



АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

САНДЫҚ ЕГІЗ
ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК
DIGITAL TWIN

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_120
MPHTI 06.43.01

**А.Г. Амирханова¹, М.М. Кунелбаев², Г.А. Тюлепбердинова³,
М.М. Тохтасын⁴, А. Айдынулы⁵**

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

¹Email: gulshat.aa@gmail.com

²Email: murat7508@yandex.kz

³Email: tyulepberdinova@gmail.com

⁴Email: mirastoktasyn30@gmail.com*

⁵Email: azimaidynuly1@gmail.com

**ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ О ТЕКУЩИХ ТЕНДЕНЦИЯХ
И ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**ТАМАҚ ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ САНДЫҚ ЕГІЗДЕРДІҢ
ҚАЗІРГІ ТЕНДЕНЦИЯЛАРЫ МЕН ОЗЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ ТУРАЛЫ
ӘДЕБИЕТТЕРГЕ ШОЛУ**

**A REVIEW OF LITERATURE ON CURRENT TRENDS
AND ADVANCED TECHNOLOGIES IN DIGITAL TWINS
IN THE FOOD INDUSTRY**

Аннотация. В данной работе представлен обзор литературы о текущих тенденциях передовых технологий в области цифровых двойников в пищевой промышленности. Возрастающий спрос на более свежие и качественные продукты питания подтолкнул исследователей к поиску решений в данной сфере. Помимо увеличения объемов производства, важно также повысить эффективность логистических процессов, чтобы сократить количество отходов. Оптимизированная цепочка поставок продуктов питания не только снижает конечную стоимость для потребителей, но и увеличивает доходы производителей, уменьшает воздействие на окружающую среду и позволяет поставлять более свежие и полезные продукты. Сбор и анализ данных о прослеживаемой продукции и потребностях участников процесса могут улучшить работу цепочки поставок, предоставляя ценную информацию для менеджеров. Для мониторинга продукции и анализа данных, которые помогают в принятии управленческих решений, предлагаются такие технологические решения, как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI), цифровой двойник (DT) и технология распределенного реестра (DLT). Однако интеграция этих технологий, особенно DT, интеллектуальных моделей и DLT, еще недостаточно изучена. В последние годы парадигма цифрового двойника (DT), развивающаяся в контексте Индустрии 4.0, привлекает все больше внимания со стороны как исследователей, так и профессионалов благодаря своим динамическим возможностям. Большинство исследований в этой области остаются теоретическими и сосредоточены на гипотетическом анализе, в то время как эмпирических исследований реальных случаев применения значительно меньше. Несмотря на это, DT активно используется для анализа и повышения производительности на предприятиях пищевой промышленности (FPC), хотя его влияние на бизнес-стратегии еще недостаточно изучено.

Ключевые слова: Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI), цифровой двойник

(DT) и технология распределенного реестра (DLT), Индустрия 4.0.

Аңдатпа. Бұл жұмыс тамақ өнеркәсібіндегі сандық егіздер саласындағы озық технологиялардың қазіргі тенденциялары туралы әдебиеттерге шолу жасайды. Жаңа және сапалы тағамға деген сұраныстың артуы зерттеушілерді осы салада шешімдер іздеуге итермелейді. Өндіріс көлемін ұлғайтудан басқа, қалдықтарды азайту үшін логистикалық процестердің тиімділігін арттыру маңызды. Оңтайландырылған азық-түлік жеткізу тізбегі тұтынушылардың түпкілікті құнын төмендетіп қана қоймайды, сонымен қатар өндірушілердің кірісін арттырады, қоршаған ортаға әсерді азайтады және жаңа, пайдалы өнімдерді жеткізуге мүмкіндік береді. Бақыланатын өнім деректерін жинау және талдау және процеске қатысушылардың қажеттіліктері менеджерлерге құнды ақпарат беру арқылы жеткізу тізбегінің жұмысын жақсарта алады. Басқару шешімдерін қабылдауға көмектесетін Өнімді бақылау және деректерді талдау үшін заттар интернеті (IoT), жасанды интеллект (AI), сандық қосарланған (DT) және таратылған тізілім технологиясы (DLT) сияқты технологиялық шешімдер ұсынылады. Алайда, бұл технологиялардың, әсіресе DT, ақылды модельдер мен DLT интеграциясы әлі жақсы түсінілмеген. Соңғы жылдары 4.0 индустриясы аясында дамып келе жатқан Сандық егіз парадигма (DT) өзінің динамикалық мүмкіндіктерінің арқасында зерттеушілердің де, мамандардың да назарын аударуда. Осы саладағы зерттеулердің көпшілігі теориялық болып қалады және гипотетикалық талдауға бағытталған, ал нақты қолдану жағдайлары бойынша эмпирикалық зерттеулер айтарлықтай аз. Осыған қарамастан, DT тамақ өнеркәсібі кәсіпорындарында (FPC) өнімділікті талдау және жақсарту үшін белсенді қолданылады, дегенмен оның бизнес стратегияларына әсері әлі жақсы түсінілмеген.

