

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ:
цифровые двойники объектов, процессов и систем**

Учебно-методическое пособие

по организации и выполнению самостоятельной работы
для студентов направлений

15.04.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств»,
профиль «Промышленность»;
12.04.01 – «Приборостроение»,
профиль «Информационно-измерительная техника и технологии»;
12.04.04 – «Биотехнические системы и технологии»,
профиль «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»;
15.04.06 – «Мехатроника и робототехника»,
профиль «Мехатронные и роботизированные технологические системы и комплексы»;
15.03.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств»,
профиль «Промышленность»;
15.03.06 – «Мехатроника и робототехника»,
профиль «Мехатронные и роботизированные технологические системы и комплексы»;
12.03.04 – «Биотехнические системы и технологии»,
профиль «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»;
12.03.01 – «Приборостроение»,
профиль «Информационно-измерительная техника и технологии»

Севастополь
СевГУ
2022

УДК 681.51(076.5)

ББК 32.965я73

П791

Р е ц е н з е н т :

А.О. Харченко - канд. техн. наук, профессор кафедры
«Технология машиностроения» СевГУ

Составитель: А. Г. Карлов

П791 Проектирование систем автоматизации и управления : цифровые двойники объектов, процессов и систем : учебно-методическое пособие по выполнению самостоятельной работы для студентов направлений 15.04.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств», профиль «Промышленность»; 12.04.01 – «Приборостроение», профиль «Информационно-измерительная техника и технологии» 12.04.04 – «Биотехнические системы и технологии», профиль «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»; 15.04.06 – «Мехатроника и робототехника», профиль, «Мехатронные и роботизированные технологические системы и комплексы»; 15.03.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств», профиль «Промышленность»; 15.03.06 – «Мехатроника и робототехника», профиль, «Мехатронные и роботизированные технологические системы и комплексы»; 12.03.04 – «Биотехнические системы и технологии», профиль «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»; 12.03.01 – «Приборостроение», профиль «Информационно-измерительная техника и технологии» / Севастопольский государственный университет; сост. А. Г. Карлов. – Севастополь : СевГУ, 2022. – 69 с. – Текст : электронный.

Учебно-методическое пособие предназначено для учебно-методического обеспечения дисциплин «Проектирование систем автоматизации и управления», «Системный анализ», «Проектирование систем автоматизации технологических процессов», «Компьютерная поддержка технологий инновационного мышления (computer support of technologies of innovative thinking)» для студентов специальностей 15.04.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств», профиль «Промышленность»; 12.04.01 – «Приборостроение», профиль «Информационно-измерительная техника и технологии»; 12.04.04 – «Биотехнические системы и технологии», профиль «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»; 15.04.06 – «Мехатроника и робототехника», профиль, «Мехатронные и роботизированные технологические системы и комплексы. Могут быть полезными для последующей работы над выпускной квалификационной работой бакалавра по направлениям: 15.03.06 – «Мехатроника и робототехника», профиль, «Мехатронные и роботизированные технологические системы и комплексы»; 12.03.04 – «Биотехнические системы и технологии», профиль «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»; 12.03.01 – «Приборостроение», профиль «Информационно-измерительная техника и технологии», а также магистров по направлениям: 15.04.06 – «Мехатроника и робототехника», профиль, «Мехатронные и роботизированные технологические системы и комплексы»; 12.04.04 – «Биотехнические системы и технологии», профиль «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»; - «Приборостроение».

Целью учебно-методического пособия является оказание помощи студентам в процессе организации и выполнения самостоятельной работы по указанным дисциплинам и последующей работы над индивидуальным заданием по теме выпускной квалификационной работой бакалавра и магистра.

УДК 681.51(076.5)

ББК 32.965я73

Учебно-методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры. «Приборные системы и автоматизация технологических процессов» протокол № 4 от 29 декабря 2021 г.

Допущено учебно-методическим центром СевГУ в качестве учебно-методического пособия.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель работы.....	4
2 Теоретическая часть самостоятельной работы:	4
2.1 Основные понятия и определения	4
2.1.1 Понятие передовых производственных технологий (ППТ).....	5
2.1.2 Российские программы по развитию передовых производственных техно- логий.....	9
2.1.3 Компьютерный инжиниринг, возможности цифрового проектирования...	13
2.2. Цифровые двойники объектов, процессов и систем	20
3 Практическая часть самостоятельной работы:	34
3.1. Ссылки на цифровые двойники устройств или технологий, примеры проектов, схем, рисунков к технологиям разработки цифровых двойников.....	34
3.2. Примеры многоуровневого моделирования производственных систем и при- меняемого программного обеспечения при создании цифровых двойников.....	40
Библиографический список.....	56
Приложения.....	58

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Цель и задачи, тематика самостоятельной работы касается освоения новых государственных стандартов по Цифровым двойникам при подготовке курсового проекта по дисциплине ПСАТП, выпускной квалификационной работы бакалавра и магистра.

Цель самостоятельной работы - освоение новых государственных стандартов по Цифровым двойникам изделий и технологических процессов, овладение методами проектирования систем автоматизации технологических процессов, применяемых в различных отраслях промышленного производства с учётом возможности применения цифровых двойников; умение обосновать рациональную технологию автоматизированного технологического процесса или изделия, провести анализ и синтез систем автоматизации и мехатроники, выполнить необходимые расчеты, выбрать комплектующие информационной и исполнительной подсистем, разработать программу работы автоматизированной системы.

Основные задачи самостоятельной работы:

- закрепление теоретических знаний по базовым циклам дисциплин учебного плана подготовки бакалавра по направлениям обучения: 15.03.04; 15.03.06; 12.03.01; 12.03.04, а также магистров по направлениям обучения: 15.04.04; 15.04.06; 12.04.01; 12.04.04
- приобретение умений и практических навыков проектирования автоматизированных технологических процессов, расчета технических средств автоматизации, использования современных программных и аппаратных средств моделирования и управления компьютерно-интегрированными технологическими процессами и производствами;
- совершенствование знаний, умений и навыков поиска новой информации в технических изданиях, книгах, локальных и глобальных компьютерных сетях для обоснования и решения задач, поставленных в индивидуальном задании по КП, ВКРБ, ВКРМ с учетом реальных ресурсов и ограничений

конкретных производителей средств автоматизации, имеющихся в каталогах фирм.

Отрасли промышленности, типы технологических процессов, которые являются базовыми для темы конкретного проекта, накладывают особенности, как на структуру, так и на содержание проекта.

Целесообразно ориентировать студентов на выбор комплектующих изделий и технических решений из наиболее доступных информационных ресурсов таких производителей средств автоматизации, таких как Siemens, Camozzi, Schneider Electric, Festo и других.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

2.1 Основные понятия и определения

2.1.1 Понятие передовых производственных технологий (ППТ)

Глобализация рынков, конкуренция, стремительное развитие технологий и наукоемких инноваций, появление сверхсложных научно-технических проблем (комплексных задач на стыке нескольких отраслей промышленности) требует от промышленности гораздо более быстрых темпов развития, предельно коротких циклов разработки, низких цен и высокого качества продукции.

Спрос на сложные многофункциональные инженерные изделия стимулирует процесс постоянных модификаций как самих продуктов (изделий/ конструкций /разнообразных технических систем), так и технологий их производства - инструментов, позволяющих оптимизировать процессы разработки, изготовления и управления.

Ответом на этот вызов становятся передовые производственные технологии (ППТ) – сложный комплекс мультидисциплинарных знаний, наукоемких технологий и системы интеллектуальных ноу-хау, полученных с помощью длительных дорогостоящих научных исследований, эффективного применения концепции открытых инноваций и трансфера передовых наукоемких технологий.

