

Обзор существующих решений в области моделирования технологических процессов

Я.А. Зотов¹

¹ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия, zotov@niisi.ras.ru

Аннотация. Статья содержит обзор некоторых существующих решений в области моделирования в некоторых отраслях. Приведены определения цифровых двойников. Даны описания программ, реализующих функционал цифровых двойников, в том числе с открытым исходным кодом. Описаны некоторые математические решения.

Ключевые слова: моделирование, цифровой двойник, автоматизированные системы управления

1. Введение

Разработка и отладка программного обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами должна базироваться на модели, адекватно учитывающей основные параметры и алгоритмы функционирования объекта автоматизации.

К надёжности функционирования и к функциональной безопасности программного обеспечения систем управления сложными техническими процессами предъявляются повышенные требования. В связи с этим при разработке программного обеспечения необходимо применять модели, отражающие существенные и наиболее важные характеристики функционирования объекта автоматизации.

Использование функциональных моделей объекта автоматизации необходимо в тех случаях, когда оценку корректности системы управления невозможно осуществить в условиях действующего объекта автоматизации в связи с ущербом, который может быть нанесен системой управления из-за ошибок в прикладном программном обеспечении.

Существует большое количество средств моделирования технологических процессов, применяемых в настоящее время. Такие средства основаны на математических моделях, системах искусственного интеллекта, машинного обучения и технологии цифровых двойников.

2. Цифровые двойники

2.1. Определения цифровых двойников

Формальные идеи цифровых двойников возникли в двухтысячные годы [1]. Однако, долгое время не существовало ни строго определения этого понятия, ни технической возможности ре-

ализации модели такого уровня сложности. Приведем несколько определений цифровых двойников:

Цифровой двойник — это интегрированная мультифизическая, многомасштабная вероятностная симуляция готового транспортного средства или системы, в которой используются наилучшие доступные физические модели, обновления датчиков, история парка и т. д., чтобы отразить жизнь соответствующего летающего двойника. NASA, 2012 [2].

Цифровой двойник — это компьютеризированная модель физического устройства или системы, в которой представлены все функциональные особенности и связи с рабочими элементами. Чен, 2017 [3]

Цифровой двойник представляет собой живую модель физического актива или системы, которая постоянно адаптируется к операционным изменениям на основе собранных онлайн-данных и информации и может прогнозировать будущее соответствующего физического аналога. Лю и др., 2018 [4].

Цифровой двойник — это набор виртуальной информации, которая полностью описывает потенциальное или реальное физическое производство от микроатомного до макрогеометрического уровня. Чжэн и соавторы, 2018 [5].

Цифровой двойник — это цифровое представление физического предмета или сборки с использованием интегрированных симуляций и сервисных данных. Цифровое представление содержит информацию из нескольких источников на протяжении всего жизненного цикла продукта. Эта информация постоянно обновляется и визуализируется различными способами для прогнозирования текущих и будущих условий как в проектной, так и в операционной среде, чтобы улучшить процесс принятия решений. Врбич и др., 2018 [6].

Цифровой двойник — это виртуальный экземпляр физической системы (двойника), который постоянно обновляется данными о производительности, обслуживании и состоянии последней на протяжении всего жизненного цикла физической системы. Манди, 2019 [7].

В 2021 был издан ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения», содержащий следующее определение. Цифровой двойник изделия — система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [8].

2.2. GE Predix

Predix — это облачная платформа для промышленного интернета, разработанная компанией General Electric для анализа больших данных в промышленности с учетом соблюдения всех требований кибербезопасности [9]. Датчики, установленные на подключенном к системе оборудовании, собирают большие объемы информации, хранящиеся в единой защищенной облачной платформе. Программное обеспечение на базе Predix использует систему предиктивной аналитики для изучения данных, обнаружения и диагностики неисправностей, что повышает надежность и доступность активов, одновременно снижая затраты на эксплуатацию и обслуживание. Predix обеспечивает повышение эффективности благодаря объединению разрозненных источников данных в единое информационное пространство и использованию передовых средств анализа для принятия правильных решений.

Наиболее мощной частью Predix является анализ больших данных на основе цифровых двойников, при котором различные исходные состояния физического оборудования собираются и хранятся в виртуальном информационном пространстве, а оборудование управляется путем построения точных моделей и прогнозов поведения.

Predix содержит каталог моделей, разработанных компанией General Electric и ее партнерами в форме программных интерфейсов приложений (API), и предоставляет тестовые данные, чтобы пользователи могли быстро использовать существующие модели для обучения своих моделей. Разработанные пользователями модели также могут публиковаться в этом каталоге моделей и использоваться другими пользователями. Данные модели включают в себя обнаружение аномалий, анализ, обработку сигналов, контроль качества и оптимизацию работы. В соответствии с широко признанными типами анализа больших промышленных данных, анализ

можно разделить на диагностический, прогнозирующий и превентивный.

В дополнение к этим моделям анализа, General Electric предоставляет более 300 моделей активов и процессов. Эти модели связаны с различными продуктами General Electric, включающими различные атрибуты и 3D-модели, удобные для пользователей для быстрого создания цифровых двойников.

Примеры использования системы Predix:

- прогнозный анализ работы оборудования в режиме реального времени;
- превентивная аналитика;
- оперативное управление производством;
- хранение и обработка технологических данных;
- оптимизация технологического процесса;
- техническое обслуживание и ремонт промышленного оборудования.

2.3. ThingWorx

ThingWorx — платформа, предназначенная для сборки и запуска компонентов промышленного интернета вещей. С её помощью можно сократить временные, финансовые затраты на ремонт и снизить риски выхода оборудования из строя [10].

ThingWorx предоставляет возможность быстрой сборки и запуска сетевых приложений для реализации новых возможностей в стремительно развивающемся мире интернета вещей с помощью цифровых двойников. Цифровые двойники содержат информацию, описывающую изделие и находящуюся в разных системах учета [11].

Платформа ThingWorx Converge взаимодействует с такими системами через реализованные в них интерфейсы программирования приложений API. Она понимает взаимосвязь между изделиями и информацией о них, хранящейся в других системах. Converge выступает посредником между цифровым двойником и приложениями, которые им пользуются. Приложения получают информацию от цифровых двойников и могут управлять ими через предоставленный API.

