

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ DELPHI

Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Отлягузов Д.С., Смирнов К.О.

Невиницын Владимир Юрьевич, Грименицкий Павел Николаевич,
Отлягузов Демид Сергеевич, Смирнов Кирилл Олегович
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, demid0139@gmail.com, kirillworck2003@mail.ru

В статье рассматривается вопрос разработки цифровых двойников типовых технологических процессов, которые могут использоваться при проектировании ХТС для расчета оптимальных параметров аппаратов 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. Приведены основные понятия цифровых двойников и сферы их применения, показана актуальность их разработки. Описан пример создания цифрового двойника жидкофазного химического реактора в среде программирования Delphi. Описана методика интеграции цифровой модели в разные узлы АСУТП, SCADA-системы и учебные тренажеры посредством применения технологии OPC и компонентов библиотеки dOPC среды Delphi. Приведены примеры применения разработанного приложения.

Ключевые слова: цифровой двойник, математическая модель, индустрия 4.0, автоматизация, проектирование, моделирование, оптимизация, программирование, Delphi, OPC-сервер

DIGITAL TWIN DESIGN USING DELPHI PROGRAMMING LANGUAGE

Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Otyaguzov D.S., Smirnov K.O.

Nevinitsyn Vladimir Yur'evich, Grimenitsky Pavel Nikolayevich,
Otyaguzov Demid Sergeevich, Smirnov Kirill Olegovich
Ivanovo State University of Chemical Technology,
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.
E-mail: nevinitsyn@isuct.ru, grim@isuct.ru, demid0139@gmail.com, kirillworck2003@mail.ru

The paper deals with the design of digital twins of typical technological processes, which can be used in the chemical plant engineering to calculate the optimal parameters of apparatuses and units, at the stage of control system design for testing and debugging the control algorithms of programmable controllers, at the operation stage in prediction tasks, as well as for the creation of training simulators for the technological processes operators. The basic concepts of digital twins and areas of their application are given, the relevance of their development is shown. An example of creating a digital twin of a liquid-phase chemical reactor in the Delphi programming environment is described. The methodology of integration of digital model into different units of automatic control systems, SCADA-systems and training simulators by means of OPC technology and Delphi dOPC library components is described. Application examples of the developed application are given.

Keywords: digital twin, mathematical model, industry 4.0, automation, design, simulation, optimization, programming, Delphi, OPC server

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время в рамках развития концепции Индустрии 4.0 условием эффективного развития промышленных предприятий и компаний является применение цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла продукции.

Индустрия 4.0, также известная как четвертая промышленная революция, представляет собой современный подход к построению бизнеса, производства и автоматизации технологических процессов за счет использования передовых цифровых технологий: киберфизических систем (CPS),

интернета вещей (IoT), облачных вычислений (Cloud Computing), искусственного интеллекта (AI), больших данных (Big Data), технологии виртуальной и дополненной реальности (VR, AR), аддитивных технологий и 3D-печати, и, конечно, цифровых двойников (Digital Twins) [1-3].

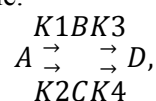
В самом общем понимании цифровой двойник – это виртуальная копия (модель) изделия или процесса, нацеленная на снижение временных и денежных затрат на различных этапах жизненного цикла продукта. В последнее время существенное внимание уделяется созданию цифровых двойников различных технологических процессов, аппаратов, физических устройств, которые позволяют применять информацию об объекте на протяжении всех этапов его жизненного цикла. Например, на этапе проектирования химического производства цифровые двойники аппаратов и узлов позволяют выбрать как их оптимальную конструкцию и режим работы, так и наилучшую конфигурацию участка и технологическую схему в целом. В процессе эксплуатации цифровой двойник должен предсказывать изменения в параметрах работы объекта, ухудшение технического состояния объекта, развитие дефектов и возникновение незапланированных аварий, а также вырабатывать рекомендации по оптимизации режимов работы оборудования. Все это в совокупности позволяет снизить затраты на проектирование и обслуживание объекта, повысить эффективность и надежность его эксплуатации [3-6].