Многие наукоемкие технологии аккумулируют наработки нескольких лет, создаются большими коллективами, а потому трудоемкость их создания составляет тысячи и десятки тысяч человеко-лет. ППТ – это совокупность новых, с высоким потенциалом, уже зарекомендовавших себя, демонстрирующих де-факто стремительное развитие, но имеющих пока по сравнению с традиционными технологиями относительно небольшое распространение, новых материалов, методов и процессов, которые используются для производства глобально конкурентоспособных и востребованных на мировом рынке продуктов или изделий (машин, конструкций, агрегатов, приборов, установок и т. д.). В результате сравнения с аналогами по совокупности характе-

ристик передовые производственные технологии имеют наилучшие экономические показатели или вовсе не имеют аналогов.

Передовые производственные технологии включают:

- цифровое проектирование и моделирование как совокупность технологий компьютерного проектирования (Computer-Aided Design, CAD); математического моделирования, компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга (Computer-Aided Engineering, CAE, и High Performance Computing, HPC) и оптимизации (Computer-Aided Optimization, CAO); технологической подготовки производства (Computer-Aided Manufacturing, CAM), в том числе нового поколения, ориентированной на аддитивное производство (Computer-Aided Additive Manufacturing, CAAM); бионического дизайна ((Simulation & Optimization)-Driven Bionic Design); «умных» моделей; «цифровых двойников» (Digital Twin); технологий управления данными о продукте (Product Data Management, PDM) и технологий управления жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management, PLM);
- новые материалы (в первую очередь, композиционные материалы, метаматериалы, металлопорошки для аддитивного производства);
- аддитивные технологии, включая 3D-принтеры, технологии, подходы и способы работ с исходными материалами, разработка и эксплуатация расходных материалов и набор услуг по 3D-печати;
- CNC-технологии и гибридные технологии, включая станки и технологии оборудования с числовым программным управлением, приводную технику, гибридные многофункциональные технологии обработки;
- промышленная сенсорика – внедрение «умных» сенсоров и инструментов управления (контроллеров) в производственное оборудование, в помещение на уровне цеха или фабрики в целом;

- технологии робототехники, прежде всего, гибкие производственные ячейки;
- информационные системы управления предприятием (Industrial Control System – ICS, Manufacturing Execution System – MES, Enterprise Resource Planning – ERP, Enterprise Application Software – EAS);
- Big Data – генерация, сбор, хранение, управление, обработка и передача больших данных, в первую очередь, «умных» больших данных (Smart Big Data);
- IoT (Internet of Things — Интернет вещей);
- Технология виртуальной реальности (virtual reality, VR) и Технология дополненной реальности (augmented reality, AR);
- экспертные интеллектуальные системы и искусственный интеллект.

Благодаря применению передовых производственных технологий возможно качественно совершенствовать существующие или вновь создавать сложные продукты нового поколения, характеризующиеся:

- Количеством и разнообразием составных частей;
- Соответствием различным техническим требованиям (размеры, форма, вес, прочность, жесткость, характеристики устойчивости, тепловые, термомеханические, динамические, аэрогидродинамические, гидравлические, усталостные, эргономические, эстетические и т. д.; характеристики долговечности и износостойкости);
- Временем (кратчайшие сроки), затрачиваемым на разработку;
- Экономической эффективностью (стоимость, логистики, эксплуатация и т.д.).

2.1.2 Российские программы по развитию передовых производственных технологий

В последние несколько лет проблематика передовых производственных технологий активно обсуждается и рассматривается в качестве приоритетного направления развития промышленности в России на уровне федеральных органов власти. На сегодняшний день это выражается в трех главных инструментах государственной поддержки ППТ – Национальной технологической инициативе (НТИ), Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (СНТР), а также программе «Цифровая экономика». Все эти программы реализуются в русле IV промышленной революции и аналогичных направлений, которые разрабатываются в США (Advanced Manufacturing Partnership), Германии (Industrie 4.0) и других странах. [1...6]

Национальная технологическая инициатива

Национальная технологическая инициатива – это программа мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства страны к 2035 г., которую в Послании Федеральному Собранию 4 декабря 2014 г. предложил запустить Президент РФ В.В. Путин. Фактически ППТ представляют собой «промышленно ориентированное» ядро НТИ, позволяющее решать национально значимые задачи, в особенности осуществлять импортозамещение и импортоопережение высокотехнологичной зарубежной продукции, а также увеличивать долю экспорта продукции и услуг. В рамках НТИ выделены рабочие группы по развитию рынков будущего (AeroNet, AutoNet, MariNet, EnergyNet, SafeNet, NeuroNet, FoodNet, Health-Net, FinNet) и одна группа по развитию передовых производственных технологий и созданию нового поколения производств – TechNet. Ее соруководителями назначены: проректор по перспективным проектам, научный руководитель Института передовых производственных технологий СПбПУ, руководитель

Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ профессор А.И. Боровков и заместитель министра промышленности и торговли РФ В.С. Осмаков. Реализация дорожной карты «Технет» (передовые производственные технологии) направлена на развитие и продвижение новых технологий, продуктов и услуг, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках, предусмотренных планом мероприятий «Технет», с учетом специфики новых производственных технологий, связанных с ускорением, удешевлением и децентрализацией процессов разработки и производства инновационной продукции, что формирует основу для массовой кастомизации продукции.

В рамках дорожной карты предполагается создание нового поколения современных цифровых производств («Фабрик Будущего» - Digital (Цифровая) / Smart («Умная») / Virtual (Виртуальная) Фабрики) по проектированию и созданию глобально конкурентоспособной и кастомизированной / персонализированной продукции нового поколения. Создание Фабрик Будущего направлено на развитие и повышение экспортного потенциала наукоёмкого сектора российской промышленности, а также на решение актуальных задач по импортозамещению высокотехнологичной зарубежной продукции на основе применения передовых производственных технологий (в первую очередь, цифрового моделирования и проектирования, новых материалов и аддитивных технологий), которые обеспечивают преимущество как на выделенных в рамках НТИ рынках, так и в высокотехнологичных отраслях промышленности [1...6].

Цифровая экономика Российской Федерации

Разработка программы «Цифровая экономика Российской Федерации» предусмотрена указанием Правительства РФ в рамках исполнения перечня поручений Президента РФ № Пр-2346 от 5 декабря 2016 года. Программа

развития цифровой экономики направлена на ускорения цифровой трансформации Российской Федерации. [3,4]

Основными целями программы являются:

- увеличение внутренних затрат на развитие цифровой экономики за счёт всех источников не менее чем в три раза по сравнению с 2017 годом;
- обеспечение подготовки высококвалифицированных кадров для цифровой экономики;
- создание сквозных цифровых технологий преимущественно на основе отечественных разработок;
- создание комплексной системы финансирования проектов по разработке и (или) внедрению цифровых технологий и платформенных решений, включающей в себя венчурное финансирование и иные институты развития
- преобразование приоритетных отраслей экономики и социальной сферы: здравоохранение, образование, промышленность, сельское хозяйство, строительство, городское хозяйство, транспортную и энергетическую инфраструктуру, финансовые услуги, посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений.

Для управления программой определены пять базовых направлений развития цифровой экономики в России на период до 2024 года:

- нормативное регулирование
- кадры и образование
- формирование исследовательских компетенций и технических заделов
- информационная инфраструктура
- информационная безопасность.

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации

План мероприятий по реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации на 2017-2019 годы утвержден распоряжением правительства от 24 июня 2017 года №1325-р. Координатором выполнения плана назначено Минобрнауки, ответственные исполнители – федеральные органы исполнительной власти, государственные корпорации, институты развития, фонды поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности, Российская академия наук, органы исполнительной власти субъектов РФ. Стратегия направлена на формирование современной системы управления в области науки, технологий и инноваций, обеспечение инновационной привлекательности сферы исследований и разработок.

СНТР определяет следующие приоритеты научно-технологического развития Российской Федерации:

- 1) переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта;
- 2) переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии;
- 3) переход к персонализированной медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения, в том числе за счет рационального применения лекарственных препаратов (прежде всего антибактериальных);
- 4) переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквакультуре, разработку и внедрение систем рационального применения средств химической и биологической защиты хранение сельскохозяйст-

венных растений и животных, эффективную переработку сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания;

5) противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства;

6) связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики;

7) возможность эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий, социальных институтов на современном этапе глобального развития, в том числе применяя методы гуманитарных и социальных наук.