Совместно с ThingWorx может использоваться решение ColdLight, позволяющее проводить прогнозирующий анализ собранных данных и фильтровать их для дальнейшей обработки с использованием методов интеллектуального анализа. Эта система дает доступ ко всем данным, необходимым для получения представления обо всех доступных возможностях, благодаря чему можно принять информированное решение.

2.4. Автодискавери

Программно-аппаратный комплекс "Авто-

дискавери", созданный проектом "Цифровые дороги", является системой узкого назначения. Он предназначен для создания цифровых двойников и контроля состояния объектов дорожно-транспортной инфраструктуры. Это решение позволяет получать актуальные данные о состоянии объектов дорожно-транспортной инфраструктуры, принимать оперативные меры по восстановлению поврежденных объектов, а также в автоматизированном режиме готовить необходимую документацию [12].

Мобильные лаборатории комплекса проводят автоматизированную оцифровку объектов дорожно-транспортной инфраструктуры при проезде с точными измерениями координат и параметров объектов и панорамными фото. Благодаря разработкам на базе машинного зрения, нейросетевого анализа, LiDAR-технологиям система с точностью позиционирования 10 см в режиме онлайн определяет и классифицирует объекты на дороге — световые, дорожные знаки, дорожное полотно, и их текущее состояние. В результате получается полное документирование, картографическая подложка и паспорта объектов со всей историей и актуальными данными.

Система "Автодискавери" полностью автоматизирована, благодаря чему исключается человеческий фактор и повышается производительность оцифровки, так как актуальные параметры объектов структурируются и заносятся в базу во время проезда без долгой ручной обработки. Производительность одной мобильной лаборатории — 150 км в день. Оцифровка города с протяженностью улично-дорожной сети до 1000 км и преимущественно двухполосным движением по каждому из направлений занимает не более 2 недель.

2.5. Zenkit

Проект Zenkit интересен тем, что он представляет собой программное обеспечение, поддерживающее создание цифровых близнецов для рабочих процессов компании. Данное цифровое решение создает точную копию бизнеса и позволяет отслеживать результаты развития в реальном времени [13].

Zenkit предоставляет возможность использования только необходимых функций программы. Пользователь сам определяет, какую информацию он хочет отслеживать, как и где ее хранить, и кто может получить к ней доступ.

С помощью произвольных полей можно объединить сразу несколько элементов компании воедино: клиентские данные, документацию, счета, проекты, ресурсы, события и т.д. Технология Zenkit позволяет соединить данные аспекты и эффективно использовать их совместный по-

тенциал. Имеются различные режимы отображения данных: календарь для планирования задач, канбан-доска для индивидуальных заданий, таблица для отслеживания важных показателей с помощью формул.

Zenkit может стать цифровым двойником для любой компании, команды или цели. В нем есть возможность управления проектами в режиме реального времени, задания участникам рабочих пространств, обсуждения работы, используя функции комментирования и упоминания. Возможно использование Zenkit для хранения данных и помощи клиентам, отслеживания потенциальных клиентов, управления воронкой продаж и обеспечения клиентам прямого доступа к их счетам, проектам и системе коммуникации.

В Zenkit можно загружать документы и изображения, хранящиеся на компьютере или в любом облачном хранилище, открыть к ним доступ для коллег для совместной работы над проектами.

Также есть возможность создания и управления базой данных сотрудников компании. В Zenkit можно настроить канал для внутренней коммуникации, подготовить ресурсы для ознакомления новых сотрудников с рабочими процессами, управлять заявлениями о приеме на работу, назначать зарплату и т.д.

2.6. Ansys Twin Builder

Ansys Twin Builder — это инструмент для создания, валидации и развертывания цифровых двойников и предиктивного обслуживания производственных активов [14].

Цифровой двойник применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия. На этапе эскизного проектирования создаются различные варианты модели и выбирается наиболее оптимальное техническое решение. Далее на этапе технического проектирования созданная модель дорабатывается с учетом взаимодействия всех компонентов системы, режимов работы ПО и условий окружающей среды. На этапе изготовления происходит определение допусков и требований для обеспечения желаемых характеристик и безотказной работы изделия. Получаемые во время эксплуатации цифрового двойника данные обеспечивают своевременную диагностику системы и перекалибровку ее параметров с учетом новых потребностей потребителя.

Предиктивная аналитика данных, получаемых в режиме реального времени от виртуальных датчиков, обеспечивается за счет удобной интеграции Ansys Twin Builder с платформами промышленного интернета вещей.

Разработка цифрового двойника Ansys Twin

Builder ускоряется благодаря использованию готовых моделей и элементов:

- стандартные языки и форматы обмена данными: VHDL-AMS (IEEE 1076.1), Modelica, SML (Simplorer Modeling Language), FMI (Functional Mock-up Interface), C/C ++, SPICE;
 - обширные библиотеки 0D-элементов для разных областей применения;
 - 3D-решатели и модели пониженного порядка (ROM);
 - импорт моделей, созданных в Simulink;
 - экспорт созданных на Modelica моделей в формате FMU;
 - использование SCADE Suite для верификации, оптимизации и калибровки параметров безопасности критически важного встроенного программного обеспечения.
- Эффективность валидации и оптимизации характеристик системы повышается благодаря следующим характеристикам:
- эффективный алгоритм синхронизации и адаптивной настройки решателей на каждом временном шаге;
 - подключение к высокопроизводительным вычислительным ресурсам;
 - продолжение расчета после сохранения проекта;
 - изменение значений переменных в режиме реального времени для улучшения характеристик модели;
 - использование Ansys DesignXplorer для выполнения сложной параметрической оптимизации;
 - использование SCADE Display для моделирования интерактивного человеко-машинного интерфейса (HMI);
 - создание сценариев на Python или Visual Basic для автоматизации процессов моделирования;
 - создание пользовательских инструментов с API-интерфейсом для Python;
 - подключение новых библиотек моделей и расширений из магазина Ansys ACT.

