

УДК 004.942
DOI

УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

¹Маслова К.С., ²Фомин В.А.

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, e-mail: maslowaksusha1@yandex.ru;

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Смоленский филиал, Смоленск

Проблема повышения эффективности системы управления сложными техническими объектами на промышленных предприятиях становится особенно актуальной в контексте цифровизации и интеграции технологий искусственного интеллекта в технологический процесс. Разработка интеллектуальных моделей цифровых двойников, позволяющих создать цифровые копии объектов для выявления возможных проблем и принятия превентивных мер, динамично развивается как перспективное направление. Целью данной работы является исследование возможностей управления сложными техническими объектами с применением интеллектуальных цифровых двойников на промышленных предприятиях для оптимизации технологических процессов. При моделировании технологического процесса использовались результаты теоретического анализа современных научно-технических исследований. В рамках исследования разработана технологическая схема производственного процесса, описана актуальность ее модернизации, представлена разработанная структура внедрения в управление комплексами оборудования интеллектуальных цифровых двойников. Предложены инструменты для оптимизации процесса и проведен анализ возможных проблем при внедрении технологии. Интеллектуальные цифровые двойники позволяют прогнозировать динамику производственных условий и оптимизировать параметры процессов, что позволит повысить эффективность управления сложными техническими объектами на промышленных предприятиях. Представленные результаты исследования практически применимы в рамках оптимизации предприятий нефтеперерабатывающей отрасли и внедрение в совершенствование системы автоматического управления техническими объектами интеллектуальных цифровых двойников.

Ключевые слова: цифровые двойники, искусственный интеллект, сложные технические объекты, производство, оптимизация

MANAGEMENT OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS IN PRODUCTION PROCESSES USING INTELLIGENT DIGITAL TWINS

¹Maslova K.S., ²Fomin V.A.

¹National Research University MPEI, Moscow, e-mail: maslowaksusha1@yandex.ru;

²National Research University MPEI, Smolensk branch, Smolensk

The problem of increasing the efficiency of the management of complex technical systems in industrial enterprises has become especially relevant in light of digitalization and integration of artificial intelligence into the production process. The development of intelligent digital twin models that allow for the creation of digital copies of objects in order to identify potential problems and take preventative measures is a rapidly developing area. The aim of this study is to explore the potential of using intelligent digital twins to manage complex systems in industry in order to optimize production processes. The findings from a theoretical analysis of current scientific and technological research were used to model the production process. As part of the research, a technological scheme for the production process was developed, the relevance of modernization was described, and a developed structure for introducing intelligent digital twins to the management of equipment complexes was presented. Tools were proposed for optimizing the process and an analysis was carried out of possible problems with the implementation of the technology. Intelligent digital twins allow you to predict the dynamics of production conditions and optimize process parameters, which will increase the efficiency of managing complex technical facilities at industrial enterprises. The results of the presented research are practically applicable in optimizing oil refining enterprises and introducing intelligent digital twin technologies into the automatic control systems for technical equipment.

Keywords: digital twins, artificial intelligence, complex technical facilities, production, optimization

Введение

В настоящее время отмечается положительная динамика в оптимизации и автоматизации производственных процессов промышленных предприятий. Разрабатываются и регулярно совершенствуются концепции систем управления сложными техническими объектами – комплексами технологического оборудования, необхо-

димыми для реализации производственного цикла и повышения его эффективности, для сокращения потерь ресурсов [1–3].

Перспективы сохранения и повышения конкурентоспособности в рамках активного технологического развития обуславливают актуальность внедрения систем интеллектуального управления для предупреждения возможных проблем, аварий и обеспечения

бесперебойного функционирования производственной инфраструктуры.

Цель исследования – разработка путей внедрения интеллектуальных цифровых двойников в управление сложными техническими объектами промышленного предприятия для оптимизации технологических процессов и повышения экономической эффективности производства.