В рамках работы ведется создание цифровых двойников типовых технологических процессов химических производств, которые могут использоваться при проектировании ХТС для расчета оптимальных параметров аппаратов 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. Разработка цифровых двойников осуществляется в виде программного кода на языке Delphi для интеграции в разные узлы АСУТП, SCADA-системы и учебные тренажеры. Актуальность и востребованность разработки цифровых двойников в рамках концепции Индустрии 4.0 подтверждается множеством научных статей и монографий [1-13]. В работах авторами предложены методики применения и внедрения цифровых двойников в различные отрасли промышленности в целях управления и решения задач автоматизации, для решения задач оптимизации технологических

процессов, а так же методики их применения для учебных лабораторных комплексов и тренажеров.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Рассмотрим в качестве примера технологического объекта жидкофазный химический реактор, широко применяемый в различных отраслях промышленности. Целью работы химического реактора является выработка целевого продукта из исходных компонентов при соблюдении требований максимальной эффективности технологического процесса. От устройства и показателей работы химического реактора в значительной степени зависит экономическая эффективность всего производства [11]. В связи с этим на практике на стадии проектирования химического производства возникает задача оптимального синтеза реакторного узла и задача синтеза системы автоматического управления. Для решения этих задач и применяются цифровые двойники. Реактор представляет собой аппарат непрерывного действия, снабженный мешалкой и теплообменной рубашкой (рис. 1). Аппарат работает в политропическом режиме. Предположим, что в аппарате проводится многостадийная экзотермическая реакция, протекающая по схеме:



где A – исходный реагент; B, C, D – продукты реакции; $K1, K2, K3, K4$ – константы скоростей стадий.

Исходный реагент с концентрацией $C_{A_{ex}}$ подается в аппарат с расходом v_1 и температурой t_1 . Поток v_2 с температурой t_2 служит для разбавления реакционной смеси. Смесь из реактора забирается насосом, величина потока v на выходе может регулироваться клапаном.

Смесь на выходе имеет температуру t с концентрациями компонентов C_A, C_B, C_C, C_D . В рубашку аппарата поступает хладагент (жидкость) с расходом v_{xl} и температурой $t_{xl,ex}$, на выходе из рубашки хладагент имеет температуру t . Реактор имеет объем V_p и объем рубашки V_{xl} . Структура потоков в аппарате может быть описана моделью идеального смешения (well-stirred model, WSM), что обеспечивается за счет наличия интенсивно работающей мешалки внутри емкости. Полное математическое описание реактора включает в себя шесть уравнений: четыре уравнения материального баланса по каждому веществу, уравнение теплового баланса для смеси в реакторе, уравнение теплового баланса для теплообменной рубашки. Модель объекта представляет собой систему дифференциальных уравнений (2):