Түйін сөздер: Интернетті заттар (IoT), жасанды интеллект (AI), сандық егіздер (DT) және таратылған тізілім технологиясы (DLT), Индустрия 4.0.

Annotation. This paper presents a literature review on the current trends of advanced digital twin technologies in the food industry. The increasing demand for fresher and better quality food products has prompted researchers to search for solutions in this field. Apart from increasing production volumes, it is also important to improve the efficiency of logistics processes to reduce waste. An optimized food supply chain not only reduces the final cost to consumers, but also increases producer profits, reduces environmental impact and delivers fresher and healthier food. Collecting and analyzing data on traceable products and the needs of those involved in the process can improve supply chain performance, providing valuable information for managers. Technology solutions such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), digital twin (DT), and distributed ledger technology (DLT) have been proposed to monitor products and analyze data to help in management decision making. However, the integration of these technologies, especially DT, intelligent models and DLT, has not yet been sufficiently explored. In recent years, the digital twin (DT) paradigm, evolving in the context of Industry 4.0, has attracted increasing attention from both researchers and professionals due to its dynamic capabilities. Most research in this area remains theoretical and focuses on hypothetical analysis, while there are significantly fewer empirical studies of real-world application cases. Despite this, DT is actively used to analyze and improve performance in food processing companies (FPCs), although its impact on business strategies is still poorly understood.

Keywords: Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Digital Twin (DT) and Distributed Ledger Technology (DLT), Industry 4.0.

Введение. В последние годы концепция Digital Twin активно развивается в различных отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, медицинскую и производственную. Однако в пищевой промышленности ее внедрение все еще находится на ранних стадиях. Развитие цифровых двойников позволяет значительно повысить эффективность производственных процессов, минимизировать потери сырья и улучшить контроль качества продукции. В статье (Jonas, Joel & Antonio, 2023) представлен обзор использования этих технологий в логистике продуктов питания, определены ключевые требования и показано, как их можно внедрять на различных этапах логистической цепочки. Также обсуждаются исследования для выявления пробелов в существующей литературе и даны ответы на шесть исследовательских вопросов, касающихся применения и интеграции выбранных технологий с целью удовлетворения выявленных потребностей. В заключение рассмотрены возможности для дальнейших исследований в цепочке поставок свежих продуктов питания, обозначены открытые вопросы, возникающие при

интеграции этих технологий. В исследовании (Pratik et al. 2023) интегрировали технологию ДТ с реальным примером ее внедрения на предприятие FPC, решая конкретную проблему, с которой столкнулась компания. Более того, предложенная структура исследования демонстрирует ключевые этапы внедрения ДТ, включая стратегическое картирование и создание физико-виртуальной реплики, что сопровождается тщательным анализом. Полученные результаты показывают, что использование ДТ повышает доступность оборудования, эффективность распределения ресурсов, техническую производительность, работоспособность сотрудников, коэффициент использования, результативность, соотношение шагов процесса и общую пропускную способность. Реализация предложенной модели физико-виртуального интерфейса осуществляется с помощью программного обеспечения AnyLogic и программирования на базе JAVA (Howard, 2003). В статье (Vyacheslav et al., 2020) акцентируется внимание на применении цифрового двойника (ЦД) в производственной среде с использованием искусственного интеллекта (ИИ) и промышленного Интернета вещей (IIoT). В концепции производства выделяются три ключевых компонента: оборудование, персонал и процессы, данные о которых интегрируются в модель производства (ЦД) и систему поддержки принятия решений с применением ИИ. Цифровой двойник обеспечивает анализ и извлечение знаний из данных, что позволяет использовать их для улучшения управленческих решений на предприятии. Применение ИИ расширяет возможности оптимизации производственных процессов и создания новых бизнес-моделей. Ландшафт был формализован в модели для проведения глубокого анализа текущего состояния и развития с участием ЦД и других современных технологий. В статье обсуждается практическое внедрение ЦД и IIoT для стимуляции реальных производственных процессов на предприятиях. В статье (Giovanni, Giuseppe & Elleonore, 2022) рассматриваются способы повышения эффективности оборудования с помощью машинного обучения (ML), Интернета вещей (IoT) и цифрового двойника. IoT-датчики собирают данные о температуре, давлении и скорости потока, которые анализируются ML-моделями для прогнозирования отказов и планирования замены оборудования. Для исследования использовали три модели ML: множественная линейная регрессия, многослойный перцептрон и кластеризация k-средних (Kristina & Miin-Shen, 2020), что позволило продемонстрировать возможности предложенной системы. В статье (Føre et al., 2024) рассматриваются основные аспекты использования технологии цифровых двойников в умном рыболовстве и в рамках Индустрии 4.0. Цифровые двойники активно применяются для создания виртуальных моделей аквакультурных систем, автоматизации процессов и поддержки принятия решений с помощью искусственного интеллекта (ИИ) и Интернета вещей (IoT). Работа подчеркивает важность интеграции физической инфраструктуры с цифровыми моделями для точного контроля, мониторинга и анализа состояния рыбных ферм в режиме реального времени. Технология цифровых двойников доказала свою высокую эффективность в сельском хозяйстве, особенно в умном рыболовстве, где она позволяет отслеживать параметры воды, состояние здоровья рыбы, процессы кормления и другие ключевые аспекты.

