

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Ваняйкин И.К., Отлягузов Д.С.

Невиницын Владимир Юрьевич, Грименицкий Павел Николаевич, Ваняйкин Илья Константинович, Отлягузов Демид Сергеевич
Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.
E-mail: nevinitsyn@isuct.ru, grim@isuct.ru, vanyaykin_ik@isuct.ru, demid0139@gmail.com

В статье приведены основные понятия цифровых двойников, показана актуальность их разработки, сферы и перспективы их применения. В качестве примера в работе рассмотрен аппарат смешения, являющийся важным звеном в технологической схеме химического производства. Такие аппараты применяются на стадии подготовки сырья и предназначены для получения смеси заданной концентрации и температуры. Разработана математическая модель объекта и рассмотрен пример создания его цифрового двойника в MATLAB Simulink. Описана методика интеграции цифровой модели в симулятор системы управления (учебный тренажер) на базе программируемого контроллера и графической панели оператора. Приведен пример программы контроллера на графическом языке программирования FBD. Разработан интерфейс пользователя, обеспечивающий взаимодействие оператора с цифровым двойником. Описана методика интеграции цифрового двойника и промышленного контроллера посредством применения технологии OPC и библиотеки OPC Toolbox.

Ключевые слова: цифровой двойник, математическая модель, четвертая промышленная революция, автоматизация, проектирование, моделирование, симулятор, OPC-сервер

DIGITAL TWINS DESIGN OF TYPICAL TECHNOLOGICAL PROCESSES

Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Vanyaykin I.K., Otlyaguzov D.S.

Nevinitsyn Vladimir Yur'evich, Grimenitsky Pavel Nikolayevich, Vanyaykin Ilya Konstantinovich, Otlyaguzov Demid Sergeyevich
Ivanovo State University of Chemical Technology,
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.
E-mail: nevinitsyn@isuct.ru, grim@isuct.ru, vanyaykin_ik@isuct.ru, demid0139@gmail.com

The paper deals with the basic concepts of digital twins, shows the relevance of their engineering, areas and prospects of their application. As an example, the paper considers a mixing apparatus, which is an important unit in the technological scheme of chemical production. Such apparatuses are used at the stage of raw material preparation and are designed to obtain a mixture of a given concentration and temperature. A mathematical model of the object is developed and an example of its digital twin design in MATLAB Simulink is considered. The methodology of integration of the digital model into the control system simulator (training simulator) based on the programmable controller and graphical operator panel is described. An example of the controller program in the graphical programming language FBD is given. A user interface providing operator interaction with the digital twin is developed. The method of integration of the digital twin and industrial controller through the use of OPC technology and OPC Toolbox library is described.

Keywords: digital twin, mathematical model, fourth industrial revolution, automation, design, simulation, simulator, OPC server

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Современные тенденции в развитии промышленности требуют решения множества задач,

связанных как с созданием новых высокотехнологичных методов переработки сырья, так и с улучшением эффективности существующих технологических процессов.

Индустрия автоматизации уже давно осознала потенциальные преимущества использования виртуальных моделей для имитации работы физических систем. Однако для того, чтобы виртуальная модель предприятия была успешной, она должна точно отражать рассматриваемую систему [1-4].

В современном мире виртуальные вычислительные среды все глубже интегрируются в реальные процессы и системы. В развитых странах, включая Россию, активно развивается направление «цифровизации промышленных комплексов» с применением таких технологий, как «большие данные», «цифровой двойник» и взаимодействие с виртуальной и дополненной реальностью. Цифровые двойники становятся ключевым элементом четвертой промышленной революции [5-7].

Цифровой двойник (ЦД) – это цифровое представление уникального продукта (реального устройства, объекта, машины, услуги или нематериального актива) или уникальной системы «продукт-услуга» (системы, состоящей из продукта и связанной с ним услуги), которое включает в себя выбранные характеристики, свойства, состояния и поведение с помощью моделей, информации и данных на одном или даже нескольких этапах жизненного цикла [6-8].