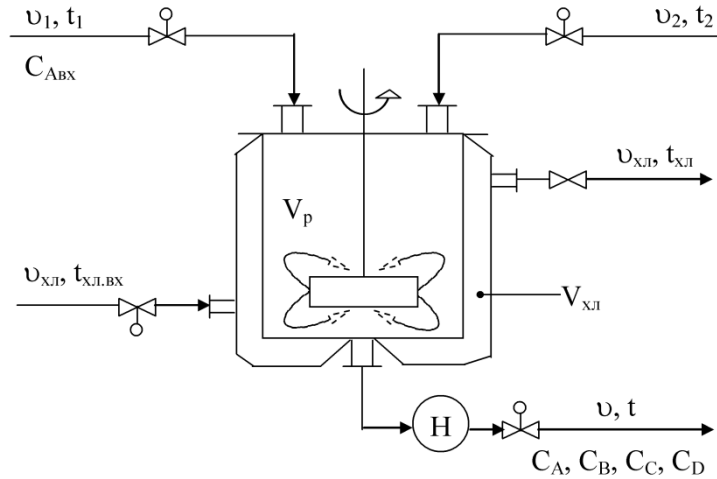


Рис. 1. Схема химического реактора
Fig. 1. Chemical reactor diagram

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_A}{d\tau} = \frac{v_1 C_{Aвх}}{V_p} - K_1 C_A - K_2 C_A - \frac{v C_A}{V_p}, \\ \frac{dC_B}{d\tau} = K_1 C_A - K_3 C_B - \frac{v C_B}{V_p}, \\ \frac{dC_C}{d\tau} = K_2 C_A - K_4 C_C - \frac{v C_C}{V_p}, \\ \frac{dC_D}{d\tau} = K_3 C_B + K_4 C_C - \frac{v C_D}{V_p}, \\ \frac{dt}{d\tau} = \frac{v_1 t_1}{V_p} + \frac{v_2 t_2}{V_p} - \frac{vt}{V_p} + \frac{|-K_1 C_A - K_2 C_A| \Delta H}{C_p \rho} - \frac{K_T F_T (t - t_{хл})}{V_p C_p \rho}, \\ \frac{dt_{хл}}{d\tau} = \frac{v_{хл} t_{хл,вх}}{V_{хл}} - \frac{v_{хл} t_{хл}}{V_{хл}} + \frac{K_T F_T (t - t_{хл})}{V_{хл} C_{p,хл} \rho_{хл}}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где ΔH – тепловой эффект реакции; K_T , F_T – коэффициент теплопередачи через стенку и поверхность теплообмена аппарата; C_p , ρ – плотность и теплоемкость реакционной смеси; $C_{p,хл}$, $\rho_{хл}$ – плотность и теплоемкость хладоагента.

На следующем этапе разработки цифрового двойника необходимо выбрать среду программирования для реализации метода численного решения системы дифференциальных уравнений, создания интерфейса пользователя и обеспечения необходимого функционала приложения в зависимости от решаемой задачи.

ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Для разработки цифрового двойника использовалась среда визуальной разработки приложений Embarcadero Delphi 12. В настоящее время среда программирования Delphi является весьма популярной. Сам язык Delphi является прямым потомком языка Pascal, хорошо известным мно-

гим программистам. На языке Delphi написаны такие популярные приложения, как Total Commander, FastStone Image Viewer, KMPlayer, AIMP, Skype, FL Studio и многие другие.

На первом этапе был разработан модуль ODEsys.pas, включающий в себя процедуры и функции для численного решения математической модели химического реактора.

На рис. 2 приведен фрагмент кода модуля, где показаны используемые переменные, и также в качестве примера приведена функция Calculate, реализующая решение системы дифференциальных уравнений по методу Рунге-Кутты. Модуль позволяет вычислять значения выходных переменных как в текущий момент времени, что можно использовать для имитации работы объекта в режиме реального времени, так и рассчитать состояние объекта через заданный промежуток времени, что можно использовать в задачах прогнозирования.

Далее, как и в любой среде визуальной разработки приложений, создается основная форма программы, т.е. интерфейс пользователя. Для этого на форме размещаются различные базовые компоненты, обеспечивающие необходимый функционал. На рис. 3 приведен фрагмент главного окна программы.

Далее пишутся процедуры обработки событий для всех элементов формы. Так, на рис. 4