На рис. 1 представлена диаграмма переходов состояний управления кормлением рыб. Статья отмечает, что цифровые двойники обладают огромным потенциалом для улучшения процессов производства и повышения доходности в аквакультуре. Тем не менее для их эффективного использования необходима интеграция с технологиями Интернета вещей и облачными вычислениями для мгновенного сбора и анализа данных. Однако основной проблемой остается отсутствие единых стандартов и протоколов для цифровых двойников.

В работе (Naomi et al., 2023) представлена виртуальная рыбоводческая ферма, которая объединяет данные в реальном времени для мониторинга и оптимизации методов ведения

сельского хозяйства. Интеллектуальное рыбоводство на основе цифровых двойников представляет собой преобразующий подход к аквакультуре, решая ключевые проблемы и одновременно способствуя устойчивости и эффективности.

На рис. 2 показана виртуальная модель для понимания и моделирования эффектов изменений состояния для продукта, процесса или среды.

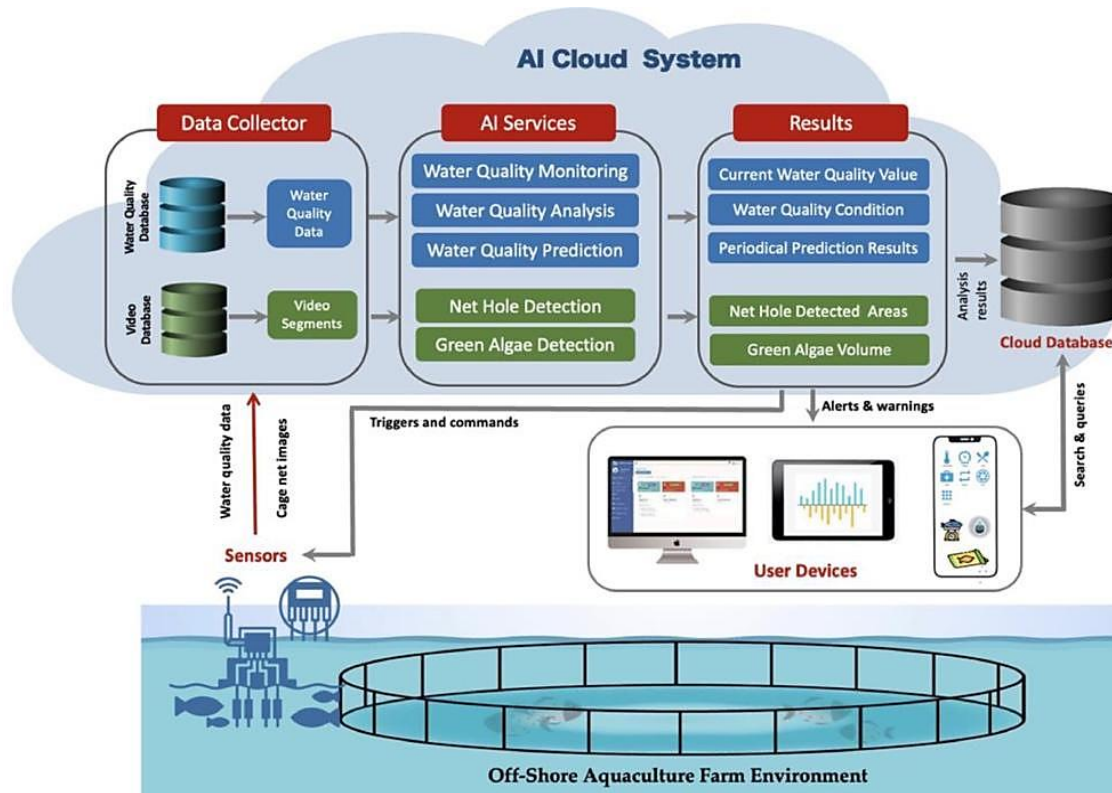


Рисунок 1. Диаграмма переходов состояний управления кормлением рыб
 Примечание – составлено автором на основе (Føre et al., 2024)

