

УДК 004.94

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МАТЕРИАЛЬНОГО ПОТОКА НА ПРИМЕРЕ СОРТОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАТФОРМЫ DATA-TRACK

Хуссейн Ашрф Адиль Саид, студент, Базовая кафедра «Аналитика больших данных и методы видеоанализа», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Балунгу Даниель Мусафири, аспирант, ассистент Базовой кафедры «Аналитика больших данных и методы видеоанализа», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Аннотация

В статье описывается процесс построения цифрового двойника материальных потоков для сортопрокатного производства с использованием российского решения DATA-TRACK и метода объектных отношений (ORT). На первом этапе создается цифровая модель участка: определяются объекты учёта, моделируются траектории перемещения изделий и устанавливаются виртуальные датчики (такие как скорость транспортировки, позиция заготовки). Затем посредством интерфейса Swagger формируются сущности и их атрибуты, такие как температура в печи, задаваемые типами данных float, и привязываются к процессу обработки изделия. Автоматизация процесса мониторинга осуществляется с помощью бессерверной архитектуры Nuclio: специальная Python-функция отслеживает изменение статуса объекта учёта. Когда заготовка поступает в печь, срабатывает триггер (HTTP-hook совместно с конвейером FBP-платформы DATA-TRACK), инициирующий выполнение функции. Она запрашивает актуальные значения температурного параметра через API и обновляет соответствующий показатель объекта учёта через внутренние REST-запросы DATA-TRACK. Кроме того, эта же функция формирует метрики в формате Prometheus (workpiece_id, температура), которые сразу отображаются в панели инструментов Grafana. Благодаря этому оператор непрерывно видит динамику изменений температуры в печи и оперативно принимает меры при выходе значений за допустимые пределы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровой двойник, материальный поток, сортопрокатное производство, DATA-TRACK, ORT, автоматизация производства.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN FOR MATERIAL FLOW BASED ON THE EXAMPLE OF A LONG ROLLING PRODUCTION USING THE DATA- TRACK PLATFORM

Hussein Asharf Adil Said, Student, Basic Department of Big Data Analytics and Video Analysis Methods, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Balungu Daniel Musafiri, Postgraduate student, Assistant Basic Department of Big Data Analytics and Video Analysis Methods, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Abstract

This article describes the process of building a digital twin of material flows for long-range production using a domestic DATA-TRACK solution and the object relations method (ORT). First, a digital model of the site is created: accounting objects are determined, product movement trajectories are modeled, and virtual sensors are installed (such as the speed of transportation, the position of the workpiece). Then, through the Swagger interface, entities and their attributes are formed, such as the temperature in the furnace, set by float data types, and linked to the product processing process. The monitoring process is automated using the Nuclio serverless architecture: a special Python function monitors changes in the status of the accounting object. When the workpiece enters the furnace, a trigger is triggered (HTTP hook in conjunction with the FBP pipeline of the DATA-TRACK platform), which initiates the execution of the function. It requests the current values of the temperature parameter through the API

and updates the corresponding indicator of the accounting object through internal DATA-TRACK REST requests. In addition, the same function generates metrics in the Prometheus format (workpiece_id, temperature), which are immediately displayed in the Grafana toolbar. Due to this, the operator continuously sees the dynamics of temperature changes in the furnace and promptly takes measures when the values exceed the permissible limits.

KEYWORDS: digital twin, material flow, long rolling production, DATA-TRACK, ORT, production automation

1. Введение

Цифровые двойники (ЦД) становятся ключевым инструментом в промышленности, позволяя оптимизировать производственные процессы за счет виртуального моделирования и анализа данных в реальном времени [1]. Они становятся предметом интенсивных исследований не только в отечественной науке, но и в зарубежных публикациях. Например, авторы Fei Tao, Bin Xiao и Qinglin Qi сосредоточились на изучении развития и методов моделирования цифровых двойников, детально раскрывая их основные концепции и сферы применения [2]. Подобная тематика была затронута и в статье Mengnan Liu и Shuiliang Fang, представивших комплексный обзор внедрения цифровых двойников с позиций теоретических основ, технологических аспектов и промышленного опыта [3]. Практическое применение цифровых двойников широко распространено в промышленности — здесь они служат инструментом повышения эффективности производственных процессов, позволяя моделировать сценарии эксплуатации оборудования, своевременно обнаруживать потенциальные сбои и минимизировать время вынужденных остановок производства. Такие возможности способствуют росту производительности труда и улучшению качества выпускаемой продукции. Исследователи Осипов Ю.М., Юдина Т.Н., Гелисхан И.З., Шпак П.С., Сычева Е.Г. и Меринская Е.Е. подчеркивают важность цифровых двойников именно в производственной деятельности, показывая их влияние на снижение издержек и повышение конкурентоспособности предприятий [4, 5].