Повышение производительности достигается за счет следующих возможностей

- быстрое подключение к поддерживаемым платформам промышленного интернета вещей (IIoT);
- экспорт моделей для создания межплатформенной, облачной инфраструктуры цифровых двойников для IIoT-платформ SAP, PTC или GE Predix;
- большой выбор графических и табличных отчетов для визуализации результатов моделирования;
- быстрый экспорт диаграмм, графиков и таблиц в Microsoft Excel или в различные форматы файлов изображений;

- автоматическое создание сводных отчетов по результатам моделирования в HTML и PDF.

2.7. Решения Siemens

Создание цифрового двойника производства с помощью средств Siemens на примере производства напитка [15].

На первом этапе происходит создание цифрового двойника продукта в соответствии с точным процессом приготовления. Это гарантирует, что необходимые ингредиенты будут смешаны в правильной пропорции и концентрациях. Для создания такого цифрового двойника используется SIMATIC IT R&D Suite, который поддерживает процесс разработки с учетом правил на различных рынках. Рецепт напитка определяется на основе одобренных ингредиентов. Далее происходит моделирование и оптимизация в соответствии с требуемыми свойствами, например, количеством калорий. Процесс формирования продукта приводит к определению рецепта и соответствующей таблицы питательных веществ.

Далее происходит создание дизайна упаковки в виртуальной среде, например, с помощью SIEMENS NX. В результате получается цифровой двойник упаковки, содержащий данные

о компонентах и материалах, из которых она будет изготавливаться, физических свойствах, форме и размерах деталей, а также их 3D модели. Затем происходит моделирование стресс-теста цифрового двойника, например, с помощью Simcenter. С помощью моделирования мы можем, например, гарантировать, что жидкость не будет выливаться каждый раз, когда потребитель берет открытую бутылку.

После создания цифрового двойника продукта можно перейти к разработке цифрового двойника процесса производства или технологии. Эта задача решается с помощью программного продукта COMOS, в котором планируется и проверяется производственный процесс, начиная с определения технологической схемы процесса, создания схемы трубопроводов и контрольно-измерительных приборов.

На основе цифрового двойника процесса производства можно построить цифровой двойник производственной линии. С помощью Tecnomatix Line Designer проектируется и при необходимости визуализируется компоновка производственных линий. Это цифровой двойник производственной линии, который поможет еще до строительства реального объекта оптимизировать весь процесс на каждом шаге производства, вплоть до управления каждым устройством линии. При этом есть возможность использования цифровых двойников компонен-

тов и агрегатов линии от поставщиков и производителей оборудования.

При наличии цифрового двойника процесса производства и производственной линии можно, например, с помощью Tecnomatix Plant Simulation, оптимизировать потоки материала и пропускную способность, обнаружить узкие места и оптимизировать энергопотребление будущего завода.

При наличии цифрового двойника производства можно сделать виртуальную прогулку по этому производству, что очень хорошо подходит для обучения будущего персонала и проверки комфортности рабочей среды.

На основе имеющихся цифровых двойников оборудования, электрических схем и процесса производства, полученных на предыдущих этапах, можно создать в автоматическом режиме в TIA Portal программу, управляющую производством, для программируемых логических контроллеров.

Общий результат комплексно проверяется с помощью виртуального ввода в эксплуатацию в процессе моделирования завода, например, в Tecnomatix и на виртуальном контроллере SIMATIC на PLCSIM Advanced и виртуальном двойнике HMI. Такая взаимная интеграция позволяет произвести полное тестирование производства в виртуальной среде за счёт цифровых двойников.

Для достижения высокого уровня эффективности важно оптимизировать созданную последовательность производства, например, с помощью программного обеспечения SIMATIC Pre-actor. Это позволит планировать правильную и эффективную последовательность операций в соответствии с наличием ресурсов завода и возможными ограничениями.

Контроль качества продукции также закладывается на этапе создания производства. Например, можно использовать ПО SIMATIC IT Unified Architecture, позволяющее построить систему менеджмента качества, которая будет гарантировать качество продукции. Все возможные, даже минимальные отклонения на этапе производства немедленно будут поступать в систему. Это позволит обеспечить контроль качества и максимально снизить любые отклонения.

С помощью SIMATIC IT Unified Architecture Manufacturing Intelligence можно получить оценку производительности производственной линии. Также можно обеспечить глубокую детализацию временных измерений (например, вплоть до дня или смены), оборудования, установленного на каждом участке (вплоть до отдельных единиц), а также других параметров, связанных с заказами и продуктами.

2.8. Цифровые двойники в медицине

Как технология цифровых двойников используется в здравоохранении?

В системах здравоохранения цифровые двойники используются для создания цифровых представлений медицинских данных, таких как больничная среда, результаты лабораторных исследований, физиология человека и т. д., с помощью компьютерных моделей [16].

Технологию цифровых двойников можно использовать для создания виртуального двойника больницы для анализа операционных стратегий, возможностей, кадрового обеспечения и моделей ухода для выявления областей, требующих улучшения, прогнозирования возможных проблем и оптимизации организационных стратегий. Таким образом, цифровые двойники больниц позволяют:

- оптимизировать ресурсы. Использование исторических данных и данных в режиме реального времени о работе больниц и окружении (например, о случаях COVID-19, автомобильных авариях и т. д.) для создания цифровых двойников позволяет руководству больницы выявлять нехватку коек и оптимизировать графики работы персонала. Такая информация повышает эффективность использования ресурсов и оптимизирует работу больницы и персонала при одновременном снижении затрат;

- управлять рисками. Цифровые двойники обеспечивают безопасную среду для тестирования изменений в производительности системы (количества персонала, вакансий в операционных, обслуживания устройств и т. д.), что позволяет принимать стратегические решения на основе данных в сложной и чувствительной среде.

IBM Process Mining создает цифрового двойника организации, который можно применять для создания цифровых копий организационных процессов в медицинских учреждениях. Это позволяет запускать симуляции, выявлять узкие места до их возникновения и выявлять возможности автоматизации.