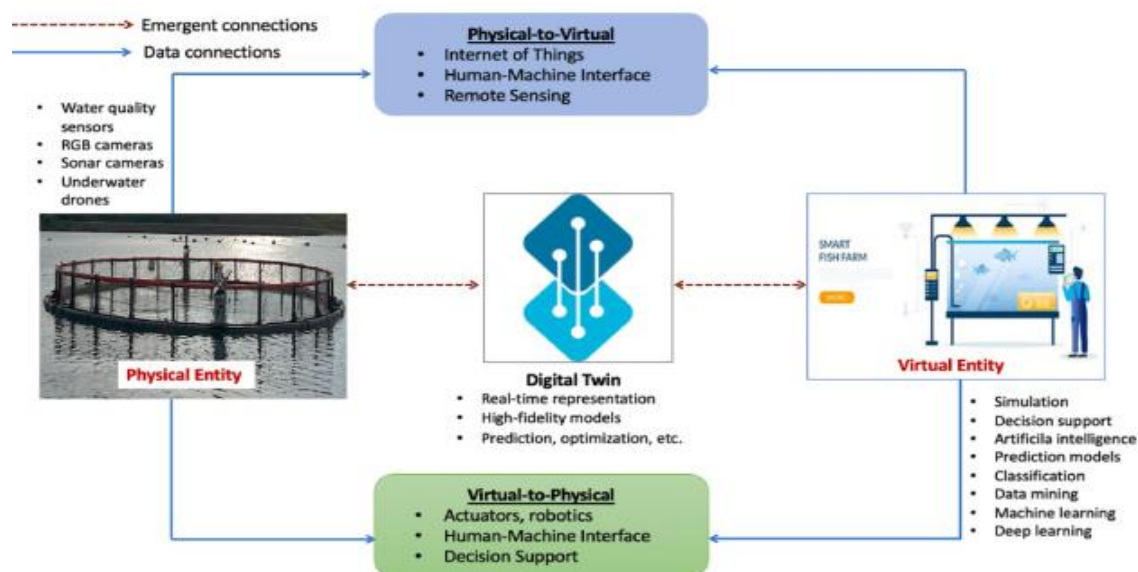


Рисунок 2. Обзор технологии цифровых двойников для аквакультуры

Примечание – составлено автором на основе (Naomi et al., 2023)

Индустрия 4.0 стала большим подспорьем в автоматизации и модернизации рыбоводства, тем самым повышая производительность и конкурентоспособность аквакультурных ферм. С индустриализацией аквакультурных ферм традиционные, дорогостоящие и трудоемкие практики с точки зрения ежедневных требований к мониторингу фермы будут сокращены или искоренены. Структура цифрового двойника, предложенная в этой работе, интегрирует данные с установленных датчиков. Кроме того, она использует имитационные модели для представления аквакультурной фермы и ее среды для поддержки фермеров, предоставляя объективное и более интеллектуальное принятие решений при управлении и мониторинге их ферм.

Используя технологии AIoT (Yang et al., 2021), фермеры могут улучшить мониторинг, оптимизировать использование ресурсов и принимать обоснованные решения, которые приведут к улучшению здоровья рыбы и прибыльности. Интеграция прогнозной аналитики и удобных интерфейсов позволит фермерам лучше разбираться в сложностях современного рыбоводства, гарантируя им возможность устойчивого удовлетворения растущего мирового спроса на морепродукты.

В статье (Alexandros et al., 2021) приведен пример моделирования технологического процесса на пивоваренном заводе.

На рис. 3 представлена концепция цифрового двойника, выдвинутая в контексте Индустрии 4.0, охватывает цифровую модель производственной модели, которая имитирует физическую систему, взаимодействует с ней и может использоваться для проектирования, мониторинга и оптимизации ее производительности. Также обсуждается применение интегрированных моделей процессов и цифровых двойников в пищевой промышленности в контексте моделирования процессов и планирования производства. Дополнительно рассматриваются проблемы моделирования, возможности и особые характеристики, которые отличают пищевую промышленность от других перерабатывающих отраслей. Потенциальные выгоды от внедрения подхода цифрового моделирования в пищевую промышленность представлены с помощью исследования крупномасштабного пивоваренного завода.