В рамках работы рассматривается процесс создания цифрового двойника на примере технологического процесса смешения компонентов. Такие процессы широко используются в различных отраслях химической промышленности на стадии подготовки сырья и предназначены для получения смеси заданной концентрации или температуры. Такую цифровую модель можно использовать при проектировании химико-технологических систем для расчета оптимальных характеристик оборудования и узлов химических предприятий, на этапе проектирования АСУТП

для тестирования и отладки алгоритмов управления программируемых контроллеров, на этапе эксплуатации производства в задачах прогнозирования, а также для создания учебных тренажеров операторов технологических процессов [9].

В различных научных работах подчеркивается значимость и практическая ценность разработки цифровых двойников [1-11]. В своих трудах авторы описывают способы использования и интеграции цифровых двойников в различные промышленные сферы для управления и автоматизации процессов, оптимизации технологических аппаратов. Также предлагаются методы применения цифровых двойников в сфере обучения инженерных кадров.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

В настоящее время в различных отраслях химической промышленности на стадии подготовки сырья широко используются аппараты смешения. Они предназначены для получения смеси заданной концентрации (смесительный аппарат) или температуры (так называемый смесительный теплообменник или теплообменник смешения). Рассмотрим в качестве примера такой объект, представляющий собой емкостной аппарат идеального перемешивания с двумя входными потоками жидкости и выходным потоком со свободным истечением (рис. 1). В аппарате проводится смешение двух входных потоков однородных жидкостей. Целью функционирования объекта является получение раствора с заданным значением концентрации в выходном потоке.

На рис. 1 обозначено: v_1 – расход исходного компонента во входном потоке; v_2 – расход разбавителя на входе; C_{ex} – концентрация исходного компонента во входном потоке; v , C – расход и концентрация выходного потока.

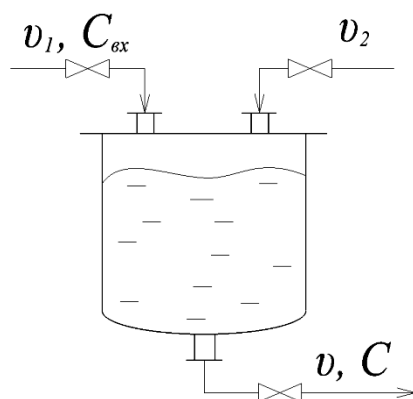


Рис. 1. Принципиальная схема аппарата смешения
Fig. 1. Principle diagram of the mixing heat exchanger

На первом этапе создания цифрового двойника необходимо разработать математическое описание исследуемого процесса. В нашем случае модель объекта представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений (1):

$$\begin{aligned} S_a \frac{dh}{d\tau} &= v_1 + v_2 - \alpha S_n \sqrt{2gh}, \\ S_a \frac{d(hC)}{d\tau} &= v_1 C_{вх} - C \alpha S_n \sqrt{2gh}, \end{aligned} \quad (1)$$

где h – уровень жидкости в аппарате, S_a – площадь поперечного сечения аппарата; α – коэффициент расхода; S_n – площадь сечения патрубка; g – ускорение свободного падения.

Следующий этап разработки цифрового двойника предполагает выбор подходящей системы компьютерной математики, например MATLAB Simulink, LabVIEW или Mathcad.

