. 13. — P. 2110-2115
3. Wang K. Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports / K. Wang, Q. Hu, M. Zhou [et al.] // Case Studies on Transport Policy. — 2021. — Vol. 9. — Iss. 3. — P. 1298-1312
4. Yang W. A digital twin framework for large comprehensive ports and a case study of Qingdao Port / W. Yang, X. Bao, Y. Zheng [et al.] // Int J Adv Manuf Technol. — 2024. — 131. — P. 5571–5588. — DOI: 10.1007/s00170-022-10625-1
5. Zhou Y. A Digital Twin-Based Operation Status Monitoring System for Port Cranes / Y. Zhou, Z. Fu, J. Zhang [et al.] // Sensors. — 2022. — Vol. 22. — Iss. 9. — P. 3216.
6. Zhou Ch. Analytics with digital-twinning: A decision support system for maintaining a resilient port / Ch. Zhou, J. Xu, E. Miller-Hooks [et al.] // Decision Support Systems. — 2021. — Vol. 143. — P. 113496
7. Agostinelli S. Renewable Energy System Controlled by Open-Source Tools and Digital Twin Model: Zero Energy Port Area in Italy / S. Agostinelli, F. Cumo, M.M. Nezhad [et al.] // Energies. — 2022. — Vol. 15. — Iss. 5.
8. Klar R. Digital Twins for Ports: Derived From Smart City and Supply Chain Twinning Experience / R. Klar, A. Fredriksson, V. Angelakis // IEEE Access. — 2023. — vol. 11. — pp. 71777-71799. — DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3295495
9. Madusanka N.S. Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends / N.S. Madusanka, Y. Fan, S. Yang [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — 11(5). — P. 1021. — DOI: 10.3390/jmse11051021
10. Nam J.-W. A Data Factorization Study for the Application of Digital Twin Technology to Container Ports / J.-W. Nam, Y.-S. Kim, Y.-R. Shin // Journal of Navigation and Port Research. — 2022. — Vol. 46. — Iss. 1. — P. 42-56