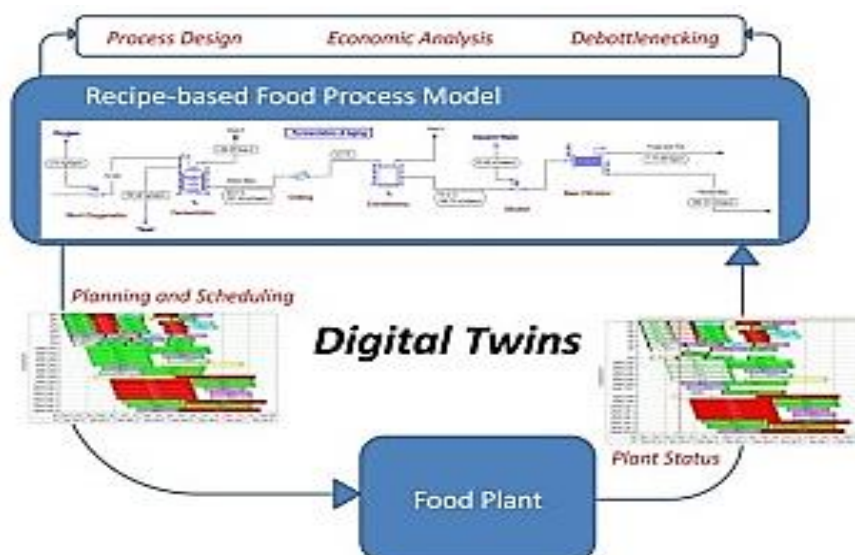


Рисунок 3. Применение моделей процессов и цифровых двойников для моделирования и планирования производства при изготовлении пива

Примечание – составлено автором на основе (Alexandros et al., 2021)

С помощью программы SuperPro Designer (Canizales et al., 2020) были созданы цифровые двойники производственных процессов. Брожение пива длится 5 дней при температуре 22 °С, в результате чего получается пиво с содержанием алкоголя 5 %; 20 % продукции разливается в кеги, остальные 80 % – в стеклянные бутылки объемом 0,5 литра. При новой модели производства, предложенной в статье, пивоварня сможет производить 39 758 000 литров пива в год по сравнению с нынешними 4 670 000 литров. Чтобы полностью использовать потенциал цифровых двойников, необходимо решить проблемы с интеграцией в физические системы и улучшить отраслевую стандартизацию. Улучшение обмена данными между физическими и цифровыми системами также имеет решающее значение для повышения точности моделей и эффективности производства.

Основная цель данной работы – проанализировать современные подходы к использованию цифровых двойников в пищевой промышленности, выявить ключевые технологические тенденции и определить возможные направления дальнейшего развития. Особое внимание уделено интеграции Digital Twin с IoT, искусственного интеллекта (AI) и блокчейн-технологий, которые обеспечивают новые возможности для прогнозирования, контроля и оптимизации производственных процессов.

Основные технологии Digital Twin в пищевой промышленности

Интернет вещей (IoT) и сенсорные технологии

Одним из ключевых компонентов цифрового двойника является система сенсоров, внедренная в производственные линии и складские комплексы. IoT-устройства обеспечивают непрерывный мониторинг параметров окружающей среды, таких как температура и влажность, а также позволяют контролировать состояние оборудования и качество продукции. Например, системы IoT для контроля температуры играют решающую роль в предотвращении порчи продуктов при хранении и транспортировке. Интеграция IoT с Digital Twin создает точные виртуальные модели производственных процессов, используя сенсорные данные для моделирования, прогнозирования и оптимизации условий хранения и работы оборудования.

Искусственный интеллект и машинное обучение

Применение искусственного интеллекта и машинного обучения значительно повышает

точность прогнозирования и уровень автоматизации в пищевой промышленности. AI-алгоритмы могут оптимизировать состав рецептур, выявлять дефекты продукции и прогнозировать износ оборудования. Например, анализ данных, поступающих от IoT-сенсоров, позволяет моделям машинного обучения оценивать вероятность отказа оборудования и предотвращать внеплановые поломки. В сочетании с Digital Twin искусственный интеллект в режиме реального времени анализирует производственные процессы и предлагает корректировки для повышения эффективности и снижения рисков простоев. Использование AI и машинного обучения позволяет значительно повысить точность прогнозирования и автоматизации процессов. В пищевой промышленности AI может применяться для оптимизации рецептур, автоматического выявления дефектов продукции, а также предиктивного обслуживания оборудования.