приведен обработчик события по нажатию на кнопку «Запуск». В коде прописаны команды, выводящие в соответствующие поля формы значения переменных в начальный момент времени, а также включающие таймер, который вызывает из модуля ODEsys.pas процедуру численного решения математической модели через определенные промежутки времени.

```

1 unit ODEsys;
  //=====
  interface
  //=====
  type
  OutVars = record
  Ca,Cb,Cc,Cd,t,ttn: real;
  end;
  const
  maxtime = 5000;
  var
  Ca: array [0 .. maxtime] of real;
  Cb: array [0 .. maxtime] of real;
  Cc: array [0 .. maxtime] of real;
  Cd: array [0 .. maxtime] of real;
  t: array [0 .. maxtime] of real;
  ttn: array [0 .. maxtime] of real;
  //=====
  CurStep: integer; // текущий шаг интегрирования
  // CurStep=0 - вывод н.у.
  // CurStep=1 - вывод результатов после первой итерации
  //=====
  procedure Calculate();
  procedure Calc1Step(StepSize: real);
  procedure Reset();
  procedure SaveDataPoints();
  function GetCurVar(): OutVars;
  procedure SetFlow1(NewFlow1: real);
  procedure SetFlow2(NewFlow2: real);
  procedure SetT1(NewT1: real);
  procedure SetT2(NewT2: real);
  procedure SetVtn(NewVtn: real);
  procedure SetTtn(NewTtn: real);
  //=====
  procedure Calculate();
  var
  i,h: integer;
  F1,F2,F3,F4: real;
  begin
  h:=1;
  for i := 1 to maxtime do
  begin
  // fcn Ca
  F1:=fncnCa(Ca[i-1],t[i-1],Cb[i-1]);
  F2:=fncnCa(Ca[i-1]+(h/2)*F1,t[i-1],Cb[i-1]);
  F3:=fncnCa(Ca[i-1]+(h/2)*F2,t[i-1],Cb[i-1]);
  F4:=fncnCa(Ca[i-1]+h*F3,t[i-1],Cb[i-1]);
  Ca[i]:=Ca[i-1]+(h/6)*(F1+2*F2+2*F3+F4);
  // fcn Cb
  F1:=fncnCb(Cb[i-1],Ca[i-1],t[i-1]);
  F2:=fncnCb(Cb[i-1]+(h/2)*F1,Ca[i-1],t[i-1]);
  F3:=fncnCb(Cb[i-1]+(h/2)*F2,Ca[i-1],t[i-1]);
  F4:=fncnCb(Cb[i-1]+h*F3,Ca[i-1],t[i-1]);
  Cb[i]:=Cb[i-1]+(h/6)*(F1+2*F2+2*F3+F4);
  // fcn Cc
  F1:=fncnCc(Cc[i-1],Cb[i-1],t[i-1]);
  F2:=fncnCc(Cc[i-1]+(h/2)*F1,Cb[i-1],t[i-1]);
  F3:=fncnCc(Cc[i-1]+(h/2)*F2,Cb[i-1],t[i-1]);
  F4:=fncnCc(Cc[i-1]+h*F3,Cb[i-1],t[i-1]);
  Cc[i]:=Cc[i-1]+(h/6)*(F1+2*F2+2*F3+F4);
  // fcn Cd
  F1:=fncnCd(Cd[i-1],Cb[i-1],t[i-1]);
  F2:=fncnCd(Cd[i-1]+(h/2)*F1,Cb[i-1],t[i-1]);
  F3:=fncnCd(Cd[i-1]+(h/2)*F2,Cb[i-1],t[i-1]);
  F4:=fncnCd(Cd[i-1]+h*F3,Cb[i-1],t[i-1]);
  Cd[i]:=Cd[i-1]+(h/6)*(F1+2*F2+2*F3+F4);
  // fcn t
  F1:=fncnt(t[i-1],Ca[i-1],Cb[i-1],ttn[i-1]);
  F2:=fncnt(t[i-1]+(h/2)*F1,Ca[i-1],Cb[i-1],ttn[i-1]);
  