Цифровые двойники также применяются для моделирования органов и отдельных клеток или индивидуального генетического состава, физиологических характеристик и привычек для создания персонализированных лекарств и планов лечения. Эти копии внутренних систем человеческого тела улучшают медицинское обслуживание и лечение пациентов за счет индивидуальных диагностики и планирования лечения.

Цифровые двойники могут улучшить проектирование, разработку, тестирование и мониторинг новых лекарств и медицинских устройств.

Например, цифровые двойники лекарств и химических веществ позволяют модифицировать или переделывать лекарства с учетом размера частиц и характеристик состава для повышения эффективности. Цифровые двойники медицинского устройства позволяют разработчикам тестировать характеристики или использование устройства, вносить изменения в дизайн или материалы, а также проверять успех или неудачу модификаций в виртуальной среде перед производством. Это значительно снижает число отказов и повышает производительность и безопасность конечного продукта.

Каковы проблемы цифровых двойников в здравоохранении?

Некоторые из проблем, с которыми сталкивается внедрение цифровых двойников в здравоохранении, включают:

- ограниченное принятие. Технология цифровых двойников не получила широкого распространения в клинической практике. С другой стороны, даже несмотря на то, что система здравоохранения наращивает использование цифровых двойников, утверждается, что это остается дорогим и доступным не для всех. Технология цифровых двойников станет преимуществом, предназначенным для людей с более высокими финансовыми возможностями, что приведет к неравенству в системе здравоохранения;

- качество данных. Система искусственного интеллекта в цифровых двойниках учится на доступных биомедицинских данных, но качество данных может оказаться плохим. Следовательно, анализ и представление таких данных становится проблематичным. Это в конечном итоге негативно влияет на модели, что также влияет на надежность моделей в процессах диагностики и лечения;

- конфиденциальность данных. Применение цифровых двойников требует от организаций здравоохранения и страховых компаний сбора все большего количества данных на индивидуальном уровне. Со временем эти организации здравоохранения получают подробный слепок информации о биологическом, генетическом, физическом состоянии и образе жизни человека.

2.9. Ditto

Eclipse Ditto — это инструмент для создания цифровых двойников для интернета вещей с открытым исходным кодом. Технология потенциально отражает большое количество цифровых двойников, живущих в цифровом мире с физическими объектами. Это упрощает разработку решений для разработчиков программного обеспечения, поскольку им не нужно знать, как и где именно связаны физические объекты. С по-

мощью Ditto объект можно использовать как любой другой веб-сервис через его цифрового двойника [17].

Ditto не является полноценной платформой интернета вещей. Он не предоставляет программное обеспечение, работающее на шлюзах интернета вещей, и не определяет и не реализует протокол интернета вещей для связи с устройствами. Основное внимание уделяется внутренним сценариям через веб-API для упрощения работы с уже подключенными устройствами и объектами из клиентских приложений или другого серверного программного обеспечения. Ditto также не указывает, какие данные или какую структуру должен предоставлять объект в интернете вещей.

Ditto можно использовать, чтобы получить полноценный API с поддержкой авторизации (HTTP, WebSocket и другие протоколы обмена сообщениями) для взаимодействия с цифровыми двойниками.

В типичном сценарии использования интернета вещей есть несколько мест для реализации программного обеспечения:

- на оборудовании или рядом с ним с использованием языков программирования высокого уровня C/C++ или Python;

- опционально на шлюзе, устанавливающем подключение к Интернету (например, на основе Eclipse Kura);

- в мобильном или веб-приложении с использованием языков программирования высокого уровня Java, Javascript, Swift и т. д.;

- в серверной части, выполняющей задачи предоставления прикладного интерфейса (API), маршрутизации запросов, обеспечения санкционированного доступа и предоставления данных и уведомлений.

Ditto фокусируется на решении серверных задач («бэкенда») в таких сценариях. Его цель — избавить решения интернета вещей от необходимости внедрять и эксплуатировать настраиваемую серверную часть. Вместо этого, используя Eclipse Ditto, пользователи могут сосредоточиться на бизнес-требованиях, на подключении устройств к облаку или серверной части и на внедрении бизнес-приложений.

2.10. iModel.js

iModel.js — это платформа с открытым исходным кодом для создания, использования и интеграции цифровых двойников инфраструктуры — цифровых представлений актива или системы, а также контекста и элементов управления. Операторы инфраструктуры используют цифровых двойников для лучшего планирования, эксплуатации и обслуживания активов [18].

Сердцем цифрового двойника инфраструк-

туры является реляционная база данных, известная как iModel, которая содержит компоненты, собранные из многих источников. Изменения в iModel управляются iModelHub и синхронизируются с распределенными копиями, создавая распределенную базу данных. Платформу iModel.js можно использовать для интеграции цифрового двойника инфраструктуры в цифровые рабочие процессы. Она содержит инструменты для создания, визуализации, запроса, анализа данных, синхронизации, согласования и защиты цифрового двойника.

iModel.js благодаря гибкости и открытости легко использовать и интегрировать с другими системами. В нем используются стандартные облачные и веб-технологии, выбранные для снижения входного сопротивления существующей кодовой базы и сохранения гибкости с течением времени.

3. Математическое моделирование

3.1. Математические модели

Модели можно поделить на детерминированные и стохастические. В детерминированных моделях все факторы, оказывающие влияние на развитие ситуации принятия решения, однозначно определены и их значения известны в момент принятия решения. Стохастические модели предполагают наличие элемента неопределенности, учитывают возможное вероятностное распределение значений факторов и параметров, определяющих развитие ситуации [19].

Среди детерминированных моделей широко распространены задачи линейного программирования. Линейное программирование — это набор методов, используемых в математическом программировании, также называемых математической оптимизацией. Эти методы используются для решения систем линейных уравнений и неравенств, перед которыми стоит цель максимизации или минимизации некоторой линейной функции. Если переменные решения должны быть целыми числами, такая модель называется целочисленной моделью программирования.