В некоторых случаях целесообразна реализация цифрового двойника в какой-либо среде программирования, например C++ или Delphi, как это показано в работе [9]. В рамках данной работы цифровой двойник аппарата смешения предлагается реализовать на базе MATLAB Simulink ввиду наличия в данной среде библиотеки OPC Toolbox, упрощающей интеграцию с другими системами.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В MATLAB SIMULINK

Как было отмечено выше, для создания цифрового двойника технологического объекта было использовано расширение Simulink пакета Matlab, предназначенное для математического моделирования. Актуальность использования MATLAB и расширения Simulink обусловлена широким спектром возможностей и удобством этих инструментов. MATLAB широко используется в таких областях, как обработка сигналов и связь, обработка изображений и видео, системы управления, автоматизация тестирования и измерений, финансовый инжиниринг, вычислительная биология. Расширение Simulink представляет собой инструмент для моделирования, симуляции и анализа динамических систем с использованием блок-схем. Он упрощает проектирование сложных систем, визуально представляя их с помощью взаимосвязанных блоков. Актуальность использования Simulink также обусловлена возможностью модернизации и создания собственных библиотек, что позволяет решать задачи разработки модели, проверки и генерации кода, а также тестирования сложной системы. Также необходимо отметить, что в состав MATLAB Simulink входит библиотека OPC Toolbox, которая позволяет интегрировать цифровую модель объекта в разные узлы АСУТП, SCADA-системы и учебные тренажеры посред-

ством применения технологии OPC. На рис. 2 представлена Simulink-модель для рассматриваемого объекта. Для построения Simulink-модели используются различные функциональные блоки из библиотеки объектов Simulink: «Constant», «Scope», «Display», «Mux», «Demux», «Subsystem», «Integrator», «Fcn», «DEE», «OPC Configuration», «OPC Read», «OPC Write» и другие. Блок «MIXER» представляет собой модель объекта в виде черного ящика (вход-выход). Для решения системы дифференциальных уравнений динамики объекта (1) использован встроенный в Simulink редактор дифференциальных уравнений (блок «DEE», Differential Equation Editor). Окно редактора дифференциальных уравнений приведено на рис. 3. В окне редактора «DEE» указывают количество входных параметров, правые части дифференциальных уравнений, начальные условия и переменные состояния (выходные переменные). Для обеспечения обмена данными между Simulink и OPC-сервером используются функциональные блоки «OPC Configuration», «OPC Read» и «OPC Write», которые находятся в разделе «OPC Toolbox» библиотеки объектов Simulink. В блоке «OPC Configuration» указываются желаемый OPC-сервер и настройки режима моделирования (режим имитации реального времени). Функциональные блоки «OPC Read» и «OPC Write» служат для чтения и записи информации в указанные тэги (переменные) сервера (рис. 4). С помощью указанных элементов цифровой двойник можно интегрировать в любую систему посредством применения технологии OPC и обеспечить обмен данными между приложениями, программируемыми логическими контроллерами и SCADA-системами [9, 12].

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В УЧЕБНОМ ТРЕНАЖЕРЕ

Современные тренажеры и симуляторы систем управления должны обеспечивать процесс обучения персонала в режиме реального времени с возможностью имитации различных режимов работы технологического процесса и системы управления. Основным элементом таких систем является как раз цифровой двойник какого-либо процесса, поскольку реальный технологический объект в большинстве случаев недопустимо использовать в целях обучения [12]. Цифровые двойники могут адекватно имитировать работу различных аппаратов и установок в широком диапазоне изменения технологических параметров процесса, что позволяет моделировать различные производственные и аварийные ситуации без риска для предприятия.

