

Е. В. Орлова, д-р техн. наук, проф., ekorl@mail.ru, Уфимский государственный авиационный технический университет

Системный инжиниринг цифровых двойников организационно-технических систем с использованием методов интеллектуального анализа

Рассмотрена проблема разработки цифровых двойников организационно-технических систем. Предложен методологический подход для организации процесса проектирования цифрового двойника организационно-технических систем, объединяющий этапы проектирования, методы и модели, а также обеспечивающий системный инжиниринг цифрового двойника. Разработана модель поддержки принятия решений для диагностики технического состояния объекта (технического устройства), основанная на методах ситуационного анализа и нечеткой логики, обеспечивающая синтез эффективных решений в различных ситуациях и сочетаниях разнородных факторов, характеризующих объект и его внешнюю среду.

Ключевые слова: цифровой двойник, методы моделирования цифровых двойников, системное проектирование цифровых двойников, методы искусственного интеллекта

Введение

Драйвером инновационного развития высокотехнологичных предприятий в контексте четвертой промышленной революции становится технология "цифровой двойник" (ЦД) как виртуальный прототип реальных производственных процессов, изделий, готовых продуктов. Использование ЦД способствуют росту конкурентоспособности производимых изделий за счет повышения скорости вывода их на рынок. Применение ЦД обеспечивает обоснование решений за счет быстрой проверки изменений, вносимых в конструкцию изделия и его составных частей, в ходе цифровых испытаний.

В России впервые в мире разработана нормативно-техническая документация, регламентирующая процессы разработки и применения ЦД. В 2021 г. принят национальный стандарт "Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения"¹, определяющий общие положения построения и эксплуатации цифровых двойников изделий.

Однако организационно-методическое обеспечение процесса разработки и использования ЦД остается не до конца проработанным с точки зрения согласования задач по описанию объекта

моделирования и управления. Для организации такой работы требуются применение системного подхода и проектирование объекта/процесса, учитывая разные аспекты — выполняемые функции, включая идентификацию и решение возникающих проблемных вопросов в процессе его функционирования, уровень сложности, назначение, этапы жизненного цикла и другие свойства и особенности.

Целью исследования, результаты выполнения которого представлены в статье, является разработка организационно-методического обеспечения проектирования ЦД организационно-технических систем, обеспечивающего системный синтез этапов проектирования, инструментария (методов и моделей) и результатов, направленных на ускоренный инжиниринг ЦД. Такое организационно-методическое обеспечение должно быть также применимо для разработки прототипа ЦД организационно-технических систем на этапе жизненного цикла "создание и разработка" с тем, чтобы исследовать возможные непредвиденные трудности и сбои, а также уменьшить последствия непредвиденных нежелательных состояний систем при их дальнейшей эксплуатации.

Для реализации цели решаются перечисленные далее задачи.

1. Обобщение подходов и методов моделирования и проектирования ЦД организационно-технических систем.

¹ ГОСТ Р 57700.37—2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.

2. Разработка методологии системного инжиниринга ЦД для организации процесса проектирования ЦД организационно-технических систем.

3. В рамках прототипа ЦД построение модели поддержки принятия решений для диагностики технического состояния устройства и принятия решений по устранению его неисправностей на основе методов искусственного интеллекта и нечеткой логики.

1. Методы моделирования и приложения цифровых двойников организационно-технических систем

1.1. Обобщение существующих подходов и методов моделирования цифровых двойников

Можно выделить три группы подходов и методов, используемых для проектирования ЦД:

- методы, основанные на математическом моделировании физических процессов (структурные модели объекта) (*Simulation-Based Digital Twin*) [1–3];
- методы, основанные на данных (*Data-based Digital Twin*) [4, 5];
- гибридные методы (*Hybrid Digital Twin*) [6, 7]

Особенности приведенных методов даны в табл. 1, где обобщены подходы к моделированию в рамках определенных характеристик.

Математическое моделирование обеспечивает отражение в модели физических свойств (принципов функционирования) объекта/процесса. Физическая модель обеспечивает компьютерное моделирование физических процессов, протекающих во времени, а также описание законов их функционирования и связей с внешней средой. Построение таких моделей на практике связано с применением методов математического программирования (исследования операций) [8], имитационного моделирования на основе разных его парадигм и подходов — системно-динамического, дискретно-событийного или агентного моделирования [9].

Математическое моделирование является ключевым компонентом ЦД. Для создания моделей, которые применяются при создании системных моделей, ЦД может использовать результаты детальных трехмерных численных расчетов, выполненных с применением междисциплинарных CAE-решателей. В зависимости от цели математические модели могут быть дескриптивными или оптимизационными. Целью дескриптивных моделей является установление законов изменения параметров модели. Оптимизационная модель обеспечивает поиск экстремума целевой

функции при наличии ограничений с использованием численных методов. В зависимости от степени определенности исходной информации и учета временного фактора могут использоваться методы линейного, нелинейного, стохастического программирования, теоретико-игровые методы, методы нечеткой логики.

Имитационные модели как подкласс математических моделей делятся на статические и динамические; детерминированные и стохастические; дискретные и непрерывные. В непрерывных имитационных моделях переменные изменяются непрерывно, состояние моделируемой системы меняется как непрерывная функция времени, и, как правило, это изменение описывается системами дифференциальных уравнений. В дискретных имитационных моделях переменные изменяются дискретно в определенные моменты имитационного времени (наступления событий). Динамика дискретных моделей представляет собой процесс перехода от момента наступления очередного события к моменту наступления следующего события.

Моделирование, основанное на данных, включает в себя методы интеллектуального анализа данных, искусственного интеллекта, Big Data and Advanced Analytics. Каждый из этих методов предъявляет особые требования к необходимым вычислительным ресурсам. Например, методы интеллектуального анализа данных требуют хранения большого объема с высокой пропускной способностью для сбора и получения доступа к аналитическим данным, а также высокой масштабируемости вычислительной системы для их обработки; для применения методов машинного обучения требуются узлы с установленными графическими ускорителями.

Модели на основе интеллектуального анализа данных (*Data Mining*) применяют для обнаружения в данных ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия стратегически важных решений. Искусственный интеллект и машинное обучение эффективно используются в задачах прогнозирования в ЦД. Применение этих методов позволяет достичь уровня прогностической точности выше, чем на базе традиционных методов имитационного моделирования [10].

Использование "больших данных" имеет свои ограничения, связанные с неполными или зашумленными данными, трудностями в предсказании редких событий. Методы экстраполяции не позволяют сделать такие предсказания. Установка и обслуживание датчиков стоят недешево, датчики подвержены ошибкам и сбоям, могут давать не-

Сравнительный анализ моделей цифровых двойников организационно-технических систем

Характеристика	Подход к моделированию		
	Математическое моделирование	Моделирование, основанное на данных	Гибридное моделирование
Способ описания системы	Описывает законы функционирования объекта (процесса) и его связи с внешней средой. Моделируется поведение системы, выявляются причинно-следственные связи и закономерности	Строится на основании имеющихся эмпирических данных с применением инструментов машинного обучения. Задача построения модели сводится к подбору параметров модели и композиции функций из некоторого семейства	Строится на основе законов функционирования и настраивается (адаптируется) с учетом эмпирических данных
Принцип моделирования	Модель "белого ящика", моделирование причинно-следственных связей	Модель "черного ящика", моделирование корреляций	Модель "серого ящика"
Направление моделирования	Сверху вниз	Снизу вверх	Сверху вниз, снизу вверх
Описание и степень определенности информации	Неопределенность информации контролируется входными данными и точностью моделирования. Описание — детерминированное, вероятностное	Вероятностное описание информации на основе распределений данных в обучающих выборках	Детерминированное, вероятностное
Методы моделирования	Численные методы, методы исследования операций, методы имитационного и ситуационного моделирования	Статистические методы, методы экстраполяции, методы машинного обучения, методы аналитики больших данных	Междисциплинарные модели
Прогностическая способность	Прогнозирование в широких интервалах значений параметров, описываемых моделью	Трудность в предсказании редких событий, а также в условиях неполных данных и зашумленной информации, а также за пределами обучающих выборок	Высокая прогностическая способность в пределах штатных/внештатных ситуаций
Приоритетный подход к принятию решений и управлению	Принятие решений основано на анализе совокупной производительности (эффективности) системы. Формирование управленческих решений на основе решения обратных задач	Принятие решений основано на анализе данных мониторинга, диагностики. Формирование управленческих решений на основе прогнозирования и решения прямых задач	Решение как прямых, так и обратных задач управления
Тип системы управления	Управление по отклонению, управление с адаптацией	Управление по отклонению, управление с адаптацией	Управление по отклонению с учетом слабых сигналов среды; рефлексивное управление
Этап жизненного цикла системы	Все стадии	Эксплуатация	Рост, стабильность
Схема работы	Численное моделирование + датчики → сбор данных → IIoT*-платформа	Датчики + IIoT-платформа → сбор данных → аналитика данных	Математическое моделирование + датчики → сбор данных → IIoT-платформа → аналитика
Инструментальные средства	Matlab Simulink, ANSYS, AnyLogic, Ithink и др.	R, Python, Statistica, GPSS и др.	Междисциплинарные платформы
* IIoT — Industrial Internet of Things.			