```

Рис. 2. Модуль ODEsys
Fig. 2. ODEsys unit



Рис. 3. Главная форма приложения
Fig. 3. Main application form

```

100 procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    if TimerSim.Enabled then exit;
    LabelCurSimTime.Caption:='Время моделирования = '+IntToStr(ODEsys.CurStep)+' c';
    // выводим начальное значение переменных
    LabelCa.Caption:='Концентрация Ca = '+FloatToStrF(ODEsys.GetCurVar.Ca,fffixed,7,6)+' (моль/л)';
    LabelCb.Caption:='Концентрация Cb = '+FloatToStrF(ODEsys.GetCurVar.Cb,fffixed,7,6)+' (моль/л)';
    LabelCc.Caption:='Концентрация Cc = '+FloatToStrF(ODEsys.GetCurVar.Cc,fffixed,7,6)+' (моль/л)';
    LabelCd.Caption:='Концентрация Cd = '+FloatToStrF(ODEsys.GetCurVar.Cd,fffixed,7,6)+' (моль/л)';
    Labelt.Caption:='Температура t = '+FloatToStrF(ODEsys.GetCurVar.t,fffixed,5,2)+' (°C)';
    Labelttn.Caption:='Температура tтн = '+FloatToStrF(ODEsys.GetCurVar.ttn,fffixed,5,2)+' (°C)';
    TimerSim.Enabled:=True;
    ShapeStatus.Brush.Color:=clLime;
    LabelStatus.Caption:='RUN';
end;
    
```

Рис. 4. Обработчик события для запуска процесса симуляции
 Fig. 4. Event handler to start the simulation process

Важным моментом при разработке цифрового двойника является вопрос взаимодействия и передачи данных в приложения сторонних фирм, а также в различные устройства и модули. Другими словами, необходимо обеспечить функционал для записи и чтения переменных.

Для интеграции цифрового двойника с другими системами, такими как SCADA системы, системы компьютерной математики (например, MATLAB), различные узлы АСУТП и программируемые контроллеры, целесообразно использовать стандарт OPC. В большей степени стандарт OPC (OLE for Process Control) применяется для взаимодействия между системами сбора данных и

управления (SCADA системы) и программируемыми логическими контроллерами (ПЛК), как это было показано в работе [14]. С помощью технологии OPC одни приложения могут читать или записывать данные в другие приложения (OPC Data Access) и обмениваться событиями.

Для взаимодействия с OPC-серверами можно использовать компоненты dOPC фирмы KASSL, или QuickOPC от OPC Labs. В рамках данной работы была применена библиотека dOPC, включающая в себя компоненты dOPCDAclient, dOPCServerBrowser и dOPCGUI (рис. 5). Данные компоненты обеспечивают весь необходимый функционал для работы с технологией OPC.

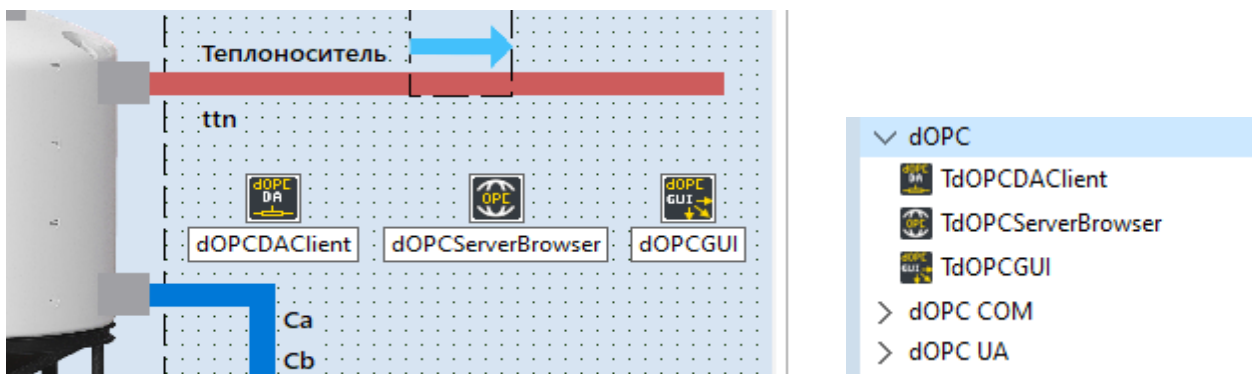


Рис. 5. Компоненты категории dOPC
 Fig. 5. dOPC components

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внешний вид разработанного приложения приведен на рис. 6. Цифровой двойник позволяет имитировать работу химического реактора в режиме реального времени при различных входных воздействиях, которые может задавать пользователь в соответствующих полях ввода.