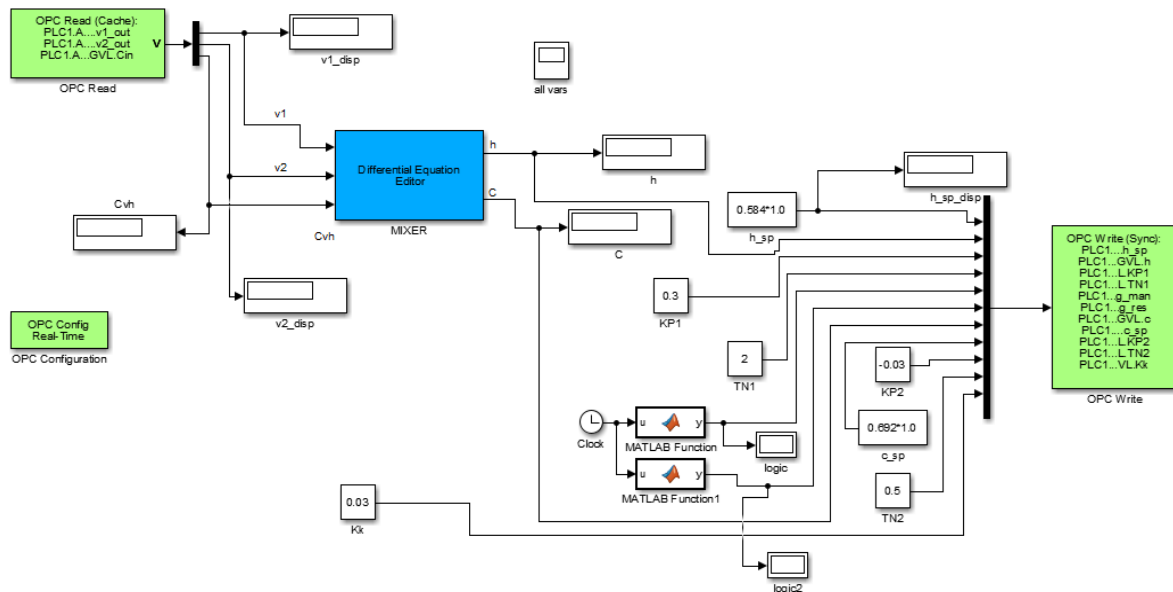


Рис. 2. Simulink-модель технологического объекта
Fig. 2. Simulink model of the technological object

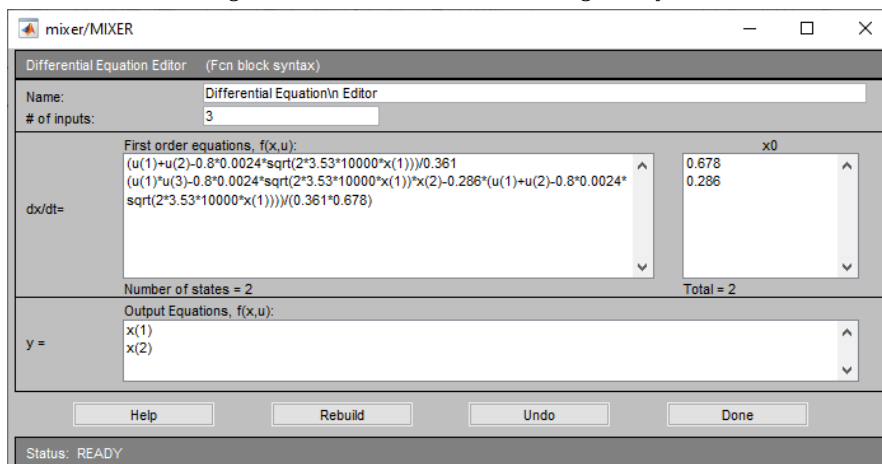


Рис. 3. Окно Differential Equation Editor
Fig. 3. Differential Equation Editor window

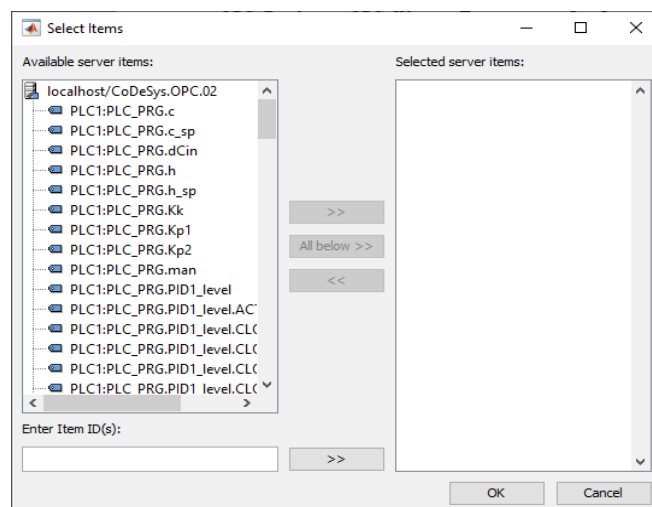


Рис. 4. Окно выбора переменных OPC-сервера
Fig. 4. OPC server variables selection dialog