Пример ситуаций, в которых может быть полезна модель детерминированной оптимизации:

- ассортимент продукции — определить, какое количество продукции каждого типа необходимо производить с учетом ограничений на имеющиеся ресурсы;
- планирование производства — определить, сколько каждого вида продукции нужно производить в разные периоды времени, чтобы выполнить заданные объемы производства к определенному времени;

- смешивание — определить наилучшую смесь исходных материалов для минимизации затрат на производство смеси;

- резка материала — определить лучший способ резки ресурсного материала, чтобы максимизировать прибыль. Например, бревно можно распилить на пиломатериалы разных размеров, которые можно продать по разным ценам;

- кадровое обеспечение — определить наилучший способ назначения людей на работу, чтобы максимизировать их предпочтения или максимизировать производительность, исходя из их способностей на разных работах;

- транспортировка — определить наилучший способ маршрутизации ресурсов через транспортную сеть, чтобы минимизировать затраты, при этом доставив соответствующее количество ресурсов в каждое место;

- назначение — определить наилучший способ назначения ресурсов задачам;

- задача коммивояжера — определить лучший маршрут среди множества точек, который содержит каждую точку хотя бы один раз.

3.2. Excel Solver

Solver — это плагин для Microsoft Excel для решения задач оптимизационного анализа [20].

Оптимизационный анализ представляет собой более сложное расширение целевого анализа. Вместо того, чтобы устанавливать конкретное целевое значение для переменной, цель состоит в том, чтобы найти оптимальное значение для одной или нескольких целевых переменных при определенных ограничениях. Затем одна или несколько других переменных многократно изменяются с учетом указанных ограничений, пока не будут найдены наилучшие значения для целевых переменных.

В Excel можно использовать Solver, чтобы найти оптимальное значение (максимальное, минимальное, или определенное значение) для формулы в одной ячейке, называемой целевой ячейкой, с учетом определенных ограничений или ограничений для значений других ячеек формулы на листе. Это означает, что Solver работает с группой ячеек, называемых переменными решения, которые используются при вычислении формул в ячейках целей и ограничений. Solver корректирует значения в ячейках переменных решения, чтобы удовлетворить ограничения на ячейки ограничений и получить результат, который вы хотите получить для целевой ячейки.

Solver можно использовать, чтобы найти оптимальные решения для различных проблем, таких как:

- определение ежемесячного ассортимента продукции для подразделения по производству

лекарств, которое максимизирует рентабельность;

- планирование рабочей силы в организации;
- решение транспортных проблем;
- финансовое планирование и бюджетирование.

Методы решения, используемые Solver:

- симплекс-метод. Используется для линейных задач;
- метод обобщенного приведенного градиента. Используется для нелинейных задач;
- эволюционный метод. Используется для нелинейных задач.

3.3. GIBBS

GIBBS — это компьютерная программа комплексного моделирования технологических процессов промышленной подготовки, переработки и транспорта природного и попутного газа, газового конденсата и нефти. Наиболее полный набор моделей позволяет описать свойства сырья и продуктов, определить затраты тепла, энергии, материально-тепловой баланс производства, массовые и объемные выходы и состав продуктов, их соответствие действующим стандартам [21].

Используемые теоретические методы, в основе которых лежат принципы современной технической термодинамики и использование уравнения состояния для расчета фазовых превращений и теплофизических свойств углеводородных смесей, являются универсальными и позволяют моделировать в широком диапазоне условий следующие технологические процессы:

- процессы промышленной подготовки природного газа, включая установки низкотемпературной сепарации и конденсации;
- процессы обработки газа с вводом, сбором и регенерацией ингибиторов гидратообразования;
- процессы промышленной и заводской подготовки и переработки газоконденсата и нефти, включая деэтаннизацию, стабилизацию и фракционирование;
- процессы низкотемпературного выделения сжиженных углеводородных газов, этана, гелия и азота из природного газа, фракционирования смесей легких углеводородов, холодильные циклы, низкотемпературные детандерные заводы;
- процессы сжижения природного газа;
- процессы тепловых станций на водяном паре;
- процессы многофазного транспорта нефтегазоконденсатных смесей, включая транспорт неьютоновских жидкостей и водонефтяных эмульсий;
- процессы аминовой очистки газа от кислых компонентов.

Технологическая модель производства, построенная с помощью GIBBS, позволяет решить проблемы, возникающие на этапе его эксплуатации. Например, почему свойства продукта отличаются от ожидаемых, что делать, если изменилось качество сырья или его состав и т.п.

Пользуясь ПО GIBBS, инженер-технолог не просто работает с изображением технологической схемы. Он может создавать сложные многоуровневые модели производств, объединяющие несколько промыслов и комплексов переработки сырья. Каждый уровень может соответствовать установке, группе установок, заводу, крупному промышленному или заводскому комплексу, и все уровни объединяются в единую блок-схему. Кроме этого, каждый проект в GIBBS может иметь множество вариантов решений, отличающихся набором компонентов и технологическими параметрами.

GIBBS — вычислительная программа, разработанная для Windows-платформ, имеет простой интерфейс. Программа тесно интегрирована с Microsoft Office, но имеет и альтернативный генератор отчетов в виде привычных электронных таблиц. Вся информация системы положена на реляционную основу и для доступа к ней используется хорошо зарекомендовавший себя на задачах подобного класса процессор баз данных Borland Database Engine.

В итоге GIBBS — средство для повышения качества проектирования и эксплуатации нефтяных и газоконденсатных месторождений, определения оптимальных технологических условий промышленной обработки, транспортировки и заводской переработки углеводородного сырья.

3.4. FlexSim

FlexSim — это программный пакет для имитационного моделирования, разработанный FlexSim Software Products, Inc. В семейство продуктов FlexSim входит система общего назначения FlexSim и система моделирования для здравоохранения FlexSim HC [22].

FlexSim используется в различных проектах моделирования, включающих как стандартные, так и гибкие производственные системы. Примеры использования: оптимизация компонентов смеси при производстве кормов, планировании производственных линий, оптимизация сборочных линий электроники, планирование производства стали. FlexSim может использоваться для разработки компьютерных имитационных моделей для приложений Промышленности 4.0.

FlexSim можно расширить с помощью C++, что позволяет интегрировать программное обеспечение в системы, связанные с передачей данных в реальном времени. В одном исследовании FlexSim был интегрирован в динамическую систему приложений, управляемую данными, для

автоматического создания имитационных моделей с помощью языка XML [23].