Предполагается, что данные направления позволят получить научные и научно-технические результаты и создать технологии, являющиеся основой инновационного развития внутреннего рынка продуктов и услуг, устойчивого положения России на внешнем рынке.

2.1.3 Компьютерный инжиниринг, возможности цифрового проектирования

Цифровое проектирование и моделирование

1. Digital Design, Simulation and Integration
2. HPC
3. 3DP and Additive Manufacturing
4. Advanced Materials
5. Robotics and Artificial Intelligence
6. Big Data and Advanced Analytics

7. IoT
8. A- and V- Reality
9. Technologies of Blockchain
10. Industrial Biotechnology

Полный список ключевых технологий (по материалам заседания рабочей группы Shaping the Future of Production in Russia, Международный экономический форум, ноябрь 2017, Женева): – это одна из 10 ключевых технологий IV промышленной революции.

Определения:

Компьютерное проектирование (CAD, Computer-Aided Design) – процесс разработки 3D-моделей в CAD-системах, то есть в системах, которые позволяют создавать чертежи, оформлять конструкторскую или технологическую документацию. Примерами таких систем являются системы CATIA, SolidWorks, Siemens NX, Autodesk, Компас 3D. Компьютерное проектирование – это первый уровень в цифровом проектировании и моделировании.

CAD-системы – это программные системы компьютерного проектирования, позволяющие на основе 3D-моделей осуществлять создание чертежей и/или оформление конструкторской и /или технологической документации.

Компьютерный инжиниринг (Computer-Aided Engineering, CAE) – совокупность методов и средств решения научно-технических проблем путем математического и компьютерного моделирования на основе CAE-систем, это следующий уровень. Если компьютерное проектирование в CAD-системах позволяет только нарисовать геометрию изделий и подготовить конструкторскую документацию для производства, то компьютерный инжиниринг позволяет провести моделирование поведения конструкций, машин, физико-механических и технологических процессов.

CAE-системы – программные системы компьютерного инжиниринга, позволяющие на основе математических моделей разных классов и

уровней сложности (в самых общих случаях описываемых нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных) исследовать поведение материалов, физико-механических и технологических процессов, машин и конструкций.

Для примера возьмем автомобиль. Если необходимо, например, только нарисовать трехмерную модель капота автомобиля, то используются САД системы. Если же необходимо рассчитать, выдержит ли капот нагрузку от снега, нагрузку от поставленных на него сумок, оценить уровень вибраций от потока воздуха или просчитать деформации при авариях – тогда применяются САЕ-системы, т.е. системы компьютерного инжиниринга.

Термин «цифровое проектирование и моделирование» включает в себя уже упоминавшееся компьютерное проектирование, компьютерный инжиниринг и другие технологии, такие как:

- высокопроизводительные вычисления, в т.ч. на суперкомпьютерах (HPC),
- технологическая подготовка производства – подготовка управляющих программ для станков и других технологических комплексов (CAM),
- управление данными о продукте (PDM),
- управление жизненным циклом изделий (PLM).

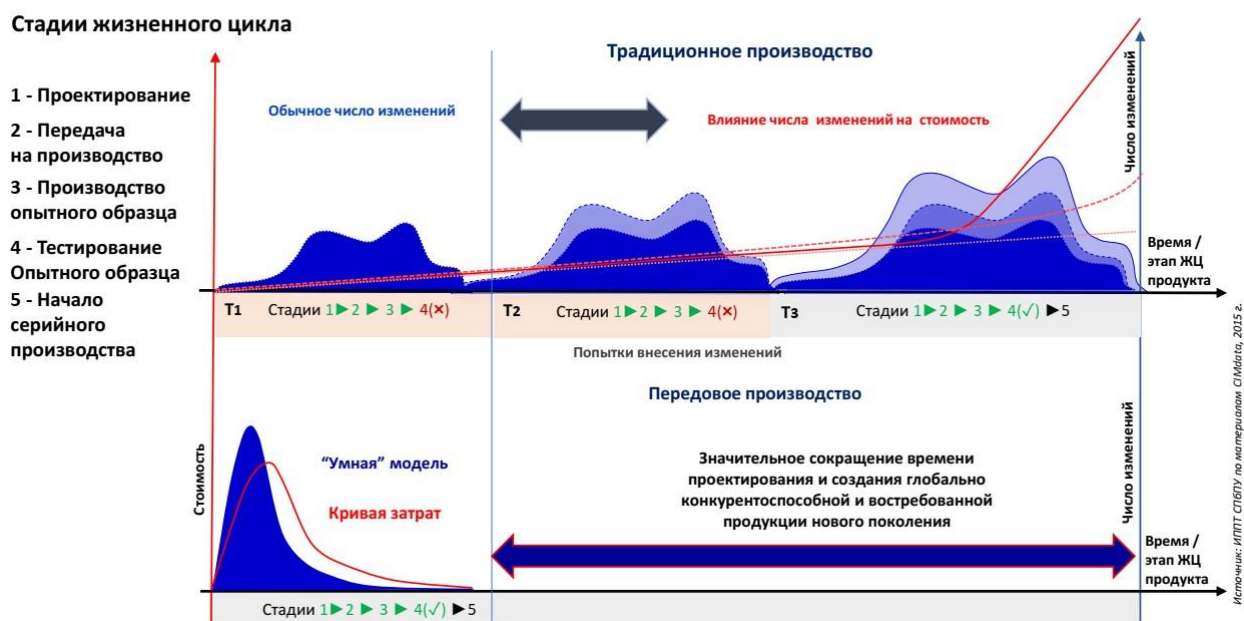
Ключевое отличие традиционного производства от передового заключается в смещении акцента на этап проектирования и создание таких высокоадекватных математических моделей («цифровых двойников»), которые позволяют перейти к серийному производству со значительно меньшим числом натурных испытаний (или вообще без них), чем при традиционном производстве.

Примером отрасли-лидера по выводу продуктов на рынок (т.е. по показателю «Time-to-Market») является автомобилестроение.

За 50 лет произошло снижение срока вывода автомобилей на рынок с 7 до 1,5 лет. При этом в гражданском авиастроении аналогичный срок

увеличился с 3 до 7,5 лет, а в вооруженных силах - с 5 до 27 лет. Это связано, в том числе, с высокой конкуренцией среди автопроизводителей и возможностью каждого производителя купить, разобрать и тщательно проанализировать новый автомобиль конкурентам в течение первого месяца, как только новый автомобиль появился на рынке.

Сравнение: традиционное производство - передовое производство



[6,7].

Традиционное место инжиниринга в жизненном цикле продукта



[6,7].

На сегодняшний день в автомобилестроении достигается погрешность не более 5 % по всем показателям, которые можно измерить при натурных испытаниях. В частности, при краштестах сравниваются показатели 300 датчиков, установленных на автомобиле, со значениями, полученными при виртуальном (цифровом) испытании (моделировании).

Указанная погрешность моделирования сохраняется при высокоскоростных нелинейных деформациях, расчеты которых являются одной из сложнейших задач механики.