Рассмотрим пример использования цифрового двойника для решения задачи разработки симулятора (тренажера) системы управления технологическим процессом смешения компонентов. Для этого был спроектирован программно-технический комплекс, структура которого приведена на рис. 5. Комплекс построен на базе автоматизированного рабочего места оператора (АРМ), программируемого логического контроллера ОВЕН ПЛК200, сенсорной панели оператора ОВЕН СП307 и других технических средств автоматизации [13].

Учитывая назначение аппарата (рис. 1), задачей системы регулирования будет являться стабилизация концентрации на выходе смесителя. Поскольку процесс непрерывный, также необходимо решить задачу регулирования уровня. Для реализации системы управления аппаратом предлагается использовать систему автоматического регулирования по отклонению. Возможная структура многомерной системы управления представлена на рис. 6.

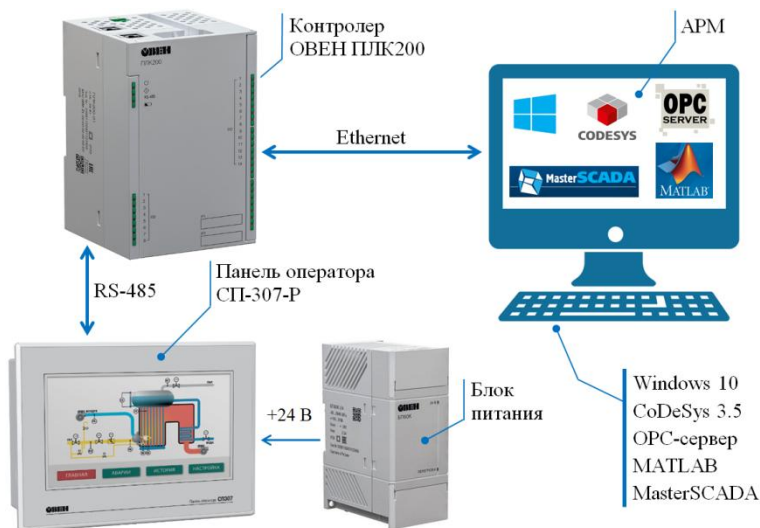


Рис. 5. Структура программно-технического комплекса
Fig. 5. Structure of the software-hardware system

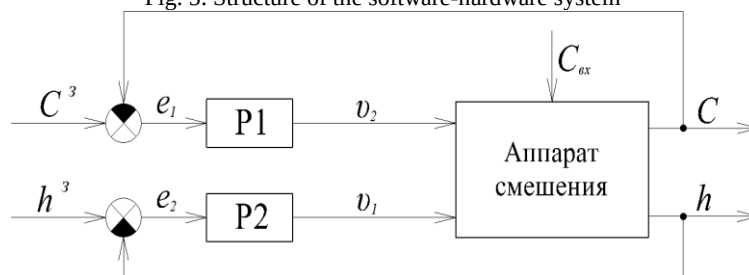


Рис. 6. Структура системы автоматического регулирования
Fig. 6. Structure of the automatic control system

На рис. 6 введены обозначения: P1, P2 – регуляторы; e_1 , e_2 – ошибки регулирования; C, h – выходные переменные состояния; v_1 , v_2 – управляющие воздействия; C^3 , h^3 – заданные значения (уставки); $C_{вх}$ – возмущающее воздействие. В качестве алгоритмов управления используются ПИД-регуляторы.