Данный функционал можно использовать для моделирования и оптимизации объекта на стадии проектирования производства, прогнозирования поведения аппарата при различных внешних воздействиях, а также применять приложение в качестве учебной виртуальной лаборатории (возможна интеграция со SCADA системами посредством OPC).

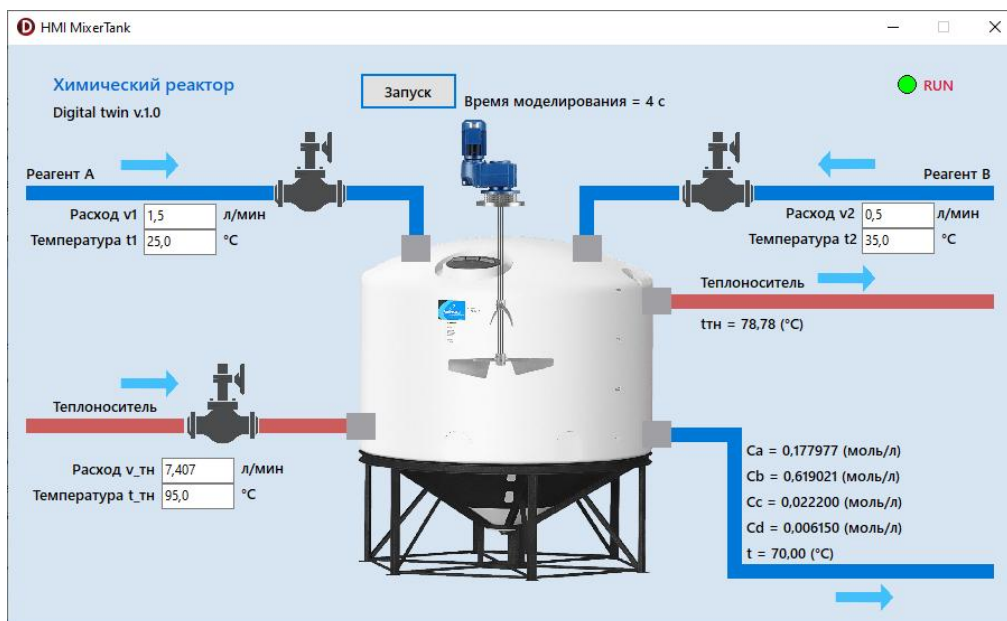


Рис. 6. Интерфейс цифрового двойника химического реактора
Fig. 6. Interface of the chemical reactor's digital twin

Вторым вариантом применения цифрового двойника является его использование на этапе проектирования системы управления и ее отладки. В этом случае предполагается, что цифровой двойник интегрируется в систему управления и замещает реальный технологический процесс. Это также возможно реализовать с помощью технологии OPC, где в качестве сигналов с датчиков в систему управления, реализованную на базе программируемого контроллера (ПЛК), поступают значения с модели цифрового двойника. Такая

методика (также известная, как HIL simulation), нашла широкое применение для отладки программ контроллеров и логики их работы на этапе проектирования производства, когда реальный объект еще недоступен.

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

1. **Lyu Z.** Handbook of Digital Twins. 1st ed. CRC Press, 2024. 922 p.
2. **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.
3. **Блинов В.Л., Богданец С.В.** Цифровые двойники турбомашин: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. 162 с.
4. **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.
5. **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.
6. **Фролов Е.Б., Паршина И.С., Зайцев А.С., Климов А.С.** Индустрия 4.0: Цифровой двойник как средство повышения эффективности производственной системы. *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2019. № 2(92). С. 42-48.