- **Ключевые понятия в рамках презентации:**
 - **Инжиниринг продукта / промышленного объекта** – 2D/3D-моделирование, инженерные расчеты и привязка к его производству
 - **Промышленный дизайн (Product Design)** – разработка внешнего вида продукта или оборудования и его функционала
 - **ЕРС(М)** – (engineering, procurement, construction, management) – услуги по инжинирингу, поставке, строительству (и управлению проектом)
- **Дополнительные понятия:**
 - **CAD** – Computer-Aided Design / drafting – черчение, оформление конструкторской документации; 3d-моделирование, метрические расчеты, реалистичная визуализация, взаимное преобразование 2d и 3d моделей
 - **CAE** – Computer-Aided Engineering – инженерные расчеты: анализ прочности, динамическое моделирование, симуляция физических процессов, проверка и оптимизация изделия
 - **CAM** – Computer-Aided Manufacturing – привязка продукта к его производству (к цепочке завода) через программирование ЧПУ / автоматизированных производственных систем

Более того, некоторые автопроизводители, в случае, когда не применялись новые материалы и новые технологии, получают точность виртуальных испытаний $\pm 2\%$. При таких высоких показателях точности моделирования и при выполнении нескольких дополнительных условий автомобиль может пройти сертификацию без натурных испытаний – именно это и называют «цифровой сертификацией».

Для достижения высокой точности проектирования необходимо применять высокоадекватные математические модели материалов и изделий и проводить виртуальные испытания для гарантированного выполнения всех требований, предъявляемых к продукту. Ниже приведены некоторые количественные значения параметров и характеристик в автомобилестроении.

- **Материалы.** Изделие может включать более 200 материалов, по каждому материалу может быть более 10 кривых деформирования в зависимости от скорости деформации, более 10 свойств материалов и до 7 критериев разрушения с моделями повреждаемости.
- **Технологии изготовления.** На этапе компьютерного инжиниринга проводится итеративное моделирование, во время которого одновременно формируется геометрия изделия, проверяется соответствие всем нагрузкам и другим требованиям, а также проверяется

возможность произвести каждую конкретную деталь, т.е. проводится виртуальная технологическая подготовка производства и непосредственно виртуальное изготовление изделия (моделирование штамповки, литья, фрезерования и т.п.).

Пример: разработка капота автомобиля с такой внутренней структурой, которую гарантированно возможно отштамповать на оборудовании конкретного автомобильного завода заказчика.

- Для виртуальных испытаний могут использоваться до 12 виртуальных манекенов, более 10 000 датчиков, более 20 барьеров, более 20 систем ударников.
- Учитываются и контролируются достижение по каждому из более 100 000 целевых показателей и ограничений, учитываются более 200 мировых стандартов и требований к автомобилю.

Точность проектирования в автомобилестроении на примере краш-теста



Погрешность: не более 5% по 300 датчикам в динамике

[6,7].

Высокоадекватные математические модели, позволяющие достигать точности моделирования $\pm 5\%$ и выше называются «**цифровыми двойниками**» (**Digital Twin**) и являются основой цифрового проектирования и моделирования [6,7].

Что необходимо учитывать для высокой точности проектирования



[6,7].

Как уже отмечалось ранее, цифровые двойники создаются и для изделий, и для производственных процессов. Рынок цифровых двойников в данный момент формируется, поэтому каждая из компаний-лидеров использует свою трактовку, однако общая суть сохраняется.

Возможности цифрового проектирования и моделирования позволили в автомобилестроении за 10 лет – с 2007 по 2017 год – уменьшить в 20 раз (с 100 до 5) среднее число натурных испытаний благодаря 100-кратному росту числа виртуальных испытаний (с 100 до 10 000). Для достижения таких результатов потребовалась дигитализация («оцифровка») всех изделий и процессов – эта программа «Разработка 4.0» (Entwicklung 4.0) стала основой, базой для более известной программы «Индустрия 4.0».

Значительное снижение числа натурных испытаний позволяет снижать расходы на разработку продуктов и снижать срок вывода новых продуктов на рынок. Цифровой двойник изделия позволяет проводить и пре-

дикативный анализ ресурса, т.е. снижать затраты на ремонт, проводя необходимое обслуживание заранее и не доводя до серьезного ремонта.

Примером может быть анализ ресурса самолетов («бортов»). На двух действующих бортах установлены датчики (health monitoring system), которые передают показания в цифровые двойники обоих бортов. В программах компьютерного инжиниринга на виртуальных испытательных полигонах проводится моделирование функционирования бортов непосредственно с учетом тех реальных нагрузок, которые фиксируют датчики.

Это позволяет обнаруживать начало возникновения дефектов и деформаций, например, в композитных крыльях, до того, как они станут визуально заметны обслуживающему персоналу. Соответственно, обслуживание или ремонт будет подготовлен и проведен заранее, повышая безопасность полетов, снижая затраты на срочные замены и без штрафов от эксплуатирующей компании за внеплановый простой самолетов.

Учитывая вышесказанное, ***цифровое проектирование и моделирование являются ключевой технологией для быстрого создания глобально конкурентоспособной продукции нового поколения.***

2.2 Цифровые двойники объектов, процессов и систем

В эпоху IV промышленной революции («Индустрии 4.0») лидирующие мировые позиции заняли те высокотехнологичные предприятия, которые осуществили цифровую трансформацию производства, чем обеспечили достижение принципиально нового уровня разрабатываемой и производимой продукции.

Ключевую роль в этом процессе играет применение передовых производственных технологий, и в первую очередь – цифрового проектирования и моделирования, которые позволяют промышленным компаниям – лидерам рынка в кратчайшие сроки разрабатывать и создавать глобально конкурентоспособную (best-in-class) продукцию нового поколения в любых отраслях.

Уже не первый год российское руководство обозначает необходимость значимого рывка, прорыва страны в самых различных сферах, и не в последнюю очередь – в области науки, подготовки высококвалифицированных кадров, внедрения передовых производственных технологий, развития уникальных компетенций мирового уровня.

Государство применяет целый ряд мер поддержки технологического развития отечественных производств, среди которых можно назвать, в частности, государственные программы, которые имеют статус стратегических: Стратегия научно-технологического развития РФ (СНТР), программа «Цифровая экономика Российской Федерации», Национальная технологическая инициатива (НТИ).

В 2018 году в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (СПбПУ) образован Центр компетенций НТИ «Новые производственные технологии», ставший инфраструктурной основой взаимодействия научных, образовательных и промышленных организаций в целях обеспечения глобальной конкурентоспособности отечественных компаний-лидеров на рынках НТИ и в высокотехнологичных отраслях промышленности. Центр НТИ СПбПУ собрал крупнейший консорциум лидеров промышленности, науки и образования, который по состоянию на июль 2020 года насчитывает 74 участника и более 25 компаний-партнеров. Среди них – крупнейшие российские корпорации: «Ростех», «Росатом», ОДК, ОАК, ОСК; «национальные чемпионы» и лидеры инноваций.

В числе ключевых компетенций Центра НТИ СПбПУ – новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции на основе цифровых двойников объектов, процессов и систем [7].

Приказом № 979-ст руководителя Росстандарта Шалаева А.П. 16 сентября 2021 года был утвержден национальный стандарт Российской Федерации - ГОСТ Р 57700.37–2021 **«Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения»** [8].

Как отмечает Росстандарт, ГОСТ Р 57700.37–2021 является **полностью отечественной разработкой. Впервые в мире вводится нормативный документ, сфокусированный на создании изделий с помощью технологии цифровых двойников**, а не оцифровке производственной инфраструктуры и логистики, и устанавливается соответствующее единое определение **«цифрового двойника изделия»**.