Блокчейн и технологии распределенного реестра (DLT)

Использование блокчейн-технологий в экосистеме Digital Twin позволяет гарантировать безопасность, прозрачность и неизменность данных на всех этапах производства и логистики. Любое изменение в цепочке поставок фиксируется в защищенной системе, что дает возможность всем заинтересованным сторонам отслеживать происхождение и качество продукции. Интеграция технологий распределенного реестра (DLT) с цифровыми двойниками предотвращает подделку данных, минимизирует вероятность ошибок и повышает уровень доверия к системе мониторинга качества продукции.

Аналитика больших данных (Big Data)

В системах Digital Twin для анализа данных и прогнозирования широко применяются алгоритмы машинного обучения. Линейная и логистическая регрессии позволяют выявлять зависимости в данных и анализировать тенденции. Для более сложных задач, таких как поиск аномалий и оптимизация процессов, используются глубокие нейронные сети (DNN). Для точного прогнозирования, например, спроса на продукцию, применяются алгоритмы градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM). В задачах кластеризации данных и выявления групп потребителей эффективны методы K-Means и DBSCAN. Если требуется анализ временных зависимостей, например, для предсказания работы оборудования, используются рекуррентные нейронные сети (LSTM, GRU). Эти алгоритмы делают Digital Twin более точным и адаптивным, что особенно важно для промышленного прогнозирования, управления производственными процессами и оптимизации ресурсов.

Применение цифровых двойников в логистике и цепях поставок

Цифровые двойники (Digital Twin) активно применяются в логистике для оптимизации маршрутов поставок, учитывая дорожные условия и погоду. Они помогают предотвращать порчу товаров, контролируя температуру и условия хранения при транспортировке. Кроме того, системы автоматически уведомляют поставщиков о задержках или изменениях в цепочке поставок, что снижает риски сбоев. Крупные ритейлеры, такие как Walmart и Carrefour, уже используют Digital Twin для сокращения издержек и минимизации потерь продукции. Интеграция с искусственным интеллектом (AI) и анализом больших данных (Big Data) позволяет прогнозировать изменения спроса и оперативно адаптировать логистические процессы, обеспечивая бесперебойные поставки товаров.

Результаты

В данном исследовании представлена новая расширенная модель цифрового двойника в режиме реального времени, отличающаяся большей реалистичностью, интерактивностью и функциональностью от традиционных имитационных моделей производства. В ее основе будет лежать концепция бесшовной интеграции: система включает подсистемы имитационного моделирования, оптимизационный модуль, базу

данных, подсистему интеллектуального анализа данных и другие компоненты, ключевой особенностью которых является обновление исходных данных и параметров, влияющих на производственные процессы. Основные отличия от существующих решений заключаются в следующем. Имитационная подсистема предназначена для расчета множества характеристик предприятия в условиях различных сценариев. Модуль оптимизации, интегрированный с имитационными моделями, позволяет разрабатывать оптимальные управленческие решения в рамках заданных ограничений. Система хранения данных, представляющая собой базу данных, собирает и обрабатывает актуальную информацию о предприятии, предоставляет входные данные для имитационного моделирования и сохраняет результаты моделирования. Подсистема интеллектуального анализа данных (Data Mining) выполняет анализ взаимосвязей между ключевыми характеристиками информационной модели предприятия, обновляет влияющие факторы и сохраняет результаты анализа. Подсистема визуализации и управления, связанная с имитационными моделями через API или веб-сервисы, обеспечивает доступ к различным функциям моделирования.

Подобный бесшовный подход обеспечивает непрерывную актуализацию имеющихся взаимозависимостей в имитационных моделях предприятия, при этом будут использованы различные методы имитационного моделирования, методы системной динамики, агентного и дискретно-событийного моделирования.

Основная гипотеза этого проекта заключается в том, что можно найти наиболее экономически выгодные методы цифровой трансформации предприятия и создания цифрового двойника для его практического применения. Это должно повысить операционную эффективность и уменьшить время простоя на производственных линиях в пищевой промышленности благодаря мониторингу данных в реальном времени и прогнозному управлению, что позволит своевременно предотвращать или минимизировать возможные операционные сбои.