Использование цифровых двойников распространяется и на логистику, помогая компаниям совершенствовать процессы управления поставками, выбирать наиболее эффективные транспортные маршруты и ускорять доставку товаров потребителям. Современные научные публикации демонстрируют, как внедрение цифровых двойников трансформирует подходы к управлению предприятиями и разработке стратегий бизнеса. Так, ученые Кокорев Д.С. и Юрин А.А., Городнова Н.В. отмечают значительный вклад цифровых двойников в развитие корпоративных стратегий и принятие управленческих решений [6, 7]. Помимо этого, некоторые

исследователи обращаются к опыту использования нейронных сетей в бизнесе, оценивая позитивное и негативное воздействие технологий искусственного интеллекта на деятельность компаний [4, 8, 9].

В металлургической отрасли, особенно в сортопрокатном производстве, управление материальными потоками остается сложной задачей из-за высокой динамичности и множества факторов, влияющих на эффективность. Традиционные методы планирования и контроля часто не справляются с быстро меняющимися условиями, что приводит к простоям, перегрузкам и не оптимальному использованию ресурсов. Разработка цифрового двойника материального потока позволяет создать точную виртуальную копию производственного процесса, которая отражает его текущее состояние и прогнозирует возможные сценарии. Это открывает новые возможности для анализа, оптимизации маршрутов перемещения заготовок, снижения энергозатрат и повышения общей производительности. Однако успешная реализация таких решений требует не только качественных данных, но и гибкой платформы, способной интегрироваться с промышленными системами и адаптироваться к изменениям.

В данной работе рассматривается создание цифрового двойника материального потока для сортопрокатного производства с использованием платформы DATA-TRACK. Этот инструмент предоставляет необходимые средства для сбора, обработки и визуализации данных, а также поддерживает моделирование различных сценариев. Цель исследования – продемонстрировать, как цифровой двойник может улучшить управление материальными потоками, сократить издержки и повысить прозрачность производственных процессов. Результаты работы могут быть полезны не только для металлургических предприятий, но и для других отраслей, где важна оптимизация логистики и ресурсов.

2. Материалы и методы

2.1. Описание объекта исследования

Объектом исследования является технологический участок сортопрокатного производства, включающий четыре взаимосвязанных элемента:

1. Транспортные агрегаты (рольганги). Участок оборудован системой роликовых конвейеров, обеспечивающих непрерывную подачу заготовок от зоны приёма к зоне подготовки к нагреву и далее – к прокатным машинам. Конвейеры имеют регулируемую скорость 0,5–1,5 м/с, оснащены датчиками положения и веса, что позволяет точно определять момент передачи каждой

заготовки в следующий технологический узел и контролировать равномерность загрузки оборудования.

2. Нагревательная печь. Используется камерная печь с электрическим или газовым подогревом, способная разогреть стальные заготовки до 1100–1250 °С. Объём камеры — до 20 т за один цикл, время нагрева и выдержки программируется под конкретный химический состав стали.

3. Прокатные клетки. Линия прокатного стана состоит из черновых и чистовых клеток, представленных четырьмя–шестью парами валков. Черновая группа клеток выполняет предварительное уменьшение сечения на 20–30 %, чистовая — окончательную калибровку профиля до заданных допусков ($\pm 0,1$ мм).

Связывающая автоматика и информационные системы. Вся линия интегрирована в единую платформу MES/ERP, где осуществляется:

- регистрация партий и отдельных заготовок (DataTrack/MTS) с присвоением уникального идентификатора и штрих-/RFID-метки;
- учёт параметров каждого этапа: температура, усилие прокатки, скорость;
- автоматическое создание команд на последующие операции (дескалфикация, маркировка, упаковка);
- сбор и хранение исторических данных для анализа качества и эффективности.