Также в документе впервые введено определение **«цифровая модель изделия»**, стандартизованы следующие понятия:

«цифровые (виртуальные) испытания»;

«цифровой (виртуальный) испытательный стенд»;

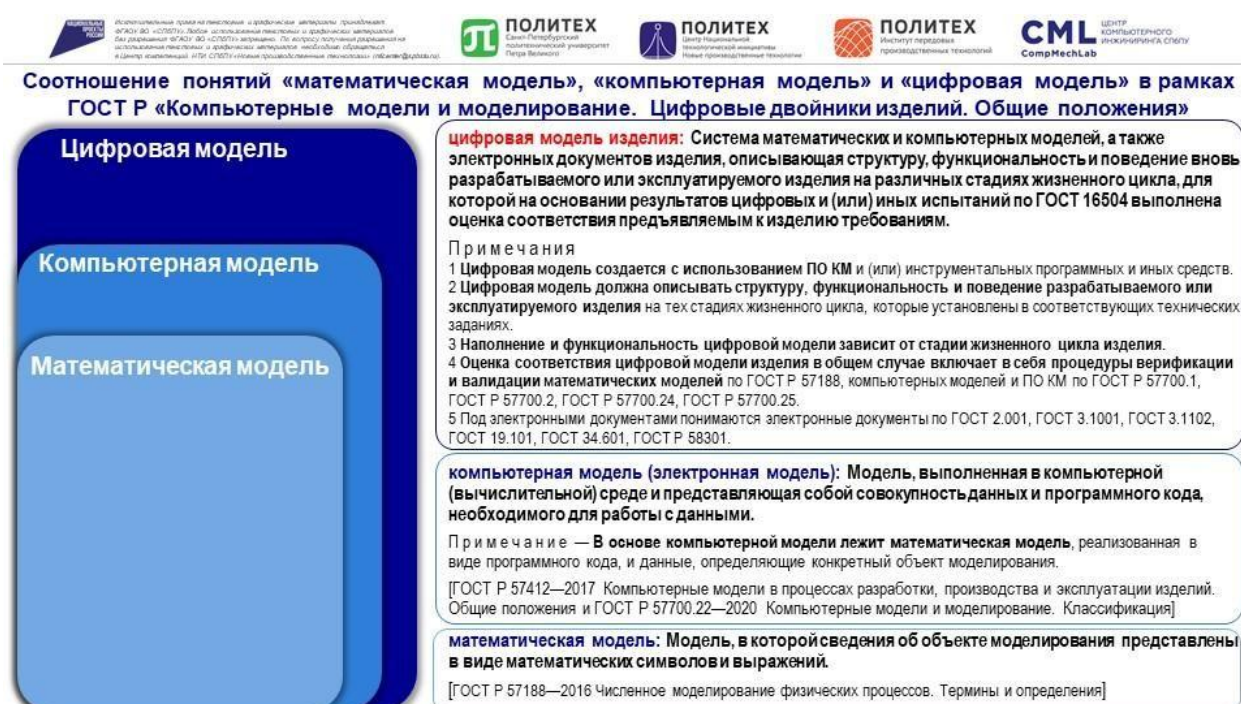
«цифровой (виртуальный) испытательный полигон».

Стандарт разработан специалистами Центра НТИ **«Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ)** совместно со специалистами ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») в соответствии с *«Программой национальной стандартизации на 2020» год и «Программой национальной стандартизации на 2021 год»*.

Работа выполнялась в рамках деятельности **технического комитета 700 «Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии» (ТК 700)**. Для разработки национального стандарта на заседании ТК 700 21 июля 2020 года была создана **рабочая группа «Цифровые двойники»**, которую возглавил проректор по цифровой трансформации СПбПУ, руководитель Научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии», Центра компетенций НТИ «Новые производственные технологии» и Инжинирингового центра CompMechLab® СПбПУ **Алексей Боровков** [6,7,8].

Активное участие в деятельности рабочей группы приняли полномочные представители 25 высокотехнологичных предприятий и отраслевых институтов России, таких как: ФГУП «Крыловский государственный научный

- «Система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям».



[6,7].

Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, изменяясь в сторону повышения своего уровня адекватности на каждой стадии.

«Цифровой двойник – это передовая технология, созданная на пересечении материального и цифрового миров, которая становится драйвером устойчивого экономического развития высокотехнологичных компаний в рамках четвертой промышленной революции. Активное применение этой наукоёмкой мультидисциплинарной технологии наблюдается во всех отраслях, именно эта технология выступает технологией-интегратором других передовых технологий и технологией-драйвером

устойчивого развития. Учитывая это, крайне важна своевременная разработка и принятие нормативно-технических документов, регулирующих терминологию, общие положения и применение передовых технологий для создания высокотехнологичных промышленных изделий» [7].

Настоящий национальный стандарт Российской Федерации - ГОСТ Р 57700.37–2021 **«Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения»** - определяет общие положения разработки и применения цифровых двойников изделий. Текущий уровень развития науки и техники позволяет создавать **математические и компьютерные модели, описывающие с высокой степенью адекватности поведение изделий промышленности на всех стадиях жизненного цикла.**

Разрабатываемые математические и компьютерные модели могут отражать различные характеристики и свойства изделий. Объединяя различные математические и компьютерные модели в единую систему, можно получить новую сущность — **цифровой двойник** — которая позволяет всесторонне описать изделие и системно подойти к разработке, производству и эксплуатации изделий. Применение цифровых двойников изделий в промышленности является **развитием парадигмы компьютерного моделирования и цифрового инжиниринга изделий.** Для целей настоящего стандарта классификацию компьютерных моделей рекомендуется выполнять по ГОСТ Р 57700.22.

Настоящий стандарт определяет **общие положения создания цифровых двойников как для вновь разрабатываемых изделий (еще не созданных), так и для ранее спроектированных или уже эксплуатируемых изделий.**

В настоящем стандарте жизненный цикл изделия рассматривается в соответствии с ГОСТ Р 56136. Действие стандарта ограничивается стадиями разработки, производства и эксплуатации изделия.

Внедрение технологии цифровых двойников **на стадии разработки изделия** позволит улучшить качество проектирования изделия, обеспечить выполнение технических и тактико-технических требований, сократить количество и повысить результативность проводимых испытаний опытного образца и проработку конструкторской документации изделия на технологичность.

Внедрение технологии цифровых двойников **на стадии производства** серийных изделий позволит откорректировать и (или) разработать технологическую документацию изделия в зависимости от конкретных производственных условий.

Внедрение технологии цифровых двойников **на стадии эксплуатации** изделия позволит:

- при применении (использовании) изделия по назначению – автоматизировать и выполнять обоснованное планирование применения изделия в зависимости от его функциональных свойств и технического состояния;
- при выполнении мероприятий технической эксплуатации – принимать обоснованные решения о техническом обслуживании и ремонте изделия.

Новизну Стандарта подчеркивает тот факт, что из 27 приведенных в документе определений 11 вводятся впервые: **«адекватность модели», «валидация модели изделия», «валидация программного обеспечения компьютерного моделирования», «верификация программного обеспечения компьютерного моделирования», «многоуровневая система требований», «сертификация программного обеспечения компьютерного моделирования», «цифровая модель изделия», «цифровой двойник изделия», «цифровые (виртуальные) испытания», «цифровой (виртуальный) испытательный стенд» и «цифровой (виртуальный) испытательный полигон».**

ГОСТ Р 57700.37–2021 является первым в серии национальных и отраслевых стандартов по цифровым двойникам, планируемых к разработке в ближайшее время.

Стандарт начнет действовать с 1 января 2022 года и распространится на изделия машиностроения, однако, при необходимости, на его основе в дальнейшем могут разрабатываться стандарты, устанавливающие требования к цифровым двойникам изделий различных отраслей промышленности с учетом их специфики.



[6,7].

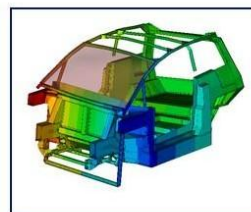
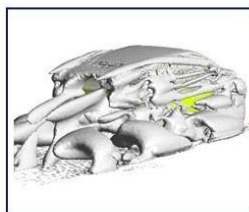
Примерами того, как применение новых производственных технологий (цифровых двойников, виртуальных испытательных стендов и полигонов) позволяет значительно ускорить разработку и снизить её себестоимость, а также достичь принципиально новых потребительских качеств изделия, могут служить [7]:

- созданный с нуля за 2 года электромобиль «КАМА-1»;
- технологические решения для универсальной платформы проектирования электротранспорта CML-CAR™;
- разработка несущей системы грузового автомобиля;

- принципиально новая конструкция основного элемента системы очистки бурового раствора - "вибросито";
- конструктивные решения для авиационного газотурбинного двигателя;
- технические решения и прототипы устройств для создания глобально конкурентоспособных газовых турбин;
- семейство многоцелевых высокооборотных дизельных двигателей;
- принципиально новая конструкция антарктических саней для перевозки сверхтяжелых крупногабаритных грузов;
- концепт и элементы конструкции перспективного самолета-амфибии;
- виртуальные испытательные полигоны «Крыло», «Вертолет» и другие высокотехнологичные решения.