Стандартная библиотека объектов FlexSim содержит объект робота с 6 осями, способный использовать как предварительно созданную логику движения, так и настраивать пути движения. FlexSim использовался для моделирования и анализа роботизированных ячеек в производственных условиях, включая динамическое планирование и управление роботизированной сборочной ячейкой. Стандартная библиотека объектов также содержит объект крана, предназначенный для имитации кранов с рельсовым управлением, таких как козловые, мостовые или стреловые краны.

В апреле 2009 года компания FlexSim Software Products, Inc. выпустила автономный продукт для моделирования здравоохранения под названием FlexSim HC. Он был разработан как пакет моделирования, ориентированный на моделирование потоков пациентов и других процессов здравоохранения. На практике среда FlexSim HC используется организациями здравоохранения для оценки различных сценариев в их процессах и проверки сценариев перед реализацией. Среда использовалась в различных инициативах по улучшению ухода за пациентами, в том числе в исследованиях для понимания различных вариантов лечения в родовспоможении и привлечения опытных медсестер для лечения несрочных пациентов. Во время пандемии COVID-19 FlexSim HC использовался для анализа усилий по развертыванию вакцинации и улучшения потока пациентов в пунктах вакцинации [24].

В качестве программного обеспечения для моделирования общего назначения FlexSim используется в ряде областей:

- погрузочно-разгрузочные работы: конвейерные системы, упаковка, складирование;
- логистика и распределение: работа контейнерного терминала, проектирование цепочки поставок, рабочий процесс распределительного центра, схема обслуживания и хранения и т. д.;
- транспорт: транспортный поток на автомагистралях, пешеходный поток на транзитных станциях, координация морских судов, прохождение таможи и т. д.;
- прочее: процессы добычи полезных ископаемых, сетевое взаимодействие потоков данных и т. д.

FlexSim включает в себя стандартную библиотеку объектов, каждый из которых содержит предварительно созданную логику и может выполнять задачи для имитации ресурсов, используемых в реальных операциях. Объекты FlexSim делятся на 4 класса: класс фиксированных ресурсов, класс исполнителя задач, класс узлов и

класс визуальных объектов. FlexSim использует объектно-ориентированный дизайн.

Логика модели FlexSim может быть построена с использованием очень небольшого количества компьютерного кода или вообще без него. Большинство стандартных объектов содержат набор раскрывающихся списков, окон свойств и триггеров, которые позволяют пользователю настраивать логику, необходимую для точной модели системы. FlexSim также включает инструмент построения блок-схем для создания логики модели с использованием предварительно созданных блоков действий.

Пользователи могут создавать модели, перетаскивая предопределенные 3D-объекты в «вид модели», чтобы компоновать и связывать модель. Опытные пользователи также могут задавать и изменять параметры и поведение объектов с помощью языков программирования FlexScript и C++.

3.5. MATLAB

MATLAB (сокращение от англ. «Matrix Laboratory») — пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений. Пакет функционирует на большинстве современных операционных систем [25].

Язык MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования. Основной особенностью языка MATLAB являются его широкие возможности по работе с матрицами.

Программы, написанные на MATLAB, бывают двух типов — функции и скрипты. Функции имеют входные и выходные аргументы, а также собственное рабочее пространство для хранения промежуточных результатов вычислений и переменных. Скрипты же используют общее рабочее пространство. Как скрипты, так и функции сохраняются в виде текстовых файлов и динамически компилируются в машинный код. Существует также возможность сохранять т.н. pre-parsed программы — функции и скрипты, обработанные в удобный для машинного исполнения вид. В общем случае такие программы выполняются быстрее обычных.

Пакет MATLAB включает различные интерфейсы (т.н. MATLAB API) для получения доступа к внешним подпрограммам, написанным на других языках программирования, данным, клиентам и серверам, общающимся через технологии Component Object Model или Dynamic Data Exchange, а также периферийным устройствам, которые взаимодействуют напрямую

с MATLAB.

Для MATLAB имеется возможность создавать специальные наборы инструментов, расширяющие его функциональность. Наборы инструментов представляют собой коллекции функций и объектов, написанных на языке MATLAB для решения определённого класса задач. Компания Mathworks предоставляет наборы инструментов, которые используются во многих областях, включая следующие:

- цифровая обработка сигналов, изображений и данных: Signal Processing Toolbox, DSP System Toolbox, Image Processing Toolbox, Wavelet Toolbox, Communications System Toolbox — наборы функций и объектов, позволяющих решать широкий спектр задач обработки сигналов, изображений, проектирования цифровых фильтров и систем связи;

- системы управления: Control Systems Toolbox, Robust Control Toolbox, System Identification Toolbox, Model Predictive Control Toolbox, Model-Based Calibration Toolbox — наборы функций и объектов, облегчающих анализ и синтез динамических систем, проектирование, моделирование и идентификацию систем управления, включая современные алгоритмы управления, такие как робастное управление, H ∞ -управление, ЛМН-синтез, μ -синтез и другие;

- финансовый анализ: Econometrics Toolbox, Financial Instruments Toolbox, Financial Toolbox, Datafeed Toolbox, Trading Toolbox — наборы функций и объектов, позволяющие быстро и эффективно собирать, обрабатывать и передавать различную финансовую информацию;

- анализ и синтез географических карт, включая трёхмерные: Mapping Toolbox;

- сбор и анализ экспериментальных данных: Data Acquisition Toolbox, Image Acquisition Toolbox, Instrument Control Toolbox, OPC Toolbox — наборы функций и объектов, позволяющих сохранять и обрабатывать данные, полученные в ходе экспериментов, в том числе в реальном времени. Поддерживается широкий спектр научного и инженерного измерительного оборудования;

- визуализация и представление данных: Virtual Reality Toolbox — позволяет создавать интерактивные миры и визуализировать научную информацию с помощью технологий виртуальной реальности и языка VRML;

- средства разработки: MATLAB Builder for COM, MATLAB Builder for Excel, MATLAB Builder for NET, MATLAB Compiler, HDL Coder — инструменты, позволяющие создавать независимые приложения из среды MATLAB;