Сложная организация материальных потоков на этом участке требует слаженной работы всех звеньев и точного взаимного обслуживания: нарушение ритмичности одного узла (например, сбой в подаче на рольганги или отклонение температурного режима печи) мгновенно сказывается на качестве готового проката и общих показателях производительности. Именно поэтому исследование фокусируется на методах контроля перемещений и параметров обработки каждой заготовки в цепочке «партия → заготовка».

2.2. Метод ORT

Метод ORT (Object Relations Technique) представляет собой современный подход к моделированию сложных производственных систем, основанный на принципах объектно-ориентированного анализа. В отличие от традиционных методов, которые рассматривают технологические процессы изолированно, данный подход фокусируется на комплексном анализе взаимодействий между объектами, их свойствами и динамикой взаимосвязей. Особую ценность

этот метод представляет для моделирования материальных потоков в сортопрокатном производстве, где множество взаимосвязанных факторов определяют эффективность всего технологического процесса.

Суть ORT-подхода заключается в представлении производства как динамического потока объектов, которые в процессе обработки изменяют свои свойства и вступают во взаимодействия друг с другом [10]. В качестве объектов рассматриваются все значимые для производственного процесса сущности - от исходного сырья и технологического оборудования до промежуточных заготовок и готовой продукции. При этом особое внимание уделяется иерархии связей между объектами, которая включает как структурные производственные отношения (цеха, участки, технологические линии), так и генеалогические цепочки преобразования материалов, а также динамические взаимодействия в процессе обработки (рис. 1).

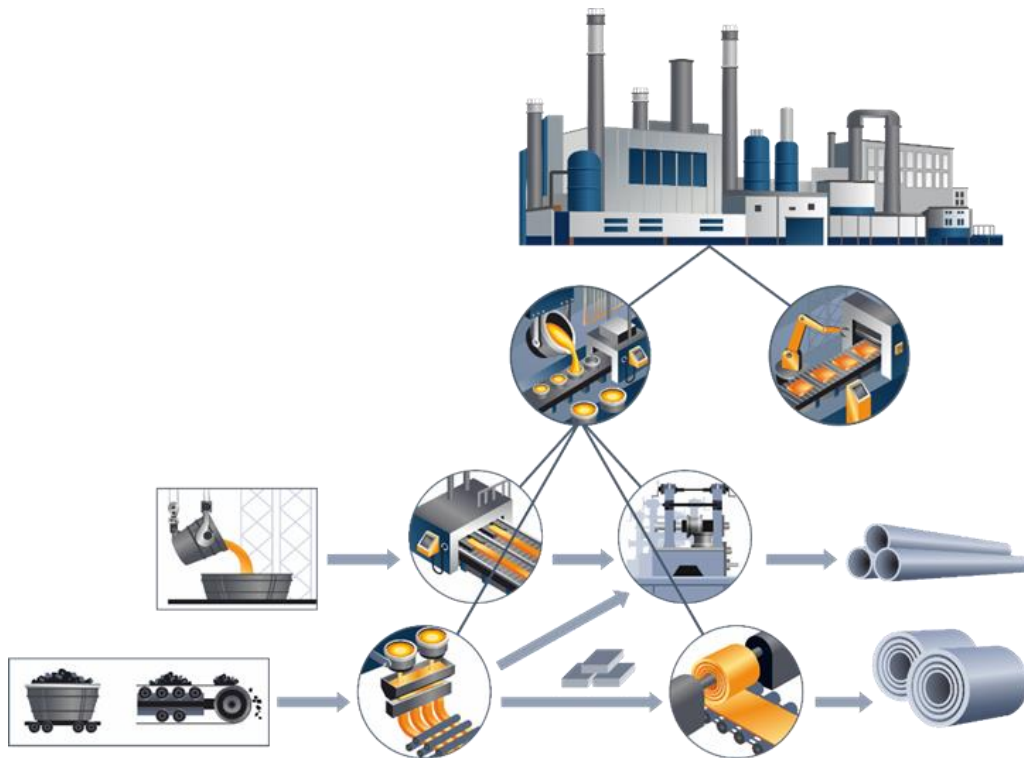


Рис. 1. Объекты на производстве и отношения (связи) объектов¹

Важной особенностью метода является акцент на изменении свойств объектов в ходе производственного процесса. Каждая единица учета (ЕУ) в системе ORT характеризуется

¹ ДАТА-ЦЕНТР Автоматика. Участие «ДАТА-ЦЕНТР Автоматика» в 20-й юбилейной конференции «Передовые Технологии Автоматизации (ПТА)» в Екатеринбурге. URL: <https://datacenter.ru/company-news/участие-дата-центр-автоматика-в-20-й-ю/> (дата обращения: 20.03.2025)

комплексом параметров, которые последовательно изменяются при прохождении технологических операций. Эти параметры включают геометрические характеристики, массу, механические свойства, температурные режимы и химический состав. Изменения этих свойств фиксируются и анализируются в контексте их влияния на последующие технологические операции и качество конечной продукции.