Интересно, что данные технологии применяются не только в машиностроении, но и, например, для изучения поведения внутренних органов торса человека при внешнем механическом воздействии. Напомним, что с начала деятельности Центра НТИ СПбПУ в 2018 году специалистами Центра было выполнено **более 250 НИОТКР проектов с применением технологии цифровых двойников** [6,7].

ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ «КАМА-1» – КОМПЛЕКСНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕДОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И НАУКОЕМКИХ ПЛАТФОРМЕННЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ И ФИНАНСОВЫХ ЗАТРАТ НА РАЗРАБОТКУ МОДЕЛЬНОГО РЯДА



800+ виртуальных испытаний на специализированных виртуальных стендах

85 новых научных и научно-технических результатов

1. Разработаны многоуровневые матрицы 20 000+ целевых показателей и ресурсных ограничений в части стиля, электрики и электроники, пассивной безопасности, жесткости, прочности, виброакустического комфорта, кинематических, эластокинематических и динамических характеристик подвески, управляемости и устойчивости электромобиля.
2. Созданы методики полномасштабного цифрового проектирования подвески, кузова, навесных элементов кузова электромобиля.
3. Созданы, верифицированы и валидированы методики многокритериальной / многопараметрической / многодисциплинарной / топологической / ... оптимизации характеристик кузова электромобиля.

4. Созданы виртуальные испытательные стенды и виртуальные испытательные полигоны, обеспечивающие в процессе проектирования создание «best-in-class» подвески, кузова, навесных элементов.
5. Проведено 800+ испытаний на специализированных виртуальных испытательных стендах.
6. Разработан «умный» цифровой двойник электромобиля.
7. Изготовлены и прошли стендовые и натурные испытания подвеска, кузов, навесные элементы кузова.
8. Создан экспериментальный образец электромобиля и проведены натурные испытания экспериментального образца.
9. Индустриальным партнером KAMAZ создана система ADAS (интеллектуальная система помощи водителю).



[6,7].

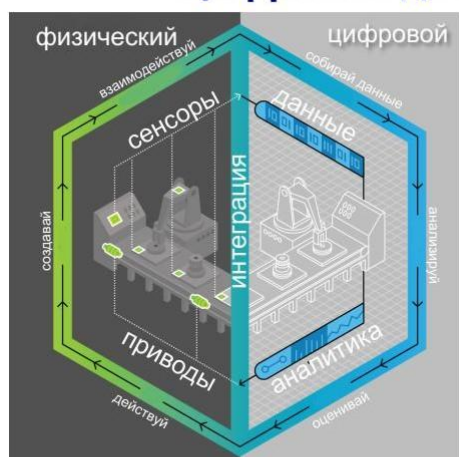
Справка

Уникальная серия национальных стандартов ГОСТ Р 57700, первые стандарты которой появились в 2017 году, объединяет уже более 25 документов по стандартизации и формирует систему нормативных технических требований для применения компьютерных моделей и виртуальных испытаний в процессе создания и обеспечения эксплуатации высокотехнологичных промышленных изделий, в том числе военной техники.



Текст ГОСТ Р 57700.37—2021 доступен по ссылке [8, 9].

Цифровой двойник (Digital Twin)



Цифровой двойник — **единая модель**, достоверно описывающая **все характеристики, процессы и взаимосвязи** как для отдельного объекта, так и для всего производства.

Создается **виртуальная копия физического мира**, в котором фиксируются **все данные** о материалах, особенностях конструкции, произведенных операциях, испытаниях.



Источник: Deloitte

Источник: Digital Engineering, 2017
<http://www.digitaleng.news/digital-twins-land-a-role-in-product-design/>

[6,7].

Согласно новому ГОСТу введены такие определения как верификация, валидация, «умные модели» и другие. (См. Приложение А к настоящему МУ).

Дигитализация, применение «цифровых двойников» – основа для развития Индустрии 4.0



[6,7].

Технология цифровых двойников охватывает весь жизненный цикл продукта: от этапа проектирования, включая НИР и ОКР, производства – и до этапа послепродажного обслуживания и утилизации. Цифровой двойник «обучаем» в процессе эксплуатации, он становится «умнее» – этот процесс сопровождается пополнением базы данных, базы решений, базы знаний.

Основу цифрового двойника составляет **гиперматрица требований / целевых показателей и ресурсных ограничений**, которая формируется в ходе системного подхода (**Model-Based Systems Engineering, MBSE**). Для проектирования, производства и эксплуатации сложного технического объекта формируются сотни требований, которые затем каскадируются и декомпозируются на тысячи, десятки тысяч целевых показателей, конфликтующих между собой на всех уровнях.

В качестве ресурсных ограничений выступают временные ограничения («проектирование и производство в заданные сроки»), финансовые ограничения (проектирование и производство/строительство на «заданную стоимость»), технологические, производственные, эксплуатационные, экологические, логистические и многие другие. Пример такой гиперматрицы показан на рисунках ниже.



Гиперматрица требований / целевых показателей и ресурсных ограничений высокотехнологического проекта (Центр НТИ СПбПУ) [6,7].



Перенесение изменений на этап проектирования в рамках новой парадигмы проектирования и моделирования на основе цифровых двойников [6,7].

К настоящему времени ведущие мировые научные и производственные организации активно применяют такую производственную и бизнес-модель, в которой конкурентный «центр тяжести» в различных разработках смещен именно на этап проектирования.

Еще в 2013 году в документе военно-воздушных сил США «Global Horizons. United States Air Force Global Science and Technology Vision» («Глобальные горизонты. Глобальное научно-технологическое видение ВВС США») цифровые двойники были названы «фактором, радикально меняющим существующее положение дел» (Game Changers).

Рост особой актуальности Digital Twins был отмечен аналитическим агентством **Gartner** (Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies) в 2017 году.

Насколько серьезна востребованность компетенций в области цифрового проектирования и моделирования в промышленно развитых странах сегодня, может продемонстрировать принятие в 2018 году Соединенными Штатами Америки «Стратегии цифрового инжиниринга» в реализации Стратегии национальной обороны США.

В документе [10,11], в частности, говорится: «Чтобы... обеспечить технологическое превосходство США, Министерство обороны США осуще-

свляает трансформацию сложившейся инженерной деятельности в «цифровой инжиниринг» путем включения технологических инноваций в интегрированный подход на основе цифрового моделирования... Цифровой инжиниринг должен обеспечить смену парадигмы и переход от традиционного подхода «проектирование – производство – испытания» (traditional design-build-test methodology) к подходу «моделирование – инженерные расчеты – производство» (model-analyze-build methodology). Использование нового подхода обеспечит апробирование принятых решений, создание прототипов и проведение испытаний изделий в виртуальной среде, прежде чем они будут поставлены на вооружение... Переход к цифровому инжинирингу позволит при создании новой техники перенести риски в цифровую среду и ускорит процесс поступления образцов ВВСТ в войска... Цели, определенные в Стратегии, представляют собой план Министерства обороны США по расширению возможностей в области инжиниринга, который способствует защите США и их национальных интересов».

В Указе Президента Российской Федерации от 21.07.2020 г. №474 «**О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года**» одной из целей обозначена **цифровая трансформация**. Одной из основных задач этого процесса становится переход к **цифровой промышленности**, основа которой – цифровое проектирование и моделирование. Сегодня как никогда технологическое лидерство означает не просто экономическое благополучие, оно гарантирует саму возможность развития страны и сохранения ее суверенитета [7].