правильные показания, а результаты могут перегружать пользователей избыточной информацией.

Без структурной (математической, физической) модели трудно определить области технических устройств, где целесообразно располагать датчики. Сбор исходных данных с датчиков является только частью процесса моделирования. На этапе, когда появляется обратная задача, т. е. когда необходимо на основе данных, полученных с датчиков, восстановить картину происходящего, без математической модели эта задача оказывается трудноразрешимой, так как большинство собранных данных является непригодными, "мусорными", из которых очень сложно выделить содержательную часть, адекватно описывающую объект (процесс).

При этом математическое моделирование объектов (процессов) в сочетании с моделями, основанными на данных, дает больше возможностей для прогнозирования, чем модели, основанные только на базе технологий машинного обучения. Моделирование, основанное на данных, как правило, ограничено лишь этапом эксплуатации изделия. Математические модели, основанные на физических процессах, более перспективны в задачах ситуационного анализа и для принятия решений в условиях, заданных выражением "что будет, если?". Кроме этого, гибридные модели могут использоваться в неповторяющихся ситуациях, когда нет достаточных данных для применения статистических методов.

На базе дополнительной информации, полученной на этапе эксплуатации, повышается уровень адекватности гибридной модели, т. е. ЦД обучается и позволяет в дальнейшем прогнозировать уровень возможных отклонений от штатных режимов, повреждений оборудования или оценить его остаточный ресурс [7].

Следует отметить, что на разных этапах создания цифровой модели объекта существует разный объем данных о поведении физического объекта. На этапе разработки данных от реального объекта нет, поскольку нет самого физического изделия (продукта), и данные об объекте могут быть получены только на основе моделирования физических процессов, определяющих создание и функционирование будущего изделия. По мере накопления данных об изделии, последние все в большей мере могут использоваться для построения аналитических моделей. На этапе тестирования и эксплуатации готового изделия появляется его "цифровая тень". Математическая модель на базе физических процессов может создаваться до этапа создания реального объекта и предсказывать его поведение в широких пределах при изменении краевых условий задачи численного моделирования.

Представленное обобщение существующих подходов проектирования ЦД организационно-технических систем позволяет, с одной стороны, систематизировать методы и модели, используемые для построения ЦД таких систем с учетом требований к системе управления описания неопределенности параметров системы, стадии ее жизненного цикла и других существенных свойств, а, с другой стороны, осуществлять выбор инструментария моделирования, адекватного объекту управления и его особенностям.

Цифровые двойники с высоким уровнем адекватности должны комбинировать как модели физических процессов, так и модели, основанные на данных. Умные ЦД с интеллектуальным управлением должны совмещать оба подхода, усиливая преимущества каждого из них.

1.2. Приложения цифровых двойников

Использование и сфера приложений ЦД очень широки. Они используются в разнообразных организационно-технических системах: в тяжелом машиностроении [11–13], в автомобилестроении [14] и судостроении [15], в области атомной энергетики [16], в авиакосмической [17, 18] и нефтегазовой отраслях [19], в архитектурном проектировании и создании "умных" городов [20], в сельском хозяйстве, а также их применяют для повышения операционной эффективности при производстве потребительских товаров [3], точности диагностики и принятии решений в здравоохранении [21, 22], для привлечения клиентов и кастомизации услуг в финансовом секторе [23] и в ретейле [24], для организации логистических процессов и цепочек поставок [25], в региональном и муниципальном менеджменте [26, 27].

Востребованность и спектр применения ЦД расширяются. Так как их разработка и реализация базируются на ряде стремительно развивающихся технологий, то развитие ЦД напрямую зависит от роста возможностей этих технологий. Это обусловлено перечисленными далее факторами.

1. Развитием квантовых технологий и ростом быстродействия вычислительных систем [28, 29]. С переходом к квантовым вычислениям прогнозируется качественный скачок быстродействия аппаратных систем в ближайшее десятилетие. Это обстоятельство позволит выполнять численный анализ на основе уже существующих (и более сложных) моделей за время, приемлемое для оперативного взаимодействия физического объекта и его цифровой копии. Сегодня компании работают над разработкой и использованием квантовых алгоритмов для моделирования сложных физи-

ческих процессов. Переход к таким технологиям позволит ускорить решение задач, основанных на численном моделировании, обеспечивая требуемую точность алгоритмов в условиях доступных вычислительных ресурсов (задачи многопараметрической оптимизации и др.).

2. Развитием технологии 5G [30—32]. Эта технология обладает более высокой пропускной способностью, меньшим временем задержки, меньшим расходом энергии батарей IoT-датчиков. Это обеспечивает рост скорости передачи сигналов между физическим объектом и его ЦД. Применение сетей 5G позволит сконструировать сервисы виртуальной реальности в составе ЦД и сделать доступной виртуальную верификацию и валидацию готовых продуктов.

3. Развитие технологии сильного искусственного интеллекта [33, 34] позволят строить ЦД, в которых роль человека в принятии управленческих решений будет сведена к минимуму. Цифровые двойники смогут обеспечить принятие решений автономно, координировать эти решения с другими ЦД, выполнять самотестирование и диагностику с последующим устранением неисправностей. Такие системы поддержки принятия решения на базе ЦД обеспечат принятие сложных решений в агрессивных и опасных средах без присутствия человека.

2. Методология системного инжиниринга и проектирования цифровых двойников организационно-технических систем

Процесс построения ЦД является многостадийным и состоит из следующих стадий: концептуализация, проектирование, цифровое моделирование и технологические испытания (рис. 1).

Цифровой двойник определяется как система, состоящая из цифровой модели физического объекта и двусторонних информационных связей с физическим объектом или его компонентами. В основе ЦД лежит цифровая модель в виде математических и компьютерных моделей, а также

документов, описывающих структуру, функциональные возможности и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого объекта на разных этапах его жизненного цикла. По результатам цифровых или иных испытаний проводится оценка соответствия готовой продукции определенным требованиям. Цифровая модель описывает структуру, функции и поведение разрабатываемого физического объекта. Содержание и функциональность цифровой модели зависят от стадии жизненного цикла физического объекта. Оценка соответствия цифровой модели физического объекта включает процедуры проверки и валидации математических и компьютерных моделей.

Организационно-методическое обеспечение процесса разработки и использования ЦД является не до конца проработанным с точки зрения согласования задач по описанию объекта моделирования и управления (физического объекта), в том числе структурного, функционального, информационного, а также формирования работ в рамках методологии управления проектами (в том числе гибкой методологии Agile, Scrum-подхода и др.). Для восполнения этого пробела предлагается сформировать план работ по этапам в виде триады: задача этапа — содержание этапа — результаты этапа. Для организации такой работы требуются применение системного подхода и проектирование всех этапов жизненного цикла объекта, включая идентификацию и решение возникающих проблем в процессе его функционирования.

Автором настоящей статьи разработана методология, обеспечивающая организационно-методическую поддержку процесса разработки и эксплуатации ЦД организационно-технической системы, представленная в табл. 2. Организация процесса проектирования объединяет этапы его проектирования, методы и модели, а также обеспечивает ускоренный инжиниринг ЦД.