Применение ORT-метода при создании цифрового двойника на платформе DATA-TRACK позволяет достичь нового уровня детализации моделирования производственных процессов. Система получает возможность не просто фиксировать отдельные технологические операции, но и отслеживать полный жизненный цикл каждой единицы продукции, анализировать каскадные эффекты от изменений параметров обработки и прогнозировать их влияние на конечный результат. Например, моделирование задержки на одном из прокатных станов в такой системе позволяет оценить не только сам факт простоя, но и его последствия для последующих операций, включая изменения температурных режимов и качественных характеристик продукции.

Основное преимущество ORT-подхода заключается в его способности обеспечивать комплексное представление производственной системы с учетом всех значимых взаимосвязей между ее элементами. Это позволяет не только анализировать текущее состояние производства, но и с высокой точностью прогнозировать результаты различных управленческих решений. Интеграция данного метода с возможностями платформы DATA-TRACK создает мощный инструмент для оптимизации материальных потоков, предоставляя возможность тестирования улучшений в виртуальной среде перед их физической реализацией на производстве.

2.3. Процесс разработки цифрового двойника на платформе DATA-TRACK

Для построения цифрового двойника использована отечественная платформа DATA-TRACK, предоставляющая инструменты визуального моделирования и автоматизации производственных процессов. Основой моделирования служит методология Object Relations Technique (ORT), позволяющая описывать производственные объекты, их параметры и взаимосвязи в единой информационной модели. Метод ORT способствует интеграции разнородных данных от оборудования и систем управления, обеспечивая создание точной цифровой копии реального производственного процесса.

В рамках платформы DATA-TRACK [11, 12] реализованы возможности создания виртуальных сигналов, конфигурации транспортных агрегатов и линий движения, а также

разработки логики управления на базе конечных автоматов. Такая архитектура обеспечивает высокую гибкость, адаптивность и масштабируемость цифрового двойника, что позволяет эффективно моделировать и контролировать производственные процессы.

Дополнительно инструментарий **MTS** отвечает за управление жизненным циклом и трассировку событий каждого объекта (партии и заготовки), предоставляя REST-API для инициализации сущностей, записи изменений параметров и построения цепочек «родитель–потомок».

Парадигма **FBP** (Flow-Based Programming) используется для визуального конструирования потоков данных и управления последовательностью операций: блоки обработки (например, нагрев, прокат, контроль качества) соединяются «каналами» обмена сообщениями, что упрощает масштабирование и изменение бизнес-логики без переписывания кода.

Конфигурирование виртуальных сигналов

1. «Константа 1» — виртуальный сигнал с постоянной скоростью вращения рольганга.
2. «Константа 3» — виртуальный сигнал, задающий изменённую скорость для отводящего рольганга.
3. «Факт шага печи» — сигнал, запускающий один шаг печи и смещение заготовок внутри неё.
4. «Создание заготовки» — сигнал, создающий заготовку в определённой точке.

Описание этапа «Создание нитей (маршрутов движения)»

На данном этапе происходит определение маршрутов перемещения единиц учёта (заготовок) по производственному участку. В платформе DATA-TRACK это реализуется путём добавления и настройки нитей — линий, по которым происходит движение материала.

В работе используются следующие данные:

- Номера нитей (например, 9000, 9001, 9002), которые соответствуют подающей, печной и отводящей линиям соответственно.
- Типы транспортных агрегатов, закрепленных за нитями: рольганги (например, Рольганг 6000, 6001), печные агрегаты (АЛП), прокатные клетки.
- Параметры нитей, включающие протяжённость, направление движения и настройку остановок на концах линий.

- Конечные автоматы, связанные с нитями, которые отвечают за управление логикой перемещения заготовок.