Материалы и методы исследования

Проведено моделирование технологического процесса на основе результатов анализа информации, составляющей теоретическую основу исследования, для совершенствования системы управления сложными техническими объектами на промышленных предприятиях. Исследование проведено в виде теоретико-прикладного анализа актуальных подходов в области интеграции систем искусственного интеллекта в управление производственными предприятиями. Определение ключевых особенностей технологического процесса и выявление факторов, оказывающих прямое влияние на его параметры, выполнено в ходе проведения обзора современных научно-технических исследований в области управления комплексами технологического оборудования нефтеперерабатывающих предприятий.

Результаты исследования и их обсуждение

Для конкретизации задачи совершенствования системы управления процессами нефтеперерабатывающих предприятий, рассмотрим процесс селективной очистки масляных фракций, который является одним из ведущих в нефтеперерабатывающей промышленности и необходим при производстве трансмиссионных жидкостей, гидравлических составов и смазочных масел. Основная цель процесса – повышение качества конечных продуктов, что характеризуется снижением коксуемости и повышением вязкости, посредством удаления из масляной фракции сернистых соединений, смол, полициклических ароматических углеводородов. Удаление соединений необходимо, поскольку они дестабилизируют готовые масла в отношении окислительных реакций, что вызывает потемнение в процессе эксплуатации и влияет на параметры вязкости и температуры [4].

Процесс получения базовых масел селективной очисткой масляной фракции представлен на разработанной технологической схеме (рис. 1).

Технологическая схема описывает основные этапы производства с учетом требуемых температурных и временных пара-

метров. Основными операциями процесса являются абсорбция, экстракция, нагрев, испарение. Сырьем является масляная фракция, после нагрева она подается в абсорбер, где под воздействием паров азеотропной смеси абсорбируются пары фенола. Затем сырье направляется в экстракционную колонну, где происходит капельно-жидкостное разделение на экстрактную и рафинатную фракции.

Обобщенная схема процесса может быть описана следующими операциями: нагрев сырья, смешение с растворителем, разделение фаз, дальнейшая регенерация растворителя.

Чистота продукта технологического процесса, базового масла, является важнейшим параметром, определяющим особенности функционирования механизмов, в которых оно используется [5].

Повышение актуальности модернизации процесса очистки масляной фракции обуславливается растущими требованиями к показателям энергоэффективности и экологичности процесса. В ходе эксплуатации установок очистки важно учитывать параметры автоматической регулировки процесса. Стандартные PID-регуляторы и статические алгоритмы все менее эффективны, так как требуют достаточно длинного периода адаптации в зависимости от различного качества исходного сырья [6]. При различном содержании какого-либо компонента в исходном сырье, что является нормой для нефтеперерабатывающего предприятия, такая система управления требует ручной перенастройки, что снижает общую экономическую эффективность процесса, так как увеличивает риск технологических потерь, как материальных, так и временных. Наличие температурных изменений (в том числе незначительные отклонения в 2–3 °C) снижает эффективность очистки на 10–12 %, а часть дорогостоящих компонентов излишне расходуется вследствие запаздывания корректировочных действий оператора установки.

Одним из возможных решений задачи минимизации потребления ресурсов и оптимизации системы управления сложными техническими объектами является внедрение в производственный процесс цифровых двойников (Digital Twin, DT), основанных на технологии искусственного интеллекта (Artificial Intelligence, AI) и машинного обучения (Machine Learning, ML). Технология цифровых двойников объединяет возможности AI, ML и программный анализ с данными, поступающими в режиме реального времени в условиях неопределенности для создания цифровой имитационной модели процесса, которая изменяется вместе с ее физическим аналогом [7, 8].