Принципиально важно, что предлагаемая методология учитывает специфику объекта управления — организационно-технической системы как

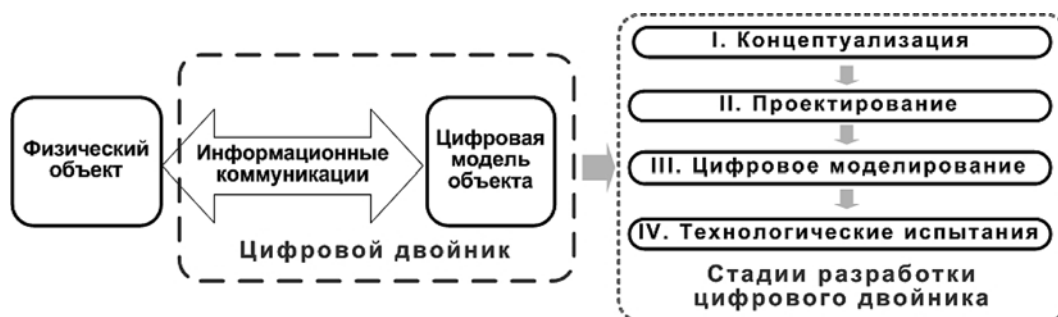


Рис. 1. Цифровой двойник и стадии его разработки

Методология разработки цифрового двойника объекта (процесса)

Стадия	Этап и задача этапа	Содержание этапа	Результаты этапа
1. Концептуализация	1.1. Выявление противоречий	1.1.1. Мониторинг и анализ противоречий между текущим и желаемым состояниями объекта	Противоречия, проблемы
	1.2. Определение целей и выбор критериев	1.1.2. Формулировка целей развития объекта	Цели, критерии эффективности результатов функционирования объекта
2. Проектирование	2.1. Декомпозиция (ска-нирование) объекта	2.1.1. Сбор исходной информации об объекте моделирования	Статистическая информация. Обзор литературы
		2.1.2. Статистический анализ состояния и динамики развития объекта моделирования на основе причинного и факторного анализа	Основные тренды и факторы влияния
		2.1.3. Функциональная, структурная, информационная декомпозиция объекта, декомпозиция по жизненному циклу (на основе SADT-, ARIS-, BPMN-методологии)	Функциональная модель Организационная модель Информационная модель Модель жизненного цикла
	2.2. Анализ окружения объекта	2.2.1. Анализ факторов внешней и внутренней среды, оказывающих влияние на функционирование объекта, на основе STEP- и SWOT-анализа	Ранжирование факторов по степени важности
		2.2.2. Определение возможных перспектив развития объекта на основе Delphi-анализа	Прогнозные оценки результатов, сроков, положения научных результатов и мероприятий поддержки внедрения новых разработок. Выбор важнейших направлений исследований
		2.2.3. Построение Wild-карт	Определение возможных событий, которые могут кардинально изменить вероятный ход событий
		2.2.4. Выявление стейкхолдеров и построение дорожной карты	Матрицы стейкхолдеров, дорожная карта для среднесрочного развития объекта
	2.3. Синтез альтернативных решений проблем (на качественном уровне)	2.3.1. Описание результатов проекта в терминах существующих сильных и слабых сторон и будущих возможностей и угроз на базе SWOT-анализа	Альтернативы решения проблем
		2.3.2. Определение альтернативных путей достижения целей на основе сценарного анализа	Описание представления системы (объекта) в будущем
3. Цифровое моделирование	3.1. Выбор средств математического и компьютерного моделирования и защиты данных	3.1.1. Обоснование выбора математических методов и моделей формализации объекта	Математические методы формализации объекта
		3.1.2. Обоснование выбора программного обеспечения	Программное обеспечение
	3.2. Построение математической модели (моделирование, оценка и оптимизация)	3.2.1. Построение математической модели объекта, валидация и оценка адекватности	Математическая модель объекта
		3.2.2. Решение задачи синтеза оптимальных решений. Исследование устойчивости и адекватности решений	Оптимальные решения
	3.3. Построение компьютерной модели	3.3.1. Написание исходного кода программы	Первичный программный код
		3.3.2. Отладка, тестирование, верификация кода на исходных данных	Компьютерная модель объекта
	3.4. Построение системы поддержки принятия решений	3.4.1. Бесшовная интеграция блока управления в цифровую модель ЦД	Система поддержки принятия решений

Стадия	Этап и задача этапа	Содержание этапа	Результаты этапа
4. Технологические испытания	4.1. Построение виртуального полигона и проведение стендовых экспериментов	4.1.1. Формирование испытательного стенда	Виртуальный полигон: система для проведения стендовых испытаний (технические средства, программное, методическое и организационное обеспечение)
		4.1.2. Проведение виртуальных экспериментов	Количественные и качественные характеристики объекта в результате экспериментов

системы междисциплинарной природы, объединяющей техническую (производственную) систему и организационную систему (человека). Организационно-техническая система имеет следующие особенности:

- самостоятельное целеполагание, целенаправленность поведения, в результате чего может возникнуть сознательное искажение информации, невыполнение требуемых обязательств;
- рефлексия и прогнозирование поведения объекта/субъекта управления;
- ограниченная рациональность, в результате чего обеспечивается принятие решений в условиях неопределенности и ограничений на объем обрабатываемой информации.

Предложенный методологический подход позволит, во-первых, осуществлять системный анализ объекта моделирования и управления с учетом неопределенности внешней среды на базе разнородных инструментальных средств качественного и количественного анализа. Во-вторых, он предоставит возможность сформировать адекватную математическую модель объекта с учетом результатов этапа концептуализации и выработать компьютерную модель и осуществить ее испытания. В-третьих, этот подход может явиться основанием для построения ЦД объекта/процесса и формирования системы поддержки принятия решений.

При рассмотрении физического объекта на стадии "разработка" его жизненного цикла необходим прототип ЦД, содержащий необходимые компоненты для описания и создания физической версии объекта. На этом этапе задача состоит также в том, чтобы предвидеть возможные состояния объекта и разработать систему поддержки принятия решений для нейтрализации последствий непредвиденных и нежелательных событий.

В отличие от традиционных подходов, сводящихся к проверке и подтверждению требований к разрабатываемому объекту, а также устранению проблем и сбоев для прогнозируемых состояний объекта, прототип ЦД может помочь выявлению и устранению непредвиденных нежелательных состояний. Эта задача решается на основе изменения

параметров моделирования в возможных пределах и исследования множества различных ситуаций и разнообразных поведенческих паттернов, которые могут привести к серьезным катастрофическим проблемам. Такое моделирование позволит спроектировать физический объект в виртуальном пространстве с набором новых возможностей и значительно уменьшить риски нежелательного и непредсказуемого поведения объекта, а также устранить негативные последствия таких рисков.

В данной работе рассмотрены только следующие стадии построения ЦД: конструирование и проектирование, стадии 1–2, а также этап 3.4 "Разработка системы поддержки принятия решений". В этом контексте схема функционирования предложенного методологического подхода включает следующие шаги. Сначала необходимо провести идентификацию проблем и описать противоречия, которые возникают при разработке и внедрении ЦД в промышленность. Далее следует определить цели внедрения ЦД, поставить задачи исходя из этой цели и описать проект. На втором шаге происходит декомпозиция проектируемого физического объекта. Описываются функции и свойства, а также технические параметры. Далее строятся его структурная и функциональная модели. Третий шаг посвящен анализу внешней среды функционирования объекта. С помощью STEP- и SWOT-анализа определяются угрозы и возможности внешней среды и экспертная оценка их влияния на эффективность ЦД. На четвертом шаге осуществляется построение системы поддержки принятия решений при возникновении неисправностей системы на основе выбранной математической модели и проводятся имитационные эксперименты.

3. Численный пример разработки прототипа цифрового двойника

В качестве примера рассмотрим техническое устройство — инкубатор интенсивной терапии новорожденных с микропроцессорным управлением мониторинга параметров температуры, кон-



Рис. 2. Структурная схема технического устройства

центрации кислорода, влажности воздуха, температуры и массы тела новорожденного (аналог ИДН-03-"УОМЗ" [35]). Инкубатор предназначен для выхаживания и проведения интенсивной терапии новорожденных, в том числе недоношенных с критически малой массой (от 500 г). Инкубатор обеспечивает регулируемый приток теплоты, требуемую влажность воздуха и концентрацию кислорода в детском модуле, контроль массы тела.

Сначала сформируем структурную и функциональную модели устройства. Структурная схема представлена на рис. 2 и состоит из системы датчиков, системы управления оборудованием, системы регулирования температуры и подачи кислорода¹. Наблюдаемыми параметрами устройства являются: а) температура воздуха; б) температура кожи; в) относительная влажность воздуха; г) концентрация кислорода; д) масса тела.