Создание и настройка сущности

Сущность представляет собой объект учета в производственном процессе: это может быть заготовка, партия, оборудование и любые другие единицы, с которыми осуществляется слежение и обработка данных. Настройка сущности через Swagger API: «Заготовка», «Партия» с параметрами «Температура в печи», «В слежении». Реализация логики управления через функцию в Nucleo: конечный автомат фиксирует факт входа заготовки в печь и записывает текущую температуру. Визуализация процессов реализована в Grafana через логирование состояния автомата.

3. Результаты и обсуждение

В процессе работы была создана комплексная цифровая модель, которая включает в себя создание виртуальных сигналов, настройку схемы перемещения заготовок через метрологический участок. Заготовки поступают на участок через входную нить, проходят через печь и выходят через отводящую нить, где находится клеть. После прохождения через клеть заготовка становится более обработанной. Затем она перемещается до конца и удаляется через удаление застрявших. Также были созданы и идентифицированы экземпляры, проведена термообработка, осуществлен геометрический контроль и учёт.

Для наглядности был сформирован отчёт по «Единицам учета», в котором каждая строка таблицы соответствует отдельной заготовке. В таблице 1 отображаются её геометрические параметры и уникальный идентификатор, что позволяет соотнести физические измерения с цифровыми записями партии.

Таблица 1. Геометрические параметры единиц учета ЕУ

X1	X	Y1	Y2	Нить	Тип ЕУ	BaseId
17	17.3	0	6	9001	workpiece	115704
17	17.3	0	6	9001	workpiece	178425
17	17.3	0	6	9001	workpiece	181765
17	17.3	0	6	9001	workpiece	195905

X1	X	Y1	Y2	Нить	Тип ЕУ	BaseId
17	17.3	0	6	9001	workpiece	201081
17	17.3	0	6	9001	workpiece	201116
17	17.3	0	6	9001	workpiece	219890
17	17.3	0	6	9001	workpiece	240795

В таблице приведены следующие данные: X1 / X2, Y1 / Y2 — границы зоны измерений после термообработки; Нить — номер канала, по которому поступают данные о заготовке; Тип ЕУ — наименование сущности (в данном случае «workpiece»); baseId — уникальный идентификатор экземпляра, связывающий запись в системе трекинга с параметрами партии (марка стали, профиль, длина, сечение и т. д.).

Интеграция с Swagger-спецификациями DB-API и MTS-API позволила автоматизировать конфигурирование запросов и упростила обработку ошибок. При разработке был реализован механизм кэширования данных unitType/workpiece, что снизило количество повторных HTTP-запросов и уменьшило нагрузку на сервер.

Использованный конечный автомат, развернутый в Nuclio и собранный с помощью ORT, продемонстрировал высокую устойчивость и производительность: даже при одновременной обработке нескольких партий система оставалась отзывчивой, не перегружая API-серверы и обеспечивая плавный поток данных. Наконец, визуализация результатов в Grafana позволила в режиме реального времени контролировать температурный профиль печи и динамику счётчика in tracking для каждой партии, что делает систему удобной и прозрачной для операторов.

Полученные результаты демонстрируют, что разработанная цифровая модель обеспечивает полную автоматизацию и прозрачность всего пути заготовки по метрологическому участку. В отличие от классических ручных или полуавтоматических процессов, где операторы вручную регистрируют каждый этап, здесь все шаги — от создания экземпляра заготовки до фиксации её параметров при термообработке и геометрическом контроле — выполняются единым скриптом на платформе Expert Base. Благодаря интеграции с OpenAPI-спецификациями DB-API и MTS-API удалось убрать необходимость ручного формирования HTTP-запросов и настроить единую точку входа для всех операций.

Непрерывный цикл, обеспечиваемый конечным автоматом в Nuclio, показал высокую устойчивость при росте нагрузки: во время тестов одновременно запускалось до нескольких десятков партий, и, несмотря на это, система не фиксировала значимых задержек или ошибок соединения. Ключевую роль здесь сыграло кэширование запроса unit Type/workpiece и аккуратная обработка исключений HTTP 4xx/5xx, что не только снизило количество обращений к серверу, но и обеспечило предсказуемость поведения в пограничных ситуациях.

Визуализация через Grafana позволила в реальном времени отслеживать температурный профиль каждого экземпляра и динамику счётчика in tracking. Наблюдения за температурными графиками подтвердили, что временные интервалы фиксации (каждые 10 секунд) достаточны для обнаружения ключевых изменений термо цикла без излишней детализации, что оптимизирует объем хранимых данных и снижает нагрузку на базу данных. При этом таблица «Единицы учёта» наглядно показала согласованность физических измерений (координат X1, X2, Y1, Y2) с цифровыми метаданными, что критично для валидации качества партий.