- взаимодействие с внешними программами продуктами: MATLAB Report Generator, Excel Link, Database Toolbox, MATLAB Web

Server, Link for ModelSim — наборы функций, позволяющие сохранять данные различных видов таким образом, чтобы другие программы могли с ними работать;

- базы данных: Database Toolbox — инструменты работы с базами данных;

- научные и математические пакеты: Bioinformatics Toolbox, Curve Fitting Toolbox, Fixed-Point Toolbox, Optimization Toolbox, Global Optimization Toolbox, Partial Differential Equation Toolbox, Statistics And Machine Learning Toolbox, RF Toolbox — наборы специализированных математических функций и объектов, позволяющие решать широкий спектр научных и инженерных задач, включая разработку генетических алгоритмов, решения задач в частных производных, целочисленные проблемы, оптимизацию систем и другие;

- нейронные сети: Neural Network Toolbox — инструменты для синтеза и анализа нейронных сетей;

- нечёткая логика: Fuzzy Logic Toolbox — инструменты для построения и анализа нечётких множеств;

- символьные вычисления: Symbolic Math Toolbox [26] — инструменты для символьных вычислений с возможностью взаимодействия с символьным процессором программы Maple.

Помимо вышеперечисленных, существуют другие наборы инструментов для MATLAB, написанные сторонними компаниями и энтузиастами.

3.6. Simulink

Simulink — среда динамического моделирования сложных технических систем и инструмент для модельно-ориентированного проектирования. Его основным интерфейсом является графический инструмент для построения диаграмм и настраиваемый набор библиотек блоков. Он предлагает тесную интеграцию со средой MATLAB и может либо использовать MATLAB, либо создавать сценарии из него. Simulink широко используется в автоматическом управлении и цифровой обработке сигналов для многодоменного моделирования и проектирования на основе моделей. В сочетании с другими продуктами Simulink может автоматически генерировать исходный код на языке C для реализации систем в режиме реального времени [27].

Simulink предназначен для моделирования и симуляции на системном уровне, что позволяет проводить всестороннее исследование разрабатываемой системы в единой среде проектирования. Моделирование и симуляции позволяют провести проверку поведения системы в критических условиях или аварийных сценариях.

Тем самым происходит снижение затрат на дорогостоящие физические прототипы. Проверка системы осуществляется с помощью полунатурного моделирования и быстрого прототипирования.

Модели Simulink поддерживают автоматическую генерацию кода промышленного качества на языках C, C++ и HDL [28]. Результаты работы сгенерированного кода и модели идентичны. Следующим шагом является развертывание кода на целевом вычислителе или FPGA/ASIC.

Simulink использует преимущества MATLAB. Алгоритмы, созданные в MATLAB, не требуются переделывать для повторного использования в Simulink. Код MATLAB добавляется в блок Simulink или диаграмму Stateflow без изменений. Так же MATLAB используется для создания наборов входных данных для симуляций систем. Симуляции масштабируются на кластеры для ускорения таких инженерных задач как перебор параметров или оптимизация, а затем их результаты анализируются и визуализируются в MATLAB.

3.7. GNU Octave

GNU Octave — свободная программная система с открытым исходным кодом для математических вычислений, использующая совместимый с MATLAB язык высокого уровня [29].

Octave представляет интерактивный командный интерфейс для решения линейных и нелинейных математических задач, а также проведения других численных экспериментов. Кроме того, Octave можно использовать для пакетной обработки. Язык Octave оперирует арифметикой вещественных и комплексных скаляров, векторов и матриц, имеет расширения для решения линейных алгебраических задач, нахождения корней систем нелинейных алгебраических уравнений, работы с полиномами, решения различных дифференциальных уравнений, интегрирования систем дифференциальных и дифференциально-алгебраических уравнений первого порядка, интегрирования функций на конечных и бесконечных интервалах. Этот список можно расширить, используя язык Octave (или используя динамически загружаемые модули, созданные на языках C, C++, Фортран и др.).

3.8. AnyLogic

AnyLogic — инструмент имитационного моделирования для бизнеса для получения детального представления о бизнес-системах и процессах и их оптимизации [30].

AnyLogic позволяет хранить модели в облаке и интегрировать их с оперативными данными, проводить эксперименты и делиться результатами с конечными пользователями, чтобы они

могли сразу применять результаты моделирования для решения текущих задач. Модель в AnyLogic Cloud можно интегрировать в рабочие процессы и использовать для создания цифровых двойников. Для того, чтобы поделиться моделями с клиентами используется готовая облачная среда, благодаря чему для их запуска не нужно устанавливать дополнительное ПО. В AnyLogic Cloud можно управлять доступом к моделям, обновлять их и создавать собственные интерфейсы для моделей. Пользователи могут настроить эксперименты с помощью интерактивных панелей управления, посмотреть анимацию и получить результаты проведенных экспериментов из общей базы данных.

В AnyLogic Cloud можно систематизировать и редактировать данные экспериментов и сценариев, включая версии моделей, параметры запусков и результаты моделирования. Сервис также позволяет визуально сравнивать результаты экспериментов, в том числе разницу ключевых показателей в разных прогонах.

В облачной системе многопрогонные эксперименты выполняются быстрее и эффективнее, чем на обычном персональном компьютере. Сервис оперативно реагирует на потребности в вычислительных мощностях, подключая дополнительные узлы и ядра для выполнения экспериментов. Все эксперименты вместе со входными данными и результатами хранятся в облаке. Если входные данные у запусков одинаковы, AnyLogic Cloud использует предыдущие результаты, ускоряя новый эксперимент и экономя вычислительные ресурсы.

Для визуализации результатов экспериментов в AnyLogic Cloud есть графики и диаграммы, включая продвинутые — например, диаграмма размаха, точечная диаграмма и диаграмма поверхности.

4. Заключение

Развитие информационных технологий привело к использованию новых методов, таких как создание цифровых двойников или использование искусственного интеллекта. Изучение возможностей применения этих методов является одним из направлений исследований.