Построение функциональной модели позволяет четко зафиксировать, какие процессы осуществ-

ляются, какие информационные объекты используются при выполнении функций различного уровня детализации. Модель показывает зоны ответственности исполнителей процесса и ход самого процесса, связи процессов между собой и результаты выполнения процессов. Функциональная модель является основой для выявления проблем и "узких" мест функционирования прибора.

Функциональная модель процесса функционирования инкубатора формируется на основе нотации системного моделирования бизнес-процессов IDEF0. На рис. 3 продемонстрирован первый уровень декомпозиции и отражены выполняемые функции прибора.

На следующем шаге формируется диаграмма причинно-следственных связей факторов для выявления возможных причин неисправностей оборудования. Выявлено, что основными источниками возникновения неисправности инкубатора являются следующие шесть факторов: 1) медицинский персонал; 2) технический персонал; 3) внешняя среда; 4) система датчиков; 5) система управления; 6) система питания. На диаграмме представлена декомпозиция этих факторов в виде проблем, которые, действуя изолированно или совместно, могут повлечь неисправность оборудования (рис. 4).

4. Модель поддержки принятия решений для диагностики технического состояния оборудования на основе методов нечеткой логики

Выявленные проблемы и возможные причины неисправности оборудования показывают, что

¹ В систему датчиков устройства входят: датчики температуры воздуха (основной и дополнительный); датчики температуры кожи (основной и дополнительный); датчики влажности (регулирующий и отображающий); датчики концентрации кислорода (регулирующий и отображающий). Регулирование температуры, влажности и концентрации кислорода осуществляется с помощью системы принудительной циркуляции воздуха. В инкубаторе применяются два режима автоматического регулирования температуры: по воздуху и по коже ребенка. Система сигнализации состоит из динамиков, индикатора центральной сигнализации, красного индикатора тревоги и красного индикатора нарушения подачи электроэнергии. Электромагнитный клапан предназначен для насыщения воздуха кислородом. Поступающий в систему подачи воздуха кислород нагревается и увлажняется вместе с воздухом.

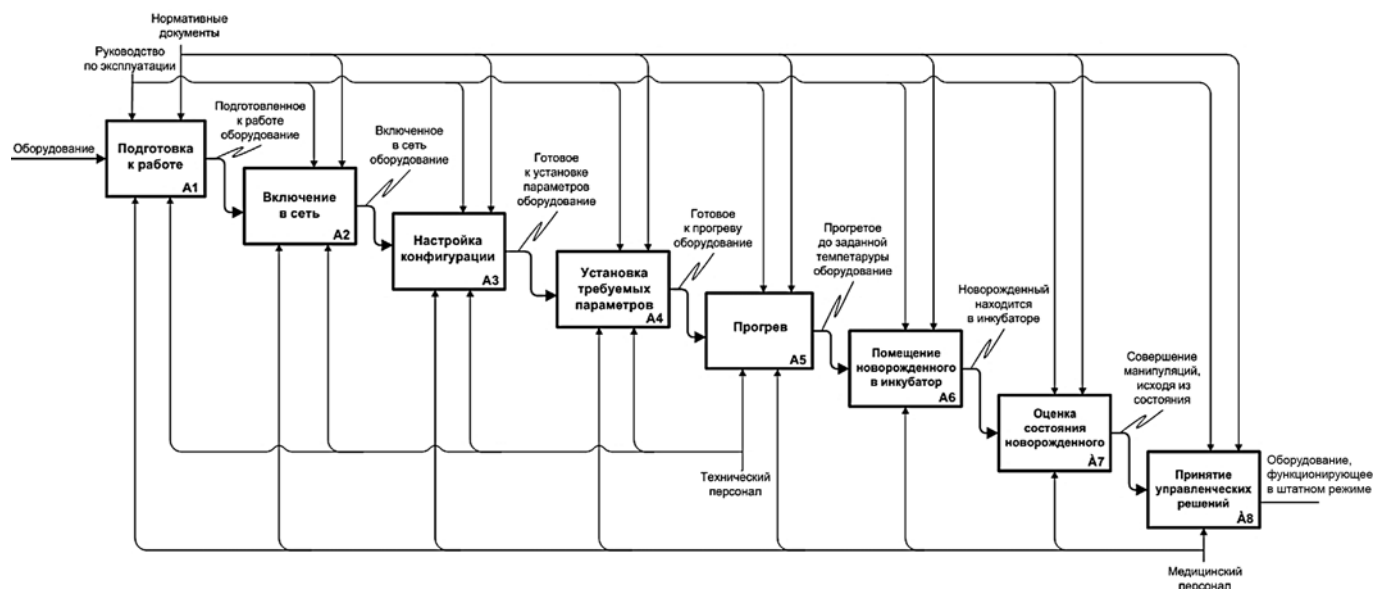


Рис. 3. Функциональная схема работы технического устройства (первый уровень декомпозиции)

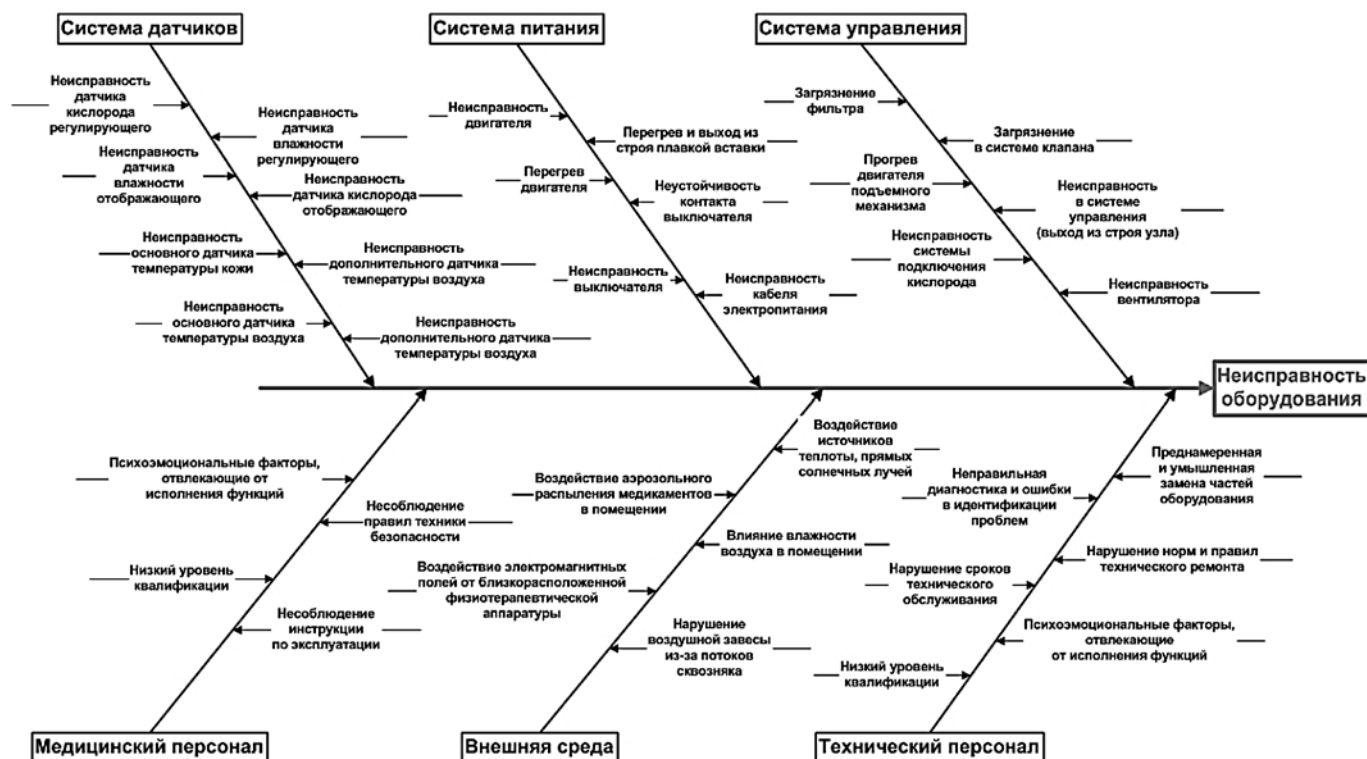


Рис. 4. Диаграмма причинно-следственных связей факторов появления неисправностей

ряд факторов и причин описываются не в количественной, а в качественной форме. Поэтому требуется система поддержки принятия решений, которая учитывает разные шкалы измерения моделируемых свойств оборудования. Задачи такого типа можно решать с применением методов искусственного интеллекта и моделей нечеткой логики.