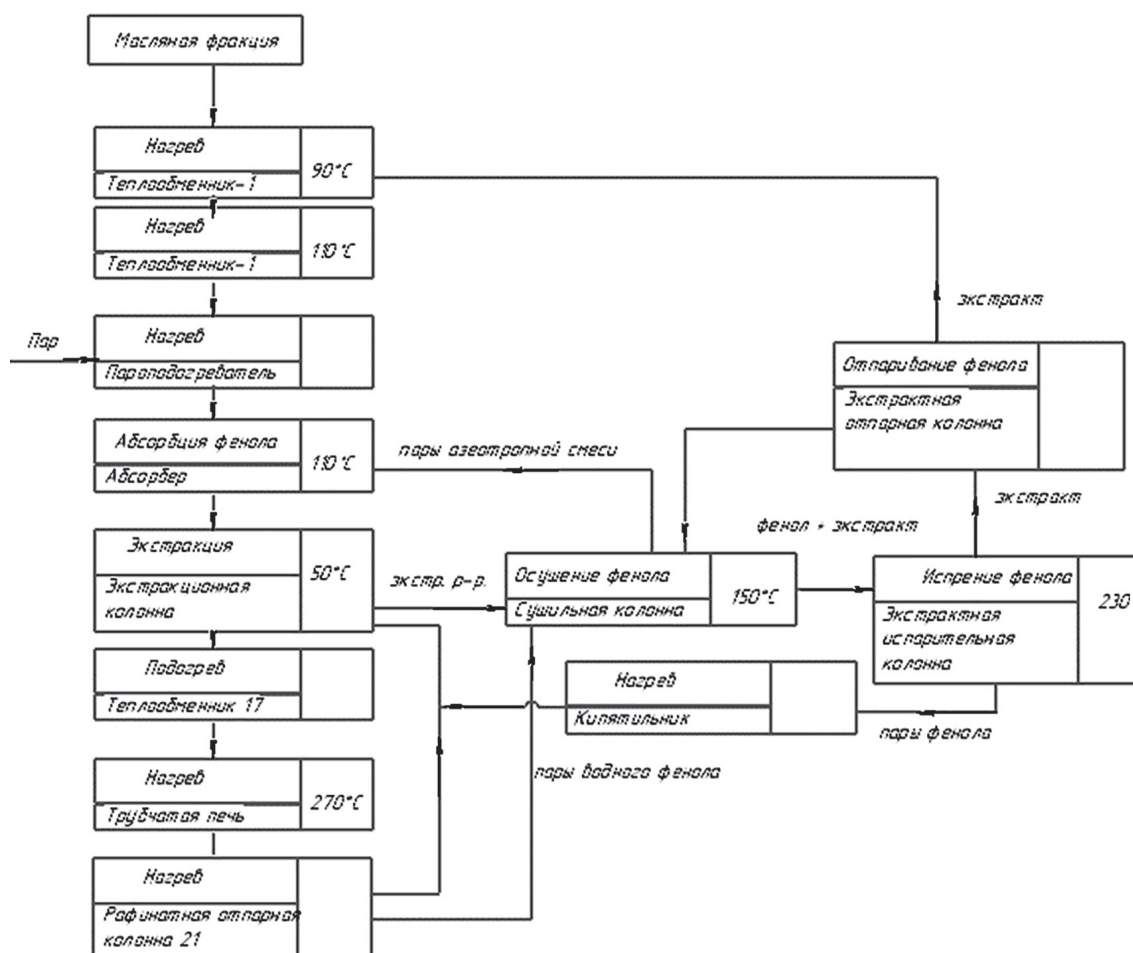


Рис. 1. Технологическая схема процесса селективной очистки масляной фракции
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Цифровые двойники находят широкое применение в производственной деятельности [9], создаваемые виртуальные модели предприятий позволяют агрегировать данные, симулировать поведение физических систем, прогнозировать сценарии развития производственных ситуаций и силу их влияния на производительность и эффективность работы предприятия.

В рамках нефтеперерабатывающих производств ДТ могут использоваться для контроля состояния комплексов оборудования и технологических режимов, своевременного превентивного технического обслуживания, анализа данных в режиме реального времени, что позволяет распознавать возможные угрозы и потенциальные проблемы в процессах. Внедрение ДТ позволит снизить энергопотребление за счет оптимизации нагревающих и регенерационных циклов, на основе данных о температуре, давлении, плотности и соотношении компонентов состава в режиме реального времени модель сможет спрогнозировать

изменение динамики происходящего процесса и определить наиболее оптимальные параметры процесса в зависимости от различных свойств и состава сырья.