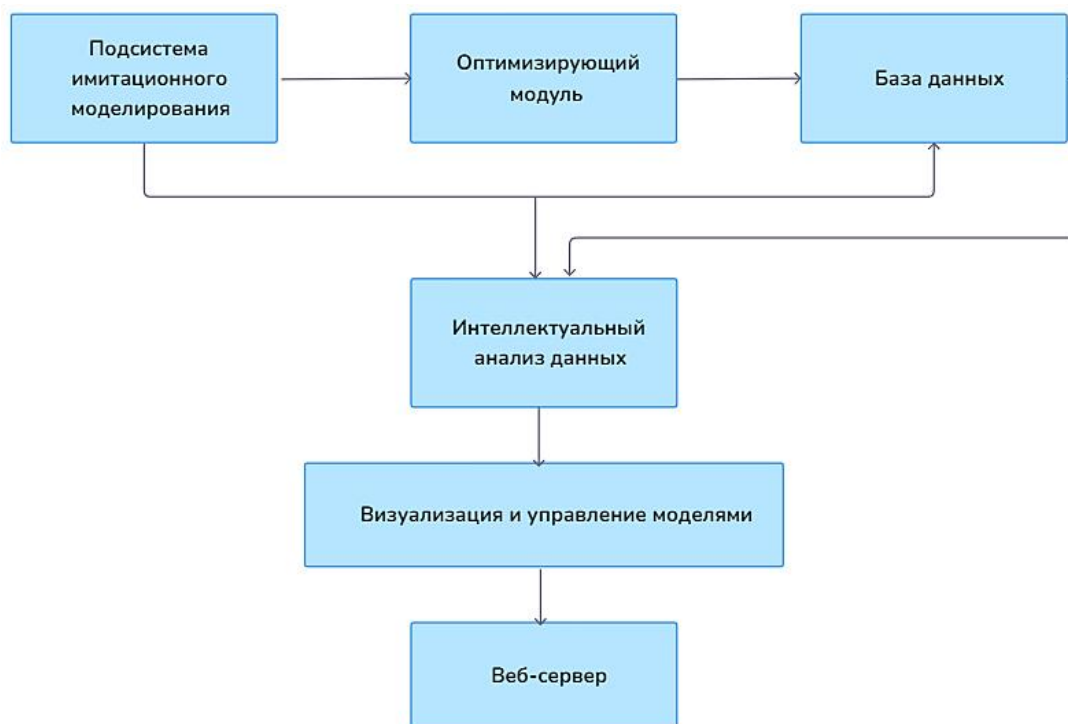


Рисунок 4. Архитектура системы по технологиям

Примечание – составлено авторами

Анализируя реальные данные с физических устройств, цифровой двойник может предвидеть поведение системы, основываясь на методах машинного обучения. Специально подобранная технология расширяет возможности выявлять паттерны, аномалии, в том числе проектирование с применением технологий CAD/CAM (Alghazzawi, 2016) поможет создать цифровую копию объекта. Использование технологии IIoT позволяет организовать передачу данных между реальными и цифровыми реальностями. С помощью алгоритмов и методов машинного обучения цифровой двойник ищет закономерность событий, на анализе данных дает рекомендации по оптимизации и прогнозирует будущие события для предприятий. На данном этапе собрана только цифровая тень, которая работает только в одностороннем порядке. Чтобы разработать полноценный продукт – цифровой двойник, система должна работать с обратной связью. Цифровой двойник может реагировать на физический объект исходя из своих прогнозов, управляя промышленными устройствами с помощью программируемого логического контроллера. Таким образом, цель разработки цифрового двойника – эффективное управление ресурсом, прогнозирование аномалий, оптимизация бережливого производства.

Переход от **цифровой тени** к полноценному **цифровому двойнику** осуществляется в несколько этапов. На начальном этапе собираются данные с оборудования без обратного влияния на процессы. Затем интеграция с предиктивной аналитикой и ХАИ позволяет обнаруживать аномалии и прогнозировать возможные сбои. На финальном этапе цифровой двойник становится активным инструментом управления, корректируя процессы в режиме реального времени. Для успешной реализации требуется **интеграция IoT, AI, Big Data и облачных технологий**, что повышает **точность прогнозов, снижает затраты и минимизирует риски**.

Заключение

Предложенная модель **Digital Twin** обладает рядом ключевых преимуществ, которые делают ее эффективным инструментом для трансформации пищевой промышленности. Внедрение цифровых двойников позволяет **существенно улучшить контроль качества продукции** за счет мониторинга параметров производства в реальном времени, что минимизирует количество брака и отходов. **Оптимизация логистики** достигается путем моделирования цепочек поставок и прогнозирования спроса, что ведет к снижению затрат на транспортировку и потери продукции. Использование **AI-алгоритмов и IoT-сенсоров** позволяет внедрять **предиктивное обслуживание оборудования**, прогнозируя возможные поломки и снижая эксплуатационные расходы. **Энергоэффективность производства** повышается благодаря точному мониторингу потребления энергии и оптимизации технологических процессов, что сокращает затраты и снижает углеродный след. **Использование блокчейн-технологий** делает цепочки поставок прозрачными, повышает безопасность данных и предотвращает возможность подделки информации. В перспективе **ключевые направления исследований** включают разработку **облачных Digital Twin-платформ**, доступных для малого и среднего бизнеса, усовершенствование **AI-алгоритмов для точного прогнозирования дефектов** и создание **универсальных стандартов интеграции Digital Twin** с технологиями IoT, DLT и Big Data для более эффективного управления цифровыми моделями в пищевой промышленности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и

высшего образования Республики Казахстан в рамках научного проекта BR24992975 «Разработка цифрового двойника предприятия пищевой промышленности с применением искусственного интеллекта и технологий ИИТ».

«Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи». «При подготовке данной работы автор(ы) использовали [ChatGPT, ClaudeAI] с целью [языковая обработка данных, ускорение обработки текстов, повышение скорости обзора литературы].

Список литературы

- Jonas L.V., Joel J.P.C. R., Antonio M.A. (2023). Convergence of Distributed Ledger Technologies with Digital Twins, IoT, and AI for fresh food logistics: Challenges and opportunities. *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 31, 100393, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jii.2022.100393>.
- Pratik M., Sachin K., Amine B., Venkatesh M., Ashok P. (2023). Digital twin implementation for performance improvement in process industries - A case study of food processing company. *International Journal of Production Research*. vol. 61, no. 8343-8365, <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2022.2104181>.
- Howard A. (2003). *Data Acquisition Techniques Using PCs*. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-068377-2.X5000-1>.
- Vyacheslav K., Oleg I., Olga M., Sergii S. (2020). Combination of Digital Twin and Artificial Intelligence in Manufacturing Using Industrial IoT. 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125038>.
- Giovanni P.T., Giuseppe V., Eleonore B. (2022). Integration of Digital Twin, Machine-Learning and Industry 4.0 Tools for Anomaly Detection: An Application to a Food Plant. *Sensors*, vol. 22, no. 4143, <http://dx.doi.org/10.3390/s22114143>.
- Kristina P. S., Miin-Shen Y. (2020). Unsupervised K-Means Clustering Algorithm. 2020 IEEE Access, Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 8. no. 80716–80727, <https://doi.org/10.1109/access.2020.2988796>.
- Føre, M., Alver, M.O., Alfredsen, J.A., Rasheed, A., Hukkelås, T., Bjelland, H.V., Su, B., Ohrem, S.J., Kelasidi, E., Norton, T., & Papandroulakis, N. (2024). Digital Twins in intensive aquaculture — Challenges, opportunities and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 218, no. 108676, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108676>.
- Naomi A.U., Hsun-Yu L., Shyi-Chyi C., Chin-Chun C., Shih-Syun L., Kai-Xiang Z., Hoang-Yang L., Chih-Yung C., Yi-Zeng H. (2023). Digital twin-based intelligent fish farming with Artificial Intelligence Internet of Things (AIoT). *Smart Agricultural Technology*, vol. 5, no. 100285, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atech.2023.100285>.
- Yang, C.-T., Chen, H.-W., Chang, E.-J., Kristiani, E., Nguyen, K. L. P., & Chang, J.-S. (2021). Current advances and future challenges of AIoT applications in particulate matters (PM) monitoring and control. *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier BV. vol. 419. no. 126442. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126442>.
- Alexandros K., Nikiforos M., Demetri P. (2021). Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products. *Food and Bioprocess Technology* vol. 126, no. 317–333, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.01.016>.
- Canizales, L., Rojas, F., Pizarro, C. A., Caicedo-Ortega, Nelson. H., & Villegas-Torres, M. F. (2020). SuperPro Designer®, User-Oriented Software Used for Analyzing the Techno-Economic Feasibility of Electrical Energy Generation from Sugarcane Vinasse in Colombia. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr8091180>.
- Alghazzawi, T.F. (2016). Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *Journal of Prosthodontic Research*, vol. 60, issue 2, no. 72–84, <https://doi.org/10.1016/j.jpjor.2016.01.003>.

Information about authors

Amirkhanova Gulshat – PhD, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: gulshat.aa@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3933-5476, +7 707 636 8078

Kunelbayev Murat – PhD, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail:

murat7508@yandex.kz, ORCID: 0000-0002-5648-4476, +7 707 829 6748

Tyulepberdinova Gulnur – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: tyulepberdinova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4322-8983, +7 701 364 5158

Tokhtasyn Miras – Bachelor, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: mirastokhtasyn30@gmail.com, ORCID: 0009-0003-8682-8262, +7 776 278 53 24

Aidynuly Azim – Bachelor, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: azimaidynuly1@gmail.com, ORCID: 0009-0000-0176-5919, +7 777 427 46 45