Категория технического состояния зависит от большого числа факторов, как качественных, так и количественных. Разработанная модель рассматривает факторы неисправности, которые связаны с внутренним техническим состоянием самого оборудования. Исследуются неисправности, связанные с двигателем детского модуля, кабелем

электропитания, системой подключения кислорода, системой клапана, крыльчаткой вентилятора, датчиком влажности, датчиками температуры кожи основным и дополнительным и т. д.

Реализация процесса нечеткого моделирования проводится посредством применения модуля Fuzzy Logic Toolbox программного средства MATLAB. Выполнение нечеткого вывода реализуется на основе алгоритма Мамдани (*Mamdani*).

Для решения задачи диагностики технического состояния оборудования требуется качественное ее описание на основе лингвистических выражений (логических правил). Используются 25 входных переменных, отражающих состояние

подсистем оборудования, детерминирующих одно из четырех возможных решений по действию с оборудованием — вывести из эксплуатации, провести ремонт, провести дополнительную подготовку к работе, оставить в эксплуатации (табл. 3).

Лингвистические переменные и область их возможных значений показаны в табл. 4.

Функции принадлежности для лингвистических переменных представлены на рис. 5, см. четвертую сторону обложки.

База правил для принятия решений по техническому состоянию и действию с оборудованием при возникновении неисправностей определяется

Таблица 3

Описание входных и выходных переменных

Обозначение переменной	Описание	Принимаемые значения
Тип переменной — входная		
I_1	Регулирование положения детского модуля по высоте	Невозможно, возможно
I_2	Приведение детского модуля в наклонное положение	Невозможно, возможно
I_3	Двигатель детского модуля	Неисправен, перегрев, исправен
I_4	Выключатель механизма детского модуля	Неисправен, исправен
I_5	Механизм регулирования положения детского модуля по высоте	Отключается, не отключается
I_6	Температура воздуха под колпаком	Пониженная, нормальная, повышенная
I_7	Фильтр	Грязный, чистый
I_8	Срок установки фильтра	Более 3 месяцев, менее 3 месяцев
I_9	Вода в баке увлажняющей системы	Отсутствует, присутствует
I_{10}	Система клапана	Загрязнена, чистая
I_{11}	Индикатор	Красный, сеть, центральной сигнализации
I_{12}	Кабель электропитания	Не присоединен, присоединен
I_{13}	Звуковой сигнал	"3", "2", прерывистый, непрерывный
I_{14}	Крыльчатка вентилятора	Установлена неправильно, установлена правильно
I_{15}	Вентилятор	Неисправен, исправен
I_{16}	Датчик влажности отображающий	Неисправен, исправен
I_{17}	Датчик влажности регулирующий	Неисправен, исправен
I_{18}	Датчик температуры кожи основной	Неисправен, исправен, не присоединен, присоединен
I_{19}	Датчик температуры кожи дополнительный	Неисправен, исправен, не присоединен, присоединен
I_{20}	Концентрация кислорода воздуха	Низкая, средняя, высокая
I_{21}	Система подключения кислорода	Неисправна, исправна
I_{22}	Система управления	Неисправна, исправна
I_{23}	Моральный износ	Отсутствует, присутствует
I_{24}	Физический износ	Неустранимый, устранимый
I_{25}	Плавкая вставка	Перегорела, не перегорела
Тип переменной — выходная		
O_1	Техническое состояние и действие с оборудованием	Вывести из эксплуатации, провести ремонт, провести дополнительную подготовку к работе, оставить в эксплуатации

Описание лингвистических переменных

Переменная	Значение переменной	Диапазон значений
$I_1, I_2, I_4, I_5, I_7, I_8, I_9, I_{10}, I_{12}, I_{14}, I_{15}, I_{16}, I_{17}, I_{21}, I_{22}, I_{23}, I_{25}$	"Невозможно", "Неисправен", "Не отключается", "Грязный", "Более 3 месяцев", "Отсутствует", "Не присоединен", "Установлена неправильно", "Не устраняется"	(0; 0,35; 0,7)
$I_1, I_2, I_4, I_5, I_7, I_8, I_9, I_{10}, I_{12}, I_{14}, I_{15}, I_{16}, I_{17}, I_{21}, I_{22}, I_{23}, I_{25}$	"Возможно", "Исправен", "Отключается", "Чистый", "Менее 3 месяцев", "Присутствует", "Присоединен", "Установлена правильно", "Устраняется"	(0,4; 0,7; 1)
I_3, I_6, I_{11}, I_{20}	"Пониженная", "Красный", "Низкая", "Неисправность"	(0; 0,2; 0,4)
I_3, I_6, I_{11}, I_{20}	"Нормальная", "Сеть", "Средняя", "Перегрев"	(0,3; 0,5; 0,7)
I_3, I_6, I_{11}, I_{20}	"Повышенная", "Высокая", "Центральной сигнализации", "Исправность"	(0,6; 0,8; 1)
$I_{13}, I_{18}, I_{19}, O_1$	"Вывести из эксплуатации", "Неисправен"	(0; 0,175; 0,35)
$I_{13}, I_{18}, I_{19}, O_1$	"Провести ремонт", "Исправен"	(0,2; 0,375; 0,55)
$I_{13}, I_{18}, I_{19}, O_1$	"Прерывистый", "Провести дополнительную подготовку к работе", "Не присоединен"	(0,4; 0,575; 0,75)
$I_{13}, I_{18}, I_{19}, O_1$	"Непрерывный", "Оставить в эксплуатации", "Присоединен"	(0,65; 0,825; 1)

с помощью набора продукционных правил вида If-Then (выборочно):

— If (I_1 is "возможно") and (I_2 is "возможно") and (I_3 is "исправность") and (I_4 is "неисправен") and (I_5 is "не отключается") then (O_1 is "провести ремонт");

— If (I_1 is "возможно") and (I_2 is "возможно") and (I_3 is "исправность") and (I_4 is "исправен") and (I_5 is "отключается") then (O_1 is "оставить в эксплуатации");

— If (I_7 is "чистый") and (I_9 is "присутствует") then (O_1 is "оставить в эксплуатации");

— If (I_{11} is "красный") and (I_{13} is "2") and (I_{20} is "низкая") and (I_{21} is "исправна") then (O_1 is "провести ремонт");

— If (I_{11} is "красный") and (I_{13} is "2") and (I_{20} is "низкая") and (I_{21} is "исправна") then (O_1 is "провести дополнительную подготовку к работе");

— If (I_{20} is "средняя") and (I_{21} is "исправна") then (O_1 is "оставить в эксплуатации");

— If (I_{11} is "центральной сигнализации") and (I_{13} is "3") and (I_{20} is "средняя") and (I_{22} is "неисправна") then (O_1 is "провести ремонт");

— If (I_{23} is "присутствует") and (I_{24} is "неустрашимый") then (O_1 is "вывести из эксплуатации");

— If (I_{23} is "отсутствует") and (I_{24} is "неустрашимый") then (O_1 is "вывести из эксплуатации");

— If (I_1 is "невозможно") and (I_2 is "возможно") and (I_3 is "перегрев") and (I_4 is "исправен") and (I_5 is "отключается") then (O_1 is "провести дополнительную подготовку к работе").

Аккумуляция заключения по всем правилам проведена с применением операции тахидизъюнкции. При дефазификации использован метод центра тяжести. Реализуя систему нечет-

кого вывода на этапе дефазификации, получим решение по режиму эксплуатации оборудования при возникновении неисправностей в условиях известных входных данных.

Для анализа, учета и принятия решений по идентификации технического состоянию и действию с оборудованием в условиях различных ситуаций, определяемых сочетанием входных переменных, проведен ситуационный анализ. Рассматриваются многовариантные ситуации с разным набором сочетаний входных факторов следующих типов: 1) горит световой индикатор "сеть", звучит непрерывный сигнал; 2) мигает красный индикатор тревоги, звучит звуковой сигнал "3"; 3) не функционирует детский модуль. Выборочные результаты моделирования решений по этим ситуациям представлены в табл. 5.