Программа управления контроллера ПЛК200 реализована на графическом языке программирования FBD (рис. 7). В качестве алгоритмов управления концентрацией и уровнем смеси в аппарате были применены ПИД-регуляторы из библиотеки UTIL среды CoDeSys 3.5.

На следующем этапе проведена настройка символьной конфигурации контроллера, после чего контроллер был подключен к OPC-серверу. После данной процедуры MATLAB Simulink получает доступ к переменным контроллера для чтения и записи.

Как было отмечено выше, в данной работе применяется библиотека OPC Toolbox, входящая в состав MATLAB Simulink.

Данная библиотека компонентов позволяет интегрировать цифровой двойник и программируемый логический контроллер в одну систему.

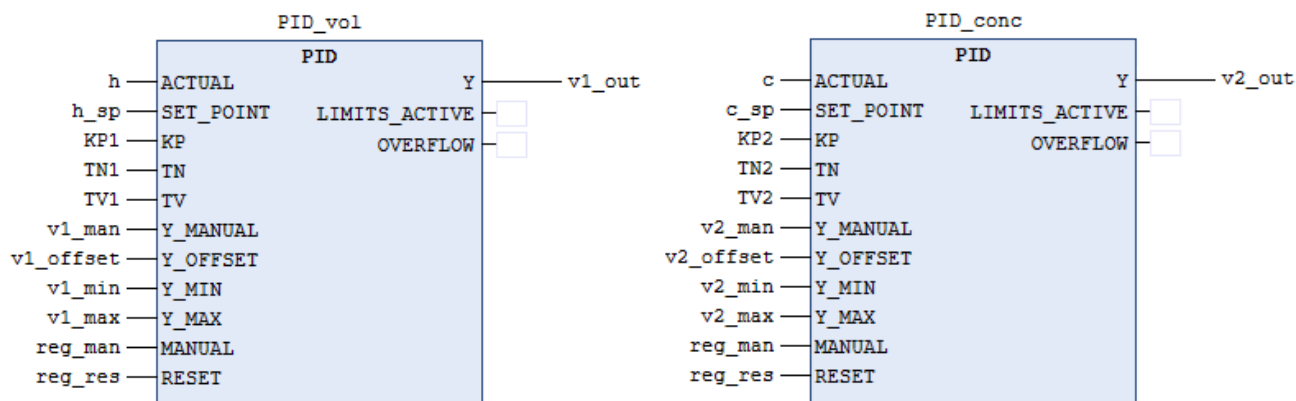


Рис. 7. Реализация ПИД-регуляторов на языке FBD
Fig. 7. Realization of PID controllers using FBD language