3 Практическая часть самостоятельной работы

3.1. Ссылки на цифровые двойники устройств или технологий, примеры проектов, схем, рисунков к технологиям разработки цифровых двойников

Специалисты Центра НТИ СПбПУ (ключевого подразделения – **Инжинирингового центра CompMechLab® СПбПУ**) выполнили сотни уникальных проектов из самых разных отраслей (автомобилестроение, двигателестроение, атомное и нефтегазовое энергостроение, авиастроение и ракетно-космическая отрасль, железнодорожный транспорт, судостроение и кораблестроение, металлургия) с применением цифрового проектирования и моделирования, технологии разработки цифровых двойников [7]. В числе прочих выполнялись проекты и в интересах ОПК.

Приведем **примеры некоторых из них:**

Конечно-элементное моделирование динамических процессов, возникающих при посадке истребителя на палубу авианосца (палубный аэрофинишер):



Моделирование динамических процессов, возникающих при посадке истребителя на палубу авианосца [6,7].



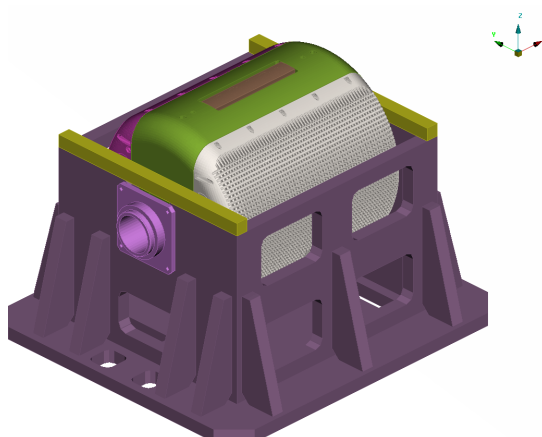
Моделирование разрыва троса аэрофинишера [6,7].

Целью проекта было создание цифрового двойника аэрофинишера. В рамках проекта эта технология была применена впервые в отрасли.

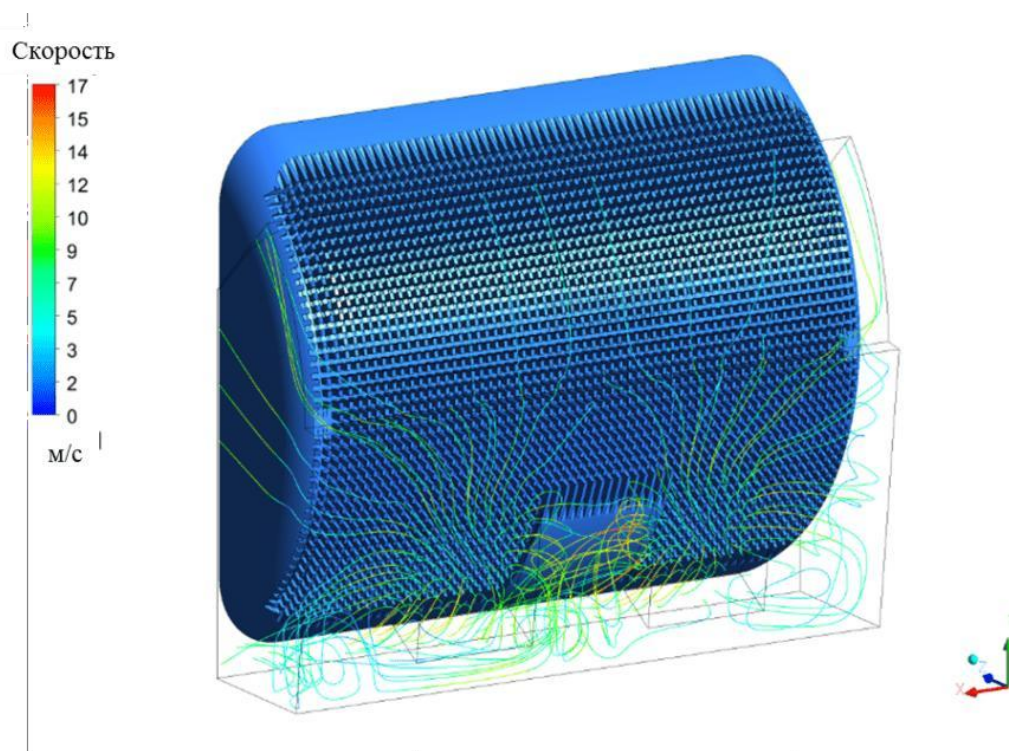
Разработанный цифровой двойник конструкции позволяет рассчитывать динамические характеристики как тормозного устройства (палубного аэрофинишера), так и самолета; определять чувствительность всей системы к изменению конструкционных и эксплуатационных параметров; рассчитывать нагрузки, действующие на пилота истребителя; осуществлять многопараметрическую комплексную оптимизацию характеристик тормозного устройства.

На протяжении нескольких лет разработанные модели позволяют обслуживать производимые конструкции, оптимизировать их в соответствии с изменяющимися требованиями заказчика.

- **Оптимизация параметров блока оптико-механического:**



Испытательная установка [6,7].



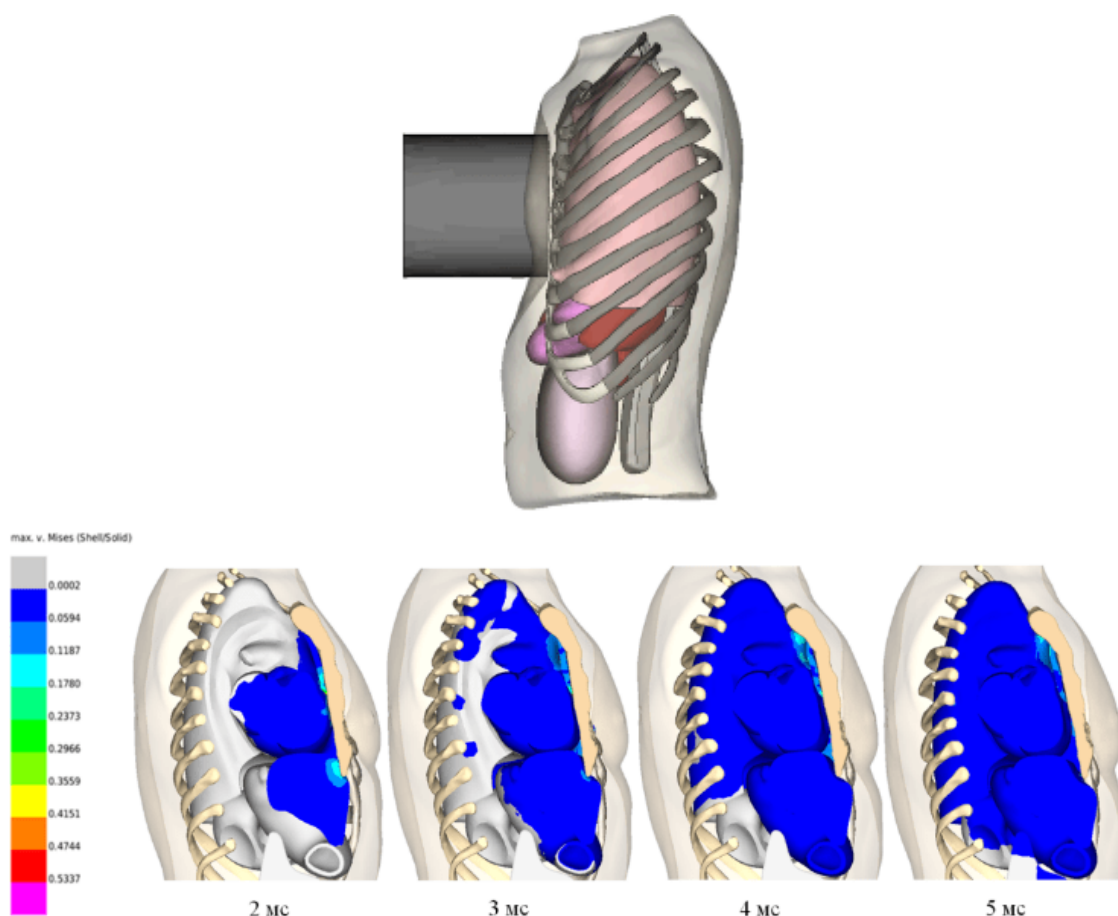
Оптимизация воздушных потоков [6,7].