В ситуации, при которой горит световой индикатор "сеть"; звучит непрерывный сигнал и плавающая вставка перегорела, требуется срочный ремонт оборудования. Если мигает красный индикатор тревоги, звучит звуковой сигнал "3" и датчик температуры кожи основной присоединен, а датчик температуры кожи дополнительный не присоединен, необходимо провести дополнительную подготовку оборудования к работе. Если механизм регулирования положения детского модуля по высоте не отключается и выключатель неисправен и двигатель модуля неисправен, то необходимо вывести оборудование из эксплуатации.

Разработанная модель принятия решений по выявлению и устранению неисправностей оборудования в составе его ЦД учитывает изменения внутренних и внешних факторов функционирования оборудования и позволяет в кратчайшие

Результаты ситуационного анализа

Ситуации типа 1		Входные переменные					Выходная переменная
		I_{11}	I_{13}	I_{12}	I_{25}	Все остальные	
1. Горит световой индикатор "сеть"; звучит непрерывный сигнал	1.1. Кабель электропитания не присоединен	0,5	0,8	0,2	0,7	0,7	0,59
	1.2. Кабель электропитания присоединен	0,5	0,8	0,8	0,8	0,7	0,92
	1.3. Плавкая вставка перегорела	0,5	0,8	0,1	0,35	0,7	0,376
	1.4. Плавкая вставка не перегорела	0,5	0,8	0,9	0,2	0,7	0,95
Ситуации типа 2		Входные переменные					Выходная переменная
		I_{11}	I_{13}	I_{18}	I_{19}	Все остальные	
2. Мигает красный индикатор тревоги, звучит звуковой сигнал "3"	2.1. Датчик температуры кожи основной не присоединен, датчик температуры кожи дополнительный присоединен	0,1	0,3	0,5	0,8	0,6	0,74
	2.2. Датчик температуры кожи основной присоединен, датчик температуры кожи дополнительный не присоединен	0,1	0,3	0,9	0,6	0,6	0,65
	2.3. Датчик температуры кожи основной не присоединен, датчик температуры кожи дополнительный не присоединен	0,1	0,3	0,7	0,55	0,6	0,574
	2.4. Датчик температуры кожи основной неисправен, датчик температуры кожи дополнительный неисправен	0,1	0,3	0,1	0,2	0,6	0,454
	2.5. Датчик температуры кожи основной исправен, датчик температуры кожи дополнительный неисправен	0,1	0,3	0,35	0,1	0,6	0,89
	2.6. Датчик температуры кожи основной неисправен, датчик температуры кожи дополнительный исправен	0,1	0,3	0,3	0,4	0,6	0,95
Ситуации типа 3		Входные переменные					Выходная переменная
		I_1	I_2	I_3	I_4	I_5 Все остальные	
3. Не функционирует детский модуль	3.1. Механизм регулирования положения детского модуля по высоте не отключается, выключатель не исправен, двигатель исправен	1	1	0,7	0,2	0,4	0,464
	3.2. Механизм регулирования положения детского модуля по высоте не отключается, выключатель исправен, двигатель неисправен	1	1	0,1	0,7	0,3	0,52
	3.3. Механизм регулирования положения детского модуля по высоте не отключается, выключатель неисправен, двигатель неисправен	1	1	0,3	0,5	0,2	0,34
	3.4. Регулирование положения детского модуля по высоте невозможно, перегрев двигателя	0,25	1	0,5	0,9	1	0,62
	3.5. Регулирование положения детского модуля по высоте невозможно, двигатель не исправен	0,3	1	0,1	0,9	1	0,376
	3.6. Регулирование положения детского модуля по высоте невозможно, двигатель исправен	0,1	1	0,8	0,9	1	0,75
	3.7. Приведение детского модуля в наклонное положение невозможно, двигатель неисправен	1	0,5	0,2	1	0,8	0,45
	3.8. Приведение детского модуля в наклонное положение невозможно, перегрев двигателя	1	0,2	0,6	1	0,8	0,68
	3.9. Приведение детского модуля в наклонное положение невозможно, двигатель исправен	1	0,6	0,9	1	0,8	0,7

сроки идентифицировать причину неисправности и выработать решение по быстрому переводу оборудования в штатный режим работы. Такие меры позволят сократить простои, уменьшить затраты на ремонтные работы и повысить операционную эффективность оборудования.

Заключение

В работе проведена систематизация подходов, методов проектирования и моделей ЦД организационно-технических систем. Предложенное обобщение этих подходов может быть полезным для выбора инструментария моделирования, адекватного объекту управления, с учетом его особенностей. Показано, что для сложных систем междисциплинарной природы, таких как организационно-технические системы, обладающих свойствами самостоятельного целеполагания, рефлексии и ограниченной рациональности при принятии решений, не существует комплексного методологического подхода для организации процесса разработки ЦД в целях ускоренного их инжиниринга.

Предложенная методология системного инжиниринга для организации процесса проектирования ЦД организационно-технических систем объединяет этапы проектирования, методы и модели, и обеспечивает ускоренный инжиниринг ЦД объектов/процессов, изготовления готовых изделий (продуктов) высокого качества.

В рамках прототипа ЦД разработана модель поддержки принятия решений для диагностики технического состояния технического устройства, основанная на методах ситуационного анализа и нечеткой логики, обеспечивающая возможность оперировать при принятии решений не только количественными, но и качественными оценками изменений факторов, что обуславливает повышение точности и надежности принимаемых решений. Модель обеспечивает синтез эффективных решений в различных ситуациях и сочетаниях разнородных факторов, характеризующих как состояние оборудования, так и его внешней среды.

Практическую значимость может представлять система поддержки принятия решений на основе разработанной модели, которая является основой для управления при решении проблем, связанных с мониторингом текущего состояния объектов (приборов, оборудования, технологических процессов) и выработкой адекватных решений по устранению их неисправностей. Будучи встроенной в модель ЦД, такая система поддержки принятия решений обеспечит выявление и устранение непредвиденных нежелательных состояний объекта.

Список литературы

1. Прохоров А., Лысачев М., Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: АльянсПринт, 2020. 401 с.
2. Петров А. В. Имитационное моделирование как основа технологии цифровых двойников // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 10. С. 56—66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66.
3. Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N. et al. Enabling technologies and tools for digital twin // Journal of Manufacturing Systems. 2021. Vol. 58. P. 3—21. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
4. Orlova E. V. Methodology and Models for Individuals' Creditworthiness Management Using Digital Footprint Data and Machine Learning Methods // Mathematics. 2021. Vol. 9, No. 15. 28 p. DOI: 10.3390/math9151820.
5. Orlova E. V. Innovation in Company Labor Productivity Management: Data Science Methods Application // Applied System Innovation. 2021. Vol. 4, No. 3: 68. 18 p. DOI: 10.3390/asi4030068.
6. Banerjee P. AI and ML: The Brave New World of Simulation, 2021. URL: <https://www.ansys.com/blog/ai-and-ml-the-brave-new-world-of-simulation>
7. Radanliev P., De Roure D., Nicolescu R. et al. Digital twins: artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems in Industry 4.0 // International Journal of Intelligent Robotics and Applications. 2022. Vol. 6, No. 1. P. 171—185. DOI: 10.1007/s41315-021-00180-5.
8. Орлова Е. В. Модель оперативного оптимального управления распределением финансовых ресурсов предприятия // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Том 11, № 2. С. 343—358. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-343—358.
9. Орлова Е. В. Инженерия системного синтеза эффективности инновационных проектов // Программная инженерия. 2019. Том 10, № 11—12. С. 430—439. DOI: 10.17587/prin.10.430-439.
10. Орлова Е. В. Методы и модели анализа данных и машинного обучения в задаче управления производительностью труда // Программная инженерия. 2020. Том 11, № 4. С. 219—229. DOI: 10.17587/prin.11.219-229.
11. Malik A. A., Masood T., Bilberg A. Virtual reality in manufacturing: Immersive and collaborative artificial-reality in design of human-robot workspace // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2019. Vol. 33, No. 1. P. 22—37. DOI: 10.1080/0951192X.2019.1690685.
12. Tao F., Qi, Q., Wang L., Nee A. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison // Engineering. 2019. Vol. 5, No. 4. P. 653—661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
13. Mandolla C., Petruzzelli A., Percoco G., Urbinati A. Building a Digital Twin for Additive Manufacturing through the Exploitation of Blockchain: A case analysis of the aircraft industry // Computers in Industry. 2019. Vol. 109. P. 134—152. DOI: 10.1016/j.compind.2019.04.011.
14. Korostelkin A. A., Klyavin O. I., Aleshin M. V. Optimization of Frame Mass in Crash Testing of Off — Road Vehicles // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39, No. 12. P. 1021—1028. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X19120116>
15. Fonseca I., Gaspar H., Mello P., Sasaki H. A Standards-Based Digital Twin of an Experiment with a Scale Model Ship // Computer-Aided Design. 2022. Vol. 145. Article 103191. DOI: 10.1016/j.cad.2021.103191.
16. Siebert T., Hack E., Labeas G., Patterson E., Splitthof K. Uncertainty Quantification for DIC Displacement Measurements in Industrial Environments // Experimental Techniques. 2021. Vol. 45, No. 5. P. 685—694. DOI: 10.1007/s40799-021-00447-3.
17. Future role of digital twins in the aerospace industry, January 2019. URL: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-in-aerospace/>
18. Patterson E., Diamantakos I., Dvurecenska K. et al. Validation of a structural model of an aircraft cockpit panel: An industrial case study // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2021. 030932472110590. DOI: 10.1177/03093247211059084.