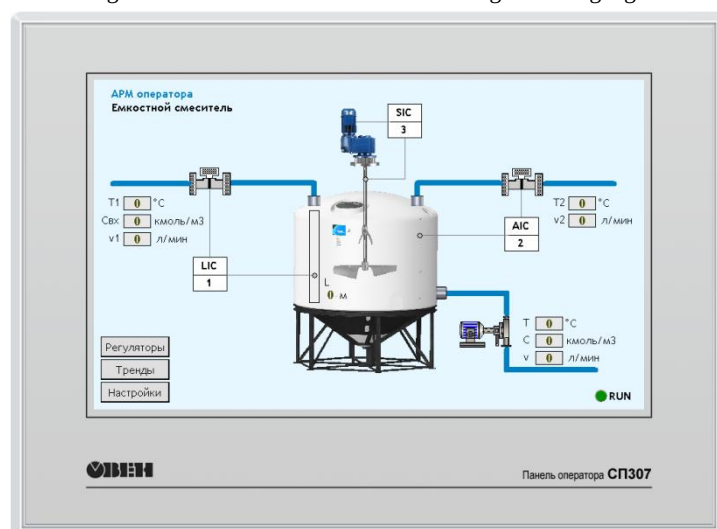


Рис. 8. Интерфейс оператора
Fig. 8. Operator interface

На заключительном этапе был реализован интерфейс пользователя в программе «Конфигуратор СП300» для графической панели оператора ОВЕН СП307. На рис. 8 приведен главный экран проекта в режиме исполнения, обеспечивающий взаимодействие оператора с цифровым двойником.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом в работе показан пример разработки и применения цифрового двойника в сфере создания симуляторов систем управления и учебных тренажеров. Такие программно-технические комплексы широко используются на практике для обучения операторов АСУТП и обслуживающего персонала в ходе наладки и ввода в эксплуатацию новых установок либо проведения курсов повышения квалификации персонала на действующих производствах.

Цифровые двойники все больше внедряются в различные сферы промышленности и перспективы их применения весьма широки. Помимо рассмотренного в работе примера, цифровые