Для разработки практически применимого ДТ необходимо организовать сбор и обработку большого количества мультимодальной информации [10, 11], в том числе сигналов, поступающих от оборудования. От выбора метода и инструментов моделирования зависит точность представления физической системы. Математические, физические модели, построенные на основе уравнений, могут быть полезны в некоторых случаях, но за счет трудоемкости ручных вычислений снижают скорость принятия решений. Прогнозирование изменения параметров процесса и адаптация могут быть достигнуты при использовании комбинации IoT-устройств (многоточечных датчиков температуры, давления, спектрального ИК-диапазона для распознавания состава сырья), машинного обучения и применения нейросетевых моделей.

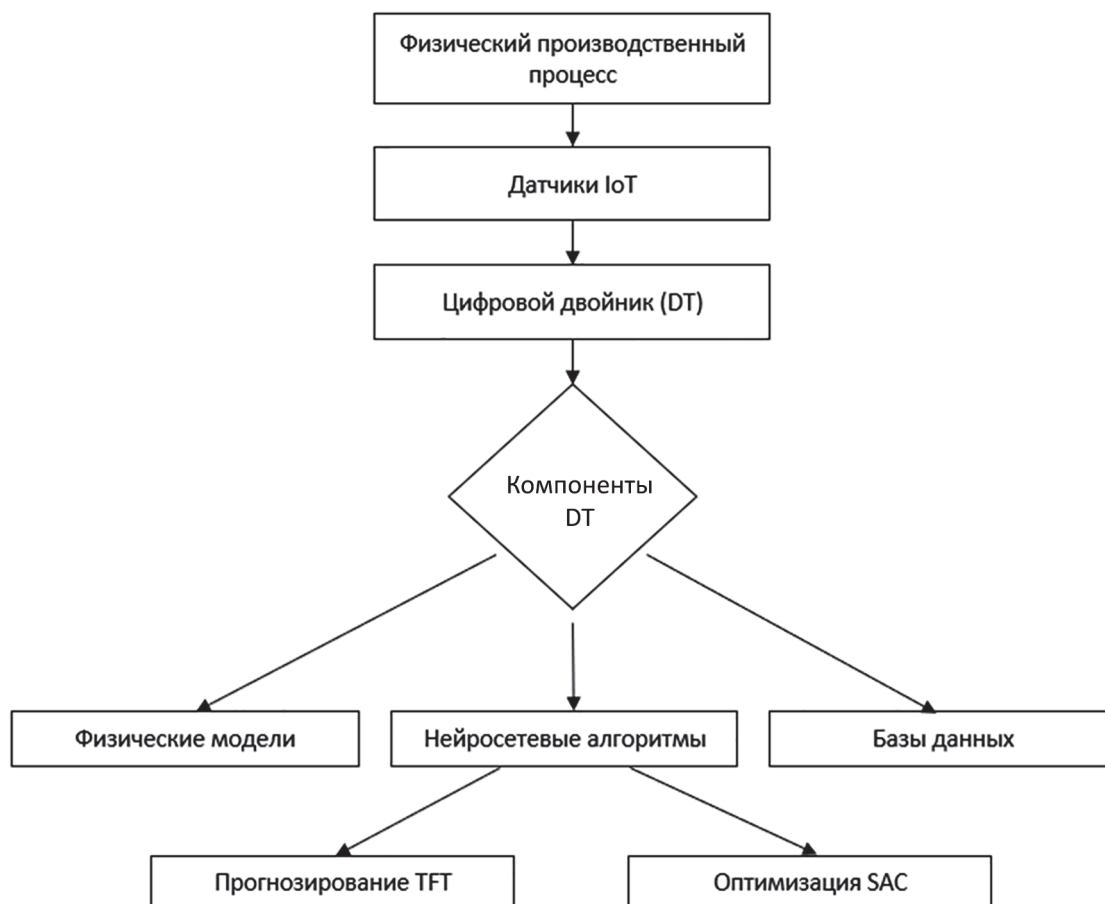


Рис. 2. Структура внедрения цифровых двойников в производственный процесс
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Технология DT представляет собой динамичную систему принятия решений [12], которая способна быстро анализировать данные. Интеллектуальную функцию DT обеспечивает внедрение в архитектуру нейросетевого блока (рис. 2).