19. **Zborowski M.** Finding Meaning, Application for the Much-Discussed "Digital Twin" // *Journal of Petroleum Technology*. 2018. Vol. 70. P. 26–32. DOI: 10.2118/0618-0026-JPT.
20. **Digital Twins vs. Building Information Modeling (BIM)**, 2019. URL: <https://www.iotforall.com/digital-twin-vs-bim/>
21. **Bruynseels K., Santoni de Sio F., Van Den Hoven J.** Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm // *Frontiers in Genetics*. 2018. Vol. 9. DOI: 10.3389/fgene.2018.00031.
22. **Насыров Р. В.** Причинный подход к построению бионических вычислений на основе рекурсивных моделей анализа данных // *Системная инженерия и информационные технологии*. 2022. Т. 4. № 1 (8). С. 27–36. DOI: 10.54708/26585014_2022_41827.
23. **Miskinis C.** Disrupting the financial and banking services using digital twins. 2021. URL: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-for-finance/>
24. **Kämpel M., Mueller C., Beetz M.** Semantic Digital Twins for Retail Logistics // *Dynamics in logistic*. 2021. P. 129–153. DOI: 10.1007/978-3-030-88662-2_7.
25. **Matyi H., Tamás P.** Digital Twin Technology in Logistics Literature Review // *Cutting & Tools in Technological System*. December 2021. P. 13–21. DOI: 10.20998/2078-7405.2021.95.02.
26. **Ivanov S., Nikolskaia K., Radchenko G.** et al. Digital Twin of City: Concept Overview//In conference proceedings — 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC). 2020. P. 178–186. DOI: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267879.
27. **Dembski F., Wössner U., Letzgus M.** et al. Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 6. Article 2307. DOI: 10.3390/su12062307.
28. **Lucas A.** Ising formulations of many NP problems // *Frontiers in physics*. 2014. 5 p. DOI: 10.3389/fphy.2014.00005.
29. **Nembrini R., Ferrari D. M., Cremonesi P.** Feature Selection for Recommender Systems with Quantum Computing // *Entropy*. 2021. Vol. 23, No. 8. Article 970. DOI: 10.3390/e23080970.
30. **Giordani M., Polese M., Mezzavilla M.** et al. Toward 6G networks: Use cases and technologies // *IEEE Commun. Mag.* 2020. Vol. 58. P. 55–61. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900411.
31. **Allawi Y. M., Mohammed A. F. Y., Lee J., Choi S. G.** A Sustainable Business Model for a Neutral Host Supporting 5G and beyond (5GB) Ultra-Dense Networks: Challenges, Directions, and Architecture // *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 14. Article 5215. DOI: 10.3390/s22145215.
32. **Papidas A. G., Polyzos G. C.** Self-Organizing Networks for 5G and Beyond: A View from the Top // *Future Internet*. 2022. Vol. 14, No. 3. Article 95. DOI: 10.3390/fi14030095.
33. **Martínez-García A. N.** Artificial Intelligence for Sustainable Complex Socio-Technical-Economic Ecosystems // *Computation*. 2022. Vol. 10, No. 6. Article 95. DOI: 10.3390/computation10060095.
34. **Kim D., Jo D.** Effects on Co-Presence of a Virtual Human: A Comparison of Display and Interaction Types // *Electronics*. 2022. Vol. 11, No. 3. Article 367. DOI: 10.3390/electronics11030367.
35. **Инкубатор** интенсивной терапии новорожденных ИДН-03. Руководство по эксплуатации. Электронный ресурс. URL: <https://www.xn--glajft.xn--plai/ru/production/medicina/neonatalnaya/idn-03>

System Engineering of the Organizational and Technical Systems' Digital Twins Using Artificial Intelligence Methods

E. V. Orlova, ekorl@mail.ru, Department of economics and management, Ufa state aviation technical university, Ufa, 450008, Russian Federation

Corresponding author:

Ekaterina V. Orlova, D. Sc., Professor, Department of economics and management, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008, Russian Federation
E-mail: ekorl@mail.ru

Received on July 15, 2022

Accepted on August 18, 2022

The article considers the problem of digital twin design of organizational and technical systems. The theoretical and methodological basis of the research is the fundamental scientific works and applied works of Russian and foreign scientists in the field of digitalization and digital twins. Following methods are used in the research: system analysis, statistical analysis, operational research, artificial intelligence.

A comprehensive analysis of approaches and methods for digital twin design of organizational and technical systems is carried out. It is shown that for complex organizational and technical systems operating under uncertainty, there is no comprehensive, universal technology (methodological approach) for organization the process of developing digital twins in order to accelerate their engineering.

The technology for organizing a digital twin design, combining design stages, methods and models, and providing its system engineering is proposed.

The decision support model is developed for diagnosing the technical state of an object (technical device), based on the methods of situational analysis and fuzzy logic, which provides the synthesis of effective solutions under various situations and combinations of heterogeneous factors characterizing the object and its external environment.

The practical significance of the research is the developed decision support system, which is the basis for control system in solving problems related to monitoring the current state of technical devices (instruments, equipment) and developing adequate decisions to eliminate their disfunctions.

Keywords: digital twin; methods for modeling digital twins; system design of digital twins; artificial intelligence methods

For citation:

Orlova E. V. System Engineering of the Organizational and Technical Systems' Digital Twins Using Artificial Intelligence Methods, *Programmnaya Ingeneria*, 2022, vol. 13, no. 9, pp. 425—439.