двойники успешно применяются при проектировании химико-технологических систем, для расчета оптимальных параметров аппаратов и узлов химических предприятий, для тестирования и отладки алгоритмов управления программируемых контроллеров на этапе проектирования АСУТП, на этапе эксплуатации производства в задачах прогнозирования. Цифровые двойники могут использоваться предприятиями и организациями в целях обеспечения конкурентоспособности производимых изделий и повышения скорости их вывода на рынок. Достижение этих целей возможно за счет сокращения количества циклов разработки, производства и испытаний опытных образцов изделия, а также сокращения количества изменений, вносимых в конструкцию при производстве и испытаниях опытных образцов изделий.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. **Сосфенов Д.А.** Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития. *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2023. № 4. С. 35-43. DOI 10.25198/2077-7175-2023-4-35.
2. **Радишевская Т.А., Радишевский В.А.** Цифровые двойники и виртуальный ввод в эксплуатацию в контексте цифровой трансформации производства. *Современные средства связи*. 2022. Т. 1. № 1. С. 188-190.
3. **Перл И.А.** Функциональное расширение концепции цифрового двойника. Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA 2022): материалы III Международной научно-практической конференции, Минск, 21–22 апреля 2022 года. Минск: ГУО «Республиканский институт высшей школы». 2022. С. 144-150.
4. **Сахапова Т.С., Исмагилов Т.Ш., Тихонов В.А.** Цифровой двойник производства как этап новой цифровой бизнес-модели промышленного предприятия. *Горная промышленность*. 2023. № 2. С. 62-68. DOI 10.30686/1609-9192-2023-2-62-68.
5. **Рахманов М.Л., Шишкин А.В.** Современные цифровые технологии и цифровой двойник. *Качество и жизнь*. 2021. № 2(30). С. 57-59. DOI 10.34214/2312-5209-2021-30-2-57-59.
6. **Lyu Z.** Handbook of Digital Twins. 1st ed. CRC Press, 2024. 922 p.
7. **Rani S., Bhambri P., Kumar S., Pareek P.K., Elngar A.A.** AI-Driven Digital Twin and Industry 4.0: A Conceptual Framework with Applications. 1st ed. CRC Press, 2024. 338 p.
8. **Stark R., Damerau T.** Digital Twin. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. 2019. N 66. P. 1–8. DOI 10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1.
9. **Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Отлягузов Д.С., Смирнов К.О.** Разработка цифрового двойника на языке программирования Delphi. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 4(80). С. 131-137. DOI 10.6060/snt.20248004.00018.
10. **Лычкина Н.Н., Павлов В.В.** Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника. Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 октября 2023 года. Казань: Издательство АН РТ. 2023. С. 139-149.
11. **Готеляк А.В.** Использование цифровых двойников промышленных объектов в рамках обучения инженерных кадров. Инженерное образование в цифровом обществе: Материалы Международной научно-методической конференции в двух частях, Минск, 15 марта 2024 года. Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. 2024. С. 203-205.
12. **Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Хабибулин Н.М.** Симулятор системы контроля и управления теплообменником смешения. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 4(72). С. 40-46. DOI 10.6060/snt.20227204.0006.
13. **Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Лихач Д.С., Субботин П.А.** Разработка автоматизированной системы сбора данных и оперативного диспетчерского управления ректификационной установкой. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 2(78). С. 85-92. DOI 10.6060/snt. 20247802.00012.
1. **Sosfenov D.A.** Digital twin: history of emergence and prospects for development. *Intellect. Innovacii. Investicii*. 2023. N 4. P. 35-43. (in Russian). DOI 10.25198/2077-7175-2023-4-35.
2. **Radishevskaya T.A., Radishevsky V.A.** Digital twins and virtual commissioning in the context of digital transformation of manufacturing. *Sovremennye sredstva svyazi*. 2022. V 1. N 1. P. 188-190. (in Russian).
3. **Pearl E.A.** Functional extension of the digital twin concept. Komp'yuternye tekhnologii i analiz dannyh (CTDA 2022): materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Minsk, 21–22 aprelya 2022 goda. Minsk: GUO «Respublikanskij institut vysshej shkoly». 2022. P. 144-150. (in Russian).
4. **Sakhapova T.S., Ismagilov T.Sh., Tikhonov V.A.** Digital twin of production as a stage of a new digital business model of an industrial enterprise. *Gornaya promyshlennost'*. 2023. N 2. P. 62-68. (in Russian). DOI 10.30686/1609-9192-2023-2-62-68.
5. **Rakhmanov M.L., Shishkin A.V.** Modern digital technologies and digital twin. *Kachestvo i zhizn'*. 2021. N 2(30). P. 57-59. (in Russian). DOI 10.34214/2312-5209-2021-30-2-57-59.
6. **Lyu Z.** Handbook of Digital Twins. 1st ed. CRC Press, 2024. 922 p.
7. **Rani S., Bhambri P., Kumar S., Pareek P.K., Elngar A.A.** AI-Driven Digital Twin and Industry 4.0: A Conceptual Framework with Applications. 1st ed. CRC Press, 2024. 338 p.
8. **Stark R., Damerau T.** Digital Twin. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. 2019. N 66. P. 1–8. DOI 10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1.
9. **Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Otyaguzov D.S., Smirnov K.O.** Digital twin design using Delphi programming language. *Modern high technologies. Regional application*. 2024. N 4(80). P. 131-137. (in Russian). DOI 10.6060/snt.20248004.00018.
10. **Lychkina N.N., Pavlov V.V.** The concept of digital twin and the role of simulation models in digital twin architecture. Imitacionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2023): Sbornik trudov odinnadcatoy vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii po imitacionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti, Kazan', 18–20 oktyabrya 2023 goda. Kazan': Izdatel'stvo AN RT. 2023. P. 139-149. (in Russian).
11. **Goteljak A.V.** Usage of digital twins of industrial objects in the framework of engineering education. Inzhenomoe obrazovanie v cifrovom obshchestve: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii v dvuh chastyah, Minsk, 15 marta 2024 goda. Minsk: Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki. 2024. P. 203-205. (in Russian).
12. **Nevinitsyn V.Yu., Labutin A.N., Khabibulin N.M.** Simulator of the control and monitoring system of the mixing heat exchanger. *Modern high technologies. Regional application*. 2022. N 4(72). P. 40-46. (in Russian). DOI 10.6060/snt. 20227204.0006.
13. **Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Likhach D.S., Subbotin P.A.** Design of an automated system for data acquisition and supervisory control of a rectification unit. *Modern high technologies. Regional application*. 2024. N 2(78). P. 85-92. (in Russian). DOI 10.6060/snt. 20247802.00012.

Поступила в редакцию(Received) 03.12.2024
Принята к опубликованию (Accepted) 21.01.2025