REFERENCES

1. **Lyu Z.** Handbook of Digital Twins. 1st ed. CRC Press, 2024. 922 p.
2. **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.
3. **Blinov V.L., Bogdanets S.V.** Digital twins of turbomachines: textbook. Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2022. 162 p. (in Russian).
4. **Sosfenov D.A.** Digital twin: history of emergence and prospects for development. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2023. N 4. P. 35-43. (in Russian). DOI 10.25198/2077-7175-2023-4-35.
5. **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.
6. **Frolov E.B., Parshina I.S., Zaitsev A.S., Klimov A.S.** Industry 4.0: Digital twin as a means of increasing the efficiency of the production system. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii*. 2019. N 2(92). P. 42-48. (in Russian).

7. **Яквивьюк П.Н., Пискажова Т.В., Сальников А.В., Гофман П.М.** Цифровой двойник для управления совмещенной литейно-прокатной линией. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2022. Т. 23. № 2. С. 347-356. DOI 10.31772/2712-8970-2022-23-2-347-356.
8. **Баширов М.Г., Хафизов А.М., Адельгужин Р.Р.** Цифровой двойник лабораторного комплекса с регулятором на основе нечеткой логики. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2023. № 3(49). С. 108-113. DOI 10.25699/SSSB.2023.49.3.006.
9. **Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М.** Цифровой двойник оборудования как основа для потребителя в условиях цифрового производства. *Автоматизация. Современные технологии*. 2020. Т. 74. № 9. С. 394-402. DOI 10.36652/0869-4931-2020-74-9-394-402.
10. **Божко Л.М.** Цифровые технологии при разработке решений в управлении изменениями. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством*. 2023. № 2(56). С. 30-35. DOI 10.6060/ivecofin.2023562.640.
11. **Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Девятьяров А.Н., Волкова Г.В.** Оптимизация реакторного узла для проведения жидкофазных последовательно-параллельных реакций. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. № 1(73). С. 47-53. DOI 10.6060/snt.20237301.0007.
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., Лабутин А.Н., Макарова Е.В.** Программно-технический комплекс для автоматизированного проектирования алгоритмов управления технологическими объектами. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021. № 4(68). С. 56-62. DOI 10.6060/snt.20216804.0008.
14. **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.
7. **Yakivyyuk P.N., Piskazhova T.V., Salmikov A.V., Hoffman P.M.** Digital twin for controlling a combined casting and rolling line. *Sibirskij aerokosmicheskij zhurnal*. 2022. V 23. N 2. P. 347-356. (in Russian). DOI 10.31772/2712-8970-2022-23-2-347-356.
8. **Bashirov M.G., Khafizov A.M., Adelguzhin R.R.** Digital twin of laboratory complex with fuzzy logic based controller. *YUzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*. 2023. N 3(49). P. 108-113. (in Russian). DOI 10.25699/SSSB.2023.49.3.006.
9. **Kabaldin Y.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M.** The digital twin of equipment as a basis for the consumer in a digital manufacturing environment. *Avtomatizaciya. Sovremennye tekhnologii*. 2020. V 74. N 9. P. 394-402. (in Russian). DOI 10.36652/0869-4931-2020-74-9-394-402.
10. **Bozhko L.M.** Digital technologies in the development of solutions in change management. *Ivecofin*. 2023. N 2(56). P. 30-35. (in Russian). DOI 10.6060/ivecofin.2023562.640.
11. **Nevinitsyn V.Yu., Labutin A.N., Devetyarov A.N., Volkova G.V.** Optimization of a reactor unit for liquid phase series-parallel reactions. *Modern high technologies. Regional application*. 2023. N 1(73). P. 47-53. (in Russian). DOI 10.6060/snt.20237301.0007.
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., Labutin A.N., Makarova E.V.** Software and hardware complex for the automated design of control algorithms of technological objects. *Modern high technologies. Regional application*. 2021. N 4(68). P. 56-62. (in Russian). DOI 10.6060/snt.20216804.0008.
14. **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 03.09.2024
 Принята к опубликованию 06.11.2024
 Received 03.09.2024
 Accepted 06.11.2024