DOI: 10.17587/prin.13.425-439

References

1. **Prokhorov A., Lysachev M., Borovkov A.** *Digital twin. Analysis, trends, world experience*, Moscow, LLC "AlliancePrint", 2020, 401 p. (in Russian).
2. **Petrov A. V.** Simulation modeling as a basis for digital twin technology, *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2018, vol. 22, no. 10, pp. 56—66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66 (in Russian).
3. **Qi Q., Tao F., Hu T.** et al. Enabling technologies and tools for digital twin, *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, pp. 3—21. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
4. **Orlova E. V.** Methodology and Models for Individuals' Creditworthiness Management Using Digital Footprint Data and Machine Learning Method, *Mathematics*, 2021, vol. 9, no. 15, 28 p. DOI: 10.3390/math9151820.
5. **Orlova E. V.** Innovation in Company Labor Productivity Management: Data Science Methods Application, *Applied System Innovation*, 2021, vol. 4, no. 3: 68. 18 p. DOI: 10.3390/asi4030068.
6. **Banerjee P.** AI and ML: The Brave New World of Simulation, 2021, available at: <https://www.ansys.com/blog/ai-and-ml-the-brave-new-world-of-simulation>
7. **Radanliev P., De Roure D., Nicolescu R.** et al. Digital twins: artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems in Industry 4.0, *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 171—185. DOI: 10.1007/s41315-021-00180-5.
8. **Orlova E. V.** Model for Operational Optimal Control of Financial Recourses Distribution in a Company, *Computer Research and Modeling*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 343—358. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-2-343-358 (in Russian).
9. **Orlova E. V.** Engineering of System Synthesis for Innovative Projects Efficiency, *Programmnaya Ingeneria*, 2019, vol. 10, no. 11—12, pp. 430—439. DOI: 10.17587/prin.10.430-439 (in Russian).
10. **Orlova E. V.** Methods and Models of Data Analysis and Machine Learning in the Problem of Labor Productivity Management, *Programmnaya Ingeneria*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 219—229. DOI: 10.17587/prin.11.219-229 (in Russian).
11. **Malik A. A., Masood T., Bilberg A.** Virtual reality in manufacturing: Immersive and collaborative artificial-reality in design of human-robot workspace, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, vol. 33, no. 1, pp. 22—37. DOI: 10.1080/0951192X.2019.1690685.
12. **Tao F., Qi, Q., Wang L., Nee A.** Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison, *Engineering*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 653—661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
13. **Mandolla C., Petruzzelli A., Percoco G., Urbinati A.** Building a Digital Twin for Additive Manufacturing through the Exploitation of Blockchain: A case analysis of the aircraft industry, *Computers in Industry*, 2019, vol. 109, pp. 134—152. DOI: 10.1016/j.compind.2019.04.011.
14. **Korostelkin A. A., Klyavin O. I., Aleshin M. V.** Optimization of Frame Mass in Crash Testing of Off — Road Vehicles, *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, no. 12, pp. 1021—1028, at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X19120116>
15. **Fonseca Í., Gaspar H., Mello P., Sasaki H.** A Standards-Based Digital Twin of an Experiment with a Scale Model Ship, *Computer-Aided Design*, 2022, vol. 145, article 103191. DOI: 10.1016/j.cad.2021.103191.
16. **Siebert T., Hack E., Labeas G., Patterson E., Splithof K.** Uncertainty Quantification for DIC Displacement Measurements in Industrial Environments, *Experimental Techniques*, 2021, vol. 45, no. 5, pp. 685—694. DOI: 10.1007/s40799-021-00447-3.
17. **Future** role of digital twins in the aerospace industry, January 2019, available at: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-in-aerospace/>
18. **Patterson E., Diamantakos I., Dvurecenska K.** et al. Validation of a structural model of an aircraft cockpit panel: An industrial case study, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2021, 030932472110590. DOI: 10.1177/03093247211059084.
19. **Zborowski M.** Finding Meaning, Application for the Much-Discussed "Digital Twin", *Journal of Petroleum Technology*, 2018, vol. 70, pp. 26—32. DOI: 10.2118/0618-0026-JPT.
20. **Digital Twins vs. Building Information Modeling (BIM)**, available at: <https://www.iotforall.com/digital-twin-vs-bim/>
21. **Bruynseels K., Santoni de Sio F., Van Den Hoven J.** Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm, *Frontiers in Genetics*, 2018, vol. 9. DOI: 10.3389/fgene.2018.00031.
22. **Nasyrov R. V.** Causal approach to the construction of bi-omic calculations based on recursive data analysis models, *System Engineering and Information Technologies*, 2022, vol. 4, no. 1 (8), pp. 27—36. DOI 10.54708/26585014_2022_41827.
23. **Miskinis C.** Disrupting the financial and banking services using digital twins. 2021, available at: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-for-finance/>
24. **Kümpel M., Mueller C., Beetz M.** Semantic Digital Twins for Retail Logistics, *Dynamics in logistic*, 2021, pp. 129—153. DOI: 10.1007/978-3-030-88662-2_7.
25. **Matyi H., Tamás P.** Digital Twin Technology in Logistics Literature Review, *Cutting & Tools in Technological System*, December 2021, pp. 13—21. DOI: 10.20998/2078-7405.2021.95.02.
26. **Ivanov S., Nikolskaia K., Radchenko G.** et al. Digital Twin of City: Concept Overview, *In conference proceedings — 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, 2020, pp. 178—186. DOI: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267879.
27. **Dembski F., Wössner U., Letzgus M.** et al. Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany, *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 6, article 2307. DOI: 10.3390/su12062307.
28. **Lucas A.** Ising formulations of many NP problems, *Frontiers in physics*, 2014, 5 p. DOI: 10.3389/fphy.2014.00005.
29. **Nembrini R., Ferrari D. M., Cremonesi P.** Feature Selection for Recommender Systems with Quantum Computing, *Entropy*, 2021, vol. 23, no. 8, article 970. DOI: 10.3390/e23080970.
30. **Giordani M., Polese M., Mezzavilla M.** et al. Toward 6G networks: Use cases and technologies, *IEEE Commun. Mag.*, 2020, vol. 58, pp. 55—61. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900411.
31. **Allawi Y. M., Mohammed A. F. Y., Lee J., Choi S. G.** A Sustainable Business Model for a Neutral Host Supporting 5G and beyond (5GB) Ultra-Dense Networks: Challenges, Directions, and Architecture, *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 14, article 5215. DOI: 10.3390/s22145215.
32. **Papidas A. G., Polyzos G. C.** Self-Organizing Networks for 5G and Beyond: A View from the Top, *Future Internet*, 2022, vol. 14, no. 3, article 95. DOI: 10.3390/fi14030095.
33. **Martínez-García A. N.** Artificial Intelligence for Sustainable Complex Socio-Technical-Economic Ecosystems, *Computation*, 2022, vol. 10, no. 6, article 95. DOI: 10.3390/computation10060095.
34. **Kim D., Jo D.** Effects on Co-Presence of a Virtual Human: A Comparison of Display and Interaction Types, *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 3, article 367. DOI: 10.3390/electronics11030367.
35. **Intensive** care incubator for newborns IDN-03. Operation manual, available at: <https://www.xn--glajft.xn--plai/en/production/medicina/neonatalnaya/idn-03>

Рисунок к статье Е. В. Орловой
 «СИСТЕМНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
 ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
 МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА»

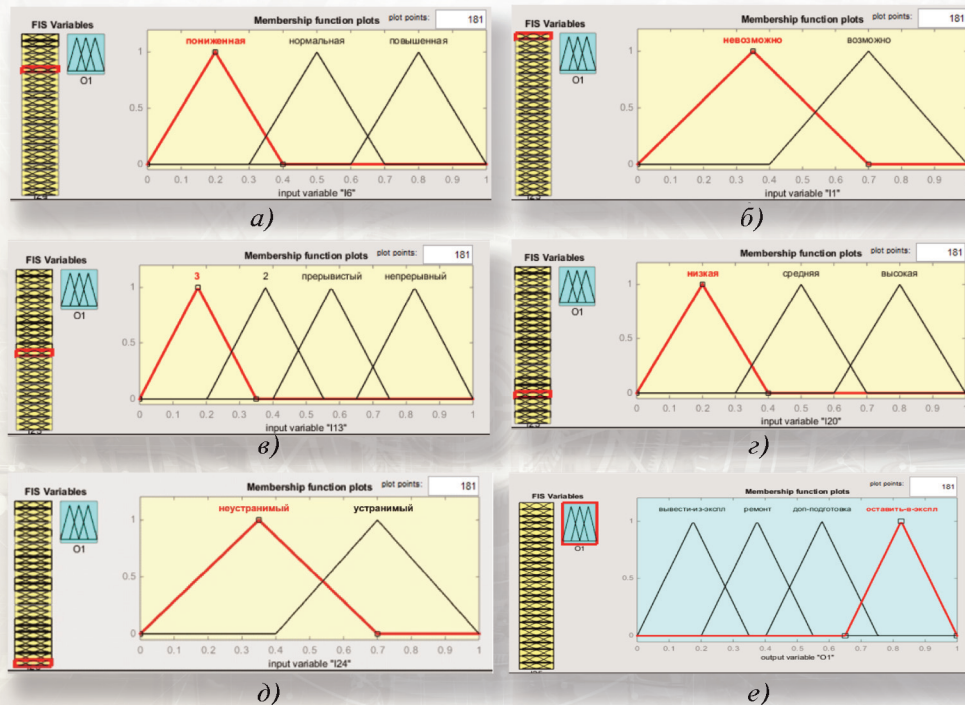


Рис. 5. Функции принадлежности для входных и выходной переменных:
 а – I_6 ; б – I_1 ; в – I_{13} ; г – I_{20} ; д – I_{24} ; е – O_1