Данное решение в отличие от DT, построенных на основе уравнений массопереноса, более адаптивно к изменениям. Применение искусственных нейронных сетей – критически важный элемент, делающий цифровой двойник интеллектуальным, позволяет повысить точность прогнозов за счет обучения на новых данных и практическую применимость модели.

Нейросетевые алгоритмы позволяют производить прогнозирование в условиях неопределенности [13, 14], LSTM и Temporal Fusion Transformers (TFT) способны обработать многомерные временные ряды при учете шумов (непостоянство состава сырья, погрешности изменений датчиков).

При рассмотрении конкретных инструментов для каждого этапа оптимизации процесса, остановимся на выборе нейро-

сетевых технологий для определения изменения процентного соотношения смеси из сырья и растворителя. Данный этап производственного процесса важен с технологической, экономической и экологической точки зрения. Моделирование динамики изменения вязкости, одного из параметров, по которому определяется состав смеси, возможно при использовании рекуррентных нейронных сетей [15]. При получении данных о росте содержания ароматических углеводородов система примет решение об изменении количества подаваемого в аппарат растворителя для стабилизации качества продукта на выходе.

При моделировании общей динамики прохождения процесса, например на базе LSTM-сетей, могут быть заранее спрогнозированы возможные аномалии, которых удастся избежать благодаря своевременному внедрению в процесс ингибитора.

К основным проблемам внедрения цифровых двойников можно отнести ограниченное количество данных для обучения моделей. Производственные условия – это

открытая система, воздействие на которую оказывает большое количество внешних, часто неопределенных факторов, некоторые технические данные имеют пропущенные фрагменты. Частично решить эту проблему можно при обучении моделей на данных, синтезируемых генеративно-сопоставительными сетями. Также к рискам внедрения можно отнести возможное повышение атак на промышленные сети, что актуализирует вопрос кибербезопасности.

Наиболее перспективным направлением исследований является разработка цифровых двойников сложных технических систем на основе математической модели Partially Observable Markov Decision Process (POMDP), используемой обычно для принятия решений в ситуациях, когда агент не наблюдает полное состояние системы, а концентрируется на тех изменениях, которые зависят от состояния, и модели глубокого обучения для прогнозирования временных рядов типа Temporal Fusion Transformers, которая способна замечать сложные взаимосвязи для поиска зависимостей, в том числе нелинейных, может работать с множествами временных рядов, прогнозировать весь необходимый горизонт и проводить анализ влияния различных факторов на итог прогнозирования.

Заключение

В современной парадигме стремительного научно-технического развития для повышения конкурентоспособности важно регулярно оптимизировать системы управления сложными техническими объектами и принимать стратегические решения с учетом прогнозов развития отрасли и технологической повестки. В ходе исследования определены пути повышения эффективности промышленных предприятий нефтеперерабатывающей промышленности внедрением в производственный процесс технологий интеллектуальных цифровых двойников. Представленные результаты исследования могут иметь практическое применение в рамках оптимизации предприятий нефтеперерабатывающих отраслей и совершенствования систем автоматического управления техническими объектами для повышения экономической эффективности и качества итогового продукта.

Список литературы

- Куликова М.Г., Кончина Л.В. Моделирование технологического оборудования в пищевой промышленности // Естественные и технические науки. 2017. № 5 (107). С. 126–127. EDN: YTWOEV.
- Абрамов В.И., Абрамов И.В., Поливанов К.В., Семенов К.Ю. Концептуальная модель цифровой системы аналитической поддержки дистанционного управления

персоналом организации // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13. № 7. С. 2341–2352. DOI: 10.18334/errp.13.7.118326. EDN: GWCEGE.