Использование мощных современных программных средств моделирования, включающих инструменты решения уравнений различного типа, позволяет существенно упростить разработку программных средств автоматизации технологических процессов. Создание моделей вместо использования реальных промышленных объектов снижает трудозатраты, стоимость и безопасность разработки.

В вышеприведенном обзоре рассмотрены как

классические, так и новые методы моделирования в разных видах деятельности, включая производство, медицину и бизнес-процессы. Описано использование различных математических пакетов и систем создания цифровых двойников. Отдельно отмечены проекты с открытым исходным кодом.

Существуют и другие программные продукты для решения различных задач моделиро-

вания, однако, они выходят за рамки данного обзора.

Публикация выполнена в рамках государственного задания по проведению фундаментальных исследований по теме «Исследование и реализация программной платформы для перспективных многоядерных процессоров» (FNEF-2022-002).

Overview of existing solutions in the field of technological process modeling

Yaroslav Zotov

Abstract. The article contains an overview of some existing modeling solutions in some industries. Definitions of digital twins are given. Descriptions of programs implementing the functionality of digital twins, including open source solutions, are given. Some mathematical solutions are described.

Keywords: modeling, digital twin, automated control systems

Литература

1. Aidan Fuller, Zhong Fan, Charles Day. Digital Twin. Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access, 2020.
2. E. Glaessgen, D. Stargel. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 53rd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Honolulu, Hawaii, 2012.
3. Y. Chen. Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers. Engineering, vol. 3, pp. 588-595, 2017.
4. Z. Liu, N. Meyendorf, N. Mrad. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. Annual Review Of Progress In Quantitative Nondestructive Evaluation, Provo, Utah, USA, 2018.
5. Y. Zheng, S. Yang, and H. Cheng. An application framework of digital twin and its case study. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 10, pp. 1141-1153, 2018.
6. R. Vrabić, J. A. Erkoyuncu, P. Butala, R. Roy. Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services. Procedia Manufacturing, vol. 16, pp. 139-146, 2018.
7. A. Madni, C. Madni, S. Lucero. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. Systems, vol. 7, p. 7, 2019.
8. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. 2021.
9. GE Predix [Электронный ресурс] // TAdviser. Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:GE_Predix (Дата обращения: 12.08.2022).
10. Thingworx. The power of now [Электронный ресурс] // PTC Software. Режим доступа: <https://www.ptc.com/-/media/Files/PDFs/ThingWorx/ThingWorx-Overview-Brochure-2.pdf> (Дата обращения: 10.08.2022).
11. Thingworx. Промышленный интернет вещей [Электронный ресурс] // Ирисофт. Режим доступа: <https://www.irisoft.ru/products/thingworx/> (Дата обращения: 12.08.2022).
12. Анонс комплекса для создания цифровых двойников дорожных объектов [Электронный ресурс] // TAdviser. Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%81%D0%BA%D0%B0%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B8> (Дата обращения: 12.08.2022).
13. Zenkit – Your Digital Twin [Электронный ресурс] // Zenkit Suite. Режим доступа: <https://zenkit.com/en/suite/solutions/digital-twin/> (Дата обращения: 12.08.2022).
14. Ansys Twin Builder [Электронный ресурс] // Моделирование и цифровые двойники. Режим доступа: <https://www.cadferm-cis.ru/products/ansys/systems/twinbuilder/> (Дата обращения: 20.08.2022).

-
15. Применение цифрового двойника на примере производства напитков [Электронный ресурс] // Промэнерго Автоматика. Режим доступа: <https://www.siemens-pro.ru/articles/siemens-articles-111.html> (Дата обращения: 20.08.2022).
 16. Nazal Şimşek. 3 Best Use Cases of Digital Twin in Healthcare & Their Benefits [Электронный ресурс] // AIMultiple. Режим доступа: <https://research.aimultiple.com/digital-twin-healthcare/> (Дата обращения: 05.09.2022).
 17. Eclipse Ditto documentation overview [Электронный ресурс] // Eclipse Foundation. Режим доступа: <https://www.eclipse.org/ditto/intro-overview.html> (Дата обращения: 05.09.2022).
 18. About iModel.js [Электронный ресурс] // iTwin.js. Режим доступа: <https://www.itwinjs.org/v1/> (Дата обращения: 05.09.2022).
 19. Boardman. Introduction to Industrial Engineering. Arlington, Mavs Open Press, 2020.
 20. Optimization with Excel Solver [Электронный ресурс] // Simply Easy Learning at your fingertips. Режим доступа: https://www.tutorialspoint.com/excel_data_analysis/advanced_data_analysis_optimization_with_excel_solver.htm (Дата обращения: 20.09.2022).
 21. Что такое GIBBS [Электронный ресурс] // GIBBS. Моделирование в нефтегазовой отрасли. Режим доступа: <http://www.gibbsim.ru/node/10> (Дата обращения: 20.09.2022).
 22. FlexSim The most powerful, capable, and easy-to-use 3D simulation software [Электронный ресурс] // 3D Simulation Modeling and Analysis Software. Режим доступа: <https://www.flexsim.com/flexsim/> (Дата обращения: 20.09.2022).
 23. Krenczyk Damian. Data-driven modelling and simulation for integration of production planning and simulation systems. Selected Engineering Problems (3): 119–122, 2021.
 24. Windsor Matt. Simulations help vaccine rollout and cut the wait in UAB clinics. UAB Reporter. The University of Alabama at Birmingham. 2021.
 25. MATLAB [Электронный ресурс] // MathWorks. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (Дата обращения: 04.10.2022).
 26. A Brief History of MATLAB [Электронный ресурс] // MathWorks. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/a-brief-history-of-matlab.html> (Дата обращения: 05.10.2022).
 27. Simulink [Электронный ресурс] // Exponenta. Режим доступа: <https://exponenta.ru/simulink> (Дата обращения: 05.10.2022).
 28. Simulink – Simulation and Model-Based Design [Электронный ресурс] // MathWorks. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (Дата обращения: 05.10.2022).
 29. GNU Octave [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://octave.org/> (Дата обращения: 05.10.2022).
 30. AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/> (Дата обращения: 05.10.2022).