4. Заключение

Разработанная цифровая модель производственного участка представляет собой комплексное решение, обеспечивающее полный автоматизированный учет и мониторинг прохождения заготовок через технологический процесс. Модель построена на современной инфраструктуре с применением российских платформ и методик, включая платформу DATA-TRACK и методологию ORT. Созданная цифровая модель охватывает весь путь заготовки от поступления на участок до выхода готового продукта. Используются виртуальные датчики и контроллеры, позволяющие мониторить ключевые показатели (скорость, положение, температуру), синхронизируя физическую реальность с цифровой моделью. Для реализации автоматического сбора и хранения данных применялась архитектура на основе бессерверных вычислений Nuclio, что существенно повышает надежность и масштабируемость системы. Важным достижением стало интегрированное взаимодействие с внешними системами через современные API-интерфейсы, такие как DB-API и MTS-API. Такая интеграция устраняет необходимость ручного ввода данных оператором, минимизируя вероятность ошибок и повышая эффективность работы персонала. Механизм кэширования запросов позволил уменьшить число обращений к внешним серверам и увеличить общую производительность системы.

Система успешно прошла испытания, подтвердившие её работоспособность и эффективность при значительных нагрузках. Контроль и визуализацию процесса обеспечивают специализированные инструменты, такие как Grafana, предоставляющие оператору удобный доступ к актуальной информации о ходе термической обработки и состоянии заготовок. Реализация цифровой модели способствует существенному сокращению затрат на производство, увеличению точности технологического процесса и оперативному выявлению дефектов. Предложенная технология демонстрирует перспективы дальнейшего улучшения существующих подходов к контролю качества и документальному сопровождению металлургического производства, открывая новые горизонты цифровизации отрасли.

Литература

5. Струнин, Д. А. Роль цифровых двойников в современном производстве / Д. А. Струнин. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2025. — № 6 (557). — С. 77-79. — URL: <https://moluch.ru/archive/557/122679/> (дата обращения: 01.04.2025)
6. Tao F. et al. Digital twin modeling //Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Т. 64. – С. 372-389.
7. Liu M. et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications //Journal of manufacturing systems. – 2021. –Т. 58. – С. 346-361
8. Осипов Ю. М. Информационно-цифровая экономика: концепт, основные параметры и механизмы реализации / Ю. М. Осипов, Т. Н. Юдина, И. З. Гелисханов // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика. – 2019. – № 3. – С. 41-60. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39216653> .
9. Шпак П. С. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики / П. С. Шпак, Е. Г Сычева, Е. Е. Меринская // Вестник Омского университета. Серия: Экономика. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 57-68. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43073247> .
10. Городнова Н. В. Применение искусственного интеллекта в бизнес-сфере: современное состояние и перспективы / Н. В. Городнова // Вопросы инновационной экономики. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 1473-1492. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-iskusstvennogo-intellekta-v-biznes-sfere-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy> (дата обращения: 01.04.2025).

11. Кокорев Д. С. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса / Д. С. Кокорев, А. А. Юрин // Colloquium-Journal. – 2019. – № 10-2(34). – С. 101-104. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38212454> .
12. Логинов Е. Л. Искусственный интеллект и BIG DATA для управления социумом в условиях стратегических бифуркаций: цифровой двойник человека как партнера-клиента-оппонента органов управления / Е. Л. Логинов, А. А. Шкута // Искусственные общества. – 2019. – Т. 14, № 3. – С. 4. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41301693>.
13. Прохорова А, Лысачева М. (науч. ред. А. И. Боровкова) / А. Прохорова, М. Лысачева (науч. ред. А. И. Боровкова) «Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт». – 2020.
14. Рассказова В.А., Беренов Д.А. Модель объектных отношений для интеллектуального управления на основе производственных данных // Моделирование и анализ данных. 2023. Том 13. № 1. С. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2023130101>
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014662444, Российская Федерация: заявлено 29.08.2014: опубликовано 01.12.2014, / Гайнанов Д.Н., Беренов Д.А., Тихонович Д. П. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611453, Российская Федерация: заявлено 23.12.2010: опубликовано 14.02.2011 / Гайнанов Д.Н., Беренов Д.А. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.