- Fedulov A.S., Lazarev A.I. Organization of Secure Data Routing in Electric Power Complexes Using Ontological and Deep Models // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. 2024. Vol. 34/ No. 3. P. 485–491. DOI: 10.1134/S105466182470024X. EDN: DFBZS.

- Беляков М.В., Куликова М.Г., Анодина О.Д., Рысина Е.И. Определение информативных спектральных диапазонов для разработки системы контроля трансформаторного масла с использованием нейронных сетей глубокого обучения // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 2 (98). С. 20–30. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-20-30. EDN: EDRQZN.

- Андреев А.А., Апатенко А.С., Гусев С.С. Очистка нефтяных масел от механических загрязнений // Естественные и технические науки. 2021. № 7 (158). С. 243–251. EDN: NRXGVT.

- Maslova K.S., Ermakov M.A., Grishin U.N., Smirnov D.M. The possibilities of using artificial intelligence technologies to optimize the stability of electric power systems in industrial enterprises // Natural and Technical Sciences. 2023. No. 8 (183). P. 118–120. EDN: ZACYBQ.

- Столяров А.Д., Гордеев В.В., Абрамов В.И. Цифровые двойники в управлении: отраслевая специфика и практические аспекты создания // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 7. С. 48–54. DOI: 10.17513/snt.40084. EDN: MRCDHV.

- Tyutyunnik A., Lazarev A. Intelligent System for Preventing Rubber Ducky Attacks Using Deep Learning Neural Networks // Proceedings – 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021 (Sochi, 05–11 сентября 2021 г.). Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 497–502. DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537497. EDN: RLTHDV.

- Barbieri G., Bertuzzi A., Capriotti A., Ragazzini L., Gutierrez D., Negri E., Fumagalli L. A virtual commissioning based methodology to integrate digital twins into manufacturing systems // Production Engineering. 2021. Vol. 15, Is. 3. P. 397–412. DOI: 10.1007/s11740-021-01037-3. EDN: QJJBIM.

- Маслова К.С., Палагнюк Ю.А. Перспективы применения цифровых двойников в процессе испытания опытных образцов с учетом особенностей ракетно-космической отрасли // Естественные и технические науки. 2021. № 4 (155). С. 234–235. EDN: BXFYAX.

- Bambura R., Šolc M., Dado M., Kotek L. Implementation of Digital Twin for Engine Block Manufacturing Processes // Applied Sciences (Switzerland). 2020. Vol. 10, Is. 18. P. 6578. DOI: 10.3390/app10186578. EDN: GGLFMU.

- Столяров А.Д., Гордеев В.В., Абрамов В.И. Методика поиска многокритериальных решений на основе цифровых двойников // Экономика и управление. 2023. Т. 29, № 7. С. 851–858. DOI: 10.35854/1998-1627-2023-7-851-858. EDN: BWERQI.

- Хазиахметова Г.А., Мубаракшина Д.Н., Ахмадеева Л.Р. Использование технологий искусственного интеллекта для оптимизации процессов управления в производственных системах // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 2. С. 82–87. DOI: 10.17513/snt.40307. EDN: WCMCLT.

- Борисов В.В. Нечеткие и нейро-нечеткие когнитивные темпоральные модели для мониторинга и прогнозирования состояния систем и проблемных ситуаций // Нейрокомпьютеры и их применение: тезисы докладов XX Всероссийской научной конференции (Москва, 22 марта 2022 г.). М.: Московский государственный психолого-педагогический университет, 2022. С. 13–Б. EDN: EKNSEL.

- Dli M.I., Sinyavsky Yu.V., Rysina E.I., Vasilkova M.A. A method for classifying mixing devices using deep neural networks with an expanded receptive field // Journal of Applied Informatics. 2022. Vol. 17, Is. 5 (101). P. 51–61. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-5-51-61. EDN: EQGDTO.