В ходе проекта разработан цифровой двойник натурального образца устройства, описывающий динамические характеристики оригинала, проведена его валидация по результатам натурных испытаний. На основе цифрового двойника проведены ряд виртуальных испытаний динамических характеристик устройства, по результатам которых определен список отклонений характеристик от целевых показателей и проведена многовариантная оптимизация составных частей устройства.

На основе выполненных работ были предложены варианты доработки конструкции с целью повышения теплоотведения, разработана методика проведения оценки динамических характеристик и их оптимизации для аналогичных оптико-механических устройств, проведен курс обучения сотрудников заказчика, основанный на разработанной методике.

Результаты проекта позволят сократить сроки проектирования оптико-механических устройств, уменьшить количество производимых опытных образцов за счет перевода экспериментальной части работ в виртуальную среду до проведения сертификационных испытаний.

- **Моделирование поведения внутренних органов торса человека при обстреле поражающими элементами:**

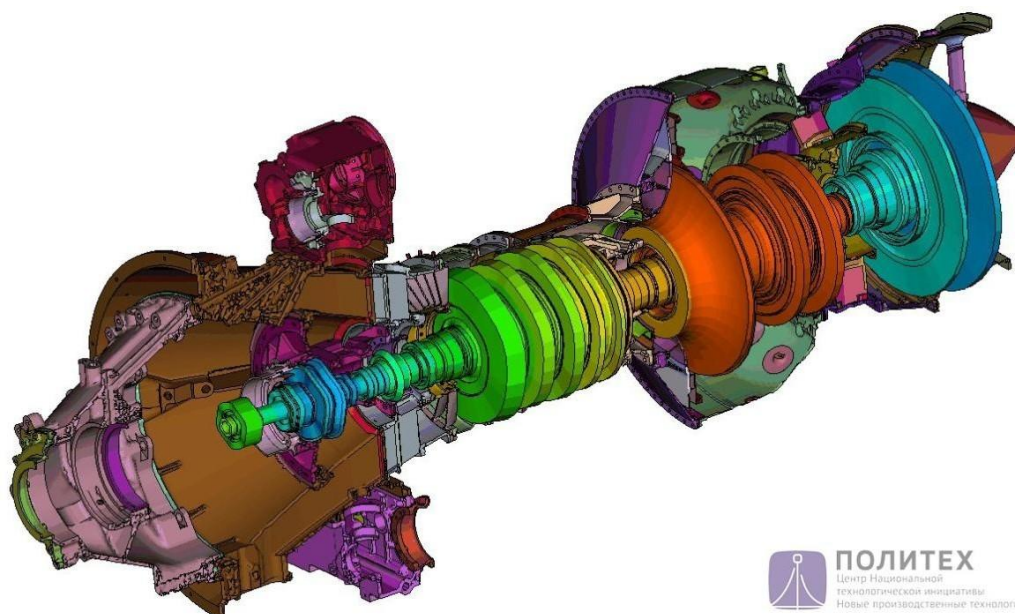


Результат цифрового моделирования: распределение поля напряжений внутри основных органов торса человека при ударе сферическим импактором в область грудной клетки [6,7]..

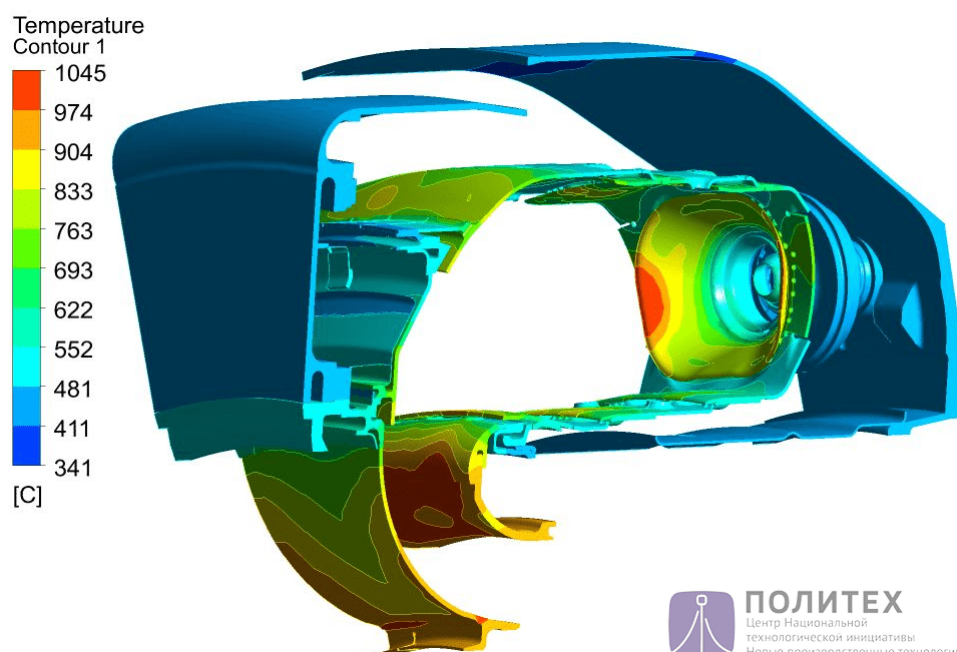
В ходе проекта на основе данных магнитно-резонансного обследования были созданы расчетные модели внутренних органов и костей, математические модели биологических материалов, разработан и реализован алгоритм обработки графиков давления и ускорения, проведено более 100 виртуальных испытаний, позволяющих сформировать критерии оценки тяжести травм внутренних органов при обстреле поражающими элементами. Разработана программа, позволяющая автоматизировать проведение соответствующих виртуальных испытаний и их оценку.

Результаты проекта позволят избежать проведения большого количества дорогостоящих, а иногда и невыполнимых натурных экспериментов – в особенности, когда речь идет о здоровье вовлеченного в испытания человека.

Снижение массы многоцелевого двигателя ТВ7-117СТ-01 на основе технологии «цифровой двойник».



Поле перемещений собственных форм колебаний роторов [6,7].



Виртуальные испытания камеры сгорания и экспорт полей температуры и давления для расчетов прочности статора двигателя [6,7].

Эта разработка стала во многом уникальной как для отрасли, так и для российской промышленности в целом. Проект – первый и пока единственный пример в отрасли комплексного подхода к полной формализации процесса проектирования газотурбинного двигателя (ГТД) с детальным описанием всех контролируемых параметров и целевых значений, интеграцией всех расчетных моделей, создаваемых при проектировании изделия. Кроме того, это первый для отечественного двигателестроения пример оптимизации ГТД на основе технологии цифрового двойника с оцифровкой многолетнего опыта предприятия, полученного в результате разработки двигателей: от базовых экспериментов и определения свойств материалов до описания физико-механических параметров эксплуатации изделия.

В ходе проекта разработаны виртуальные испытательные стенды и полигоны, интегрированные в CML-цифровой платформе CML-Bench™; создана база математических моделей материалов и методики виртуальных испытаний ГТД. Перепроектирована конструкция статорных деталей ГТД, обеспечивающая выполнение предъявленных требований, включая требования по ресурсу, удержанию лопатки при ее обрыве и др. *Масса отдельных деталей снижена до 50%.*

В данный момент Центр НТИ СПбПУ участвует в проекте «**Платформа параллельного проектирования**». Цель проекта – создание отечественной платформы функционирования центров параллельного проектирования и разработки цифровых двойников изделий и образцов ВВСТ для нужд организаций ОПК.

В числе решаемых задач проекта:

- создание, развитие и внедрение отраслевой отечественной платформы для разработки цифровых двойников изделий и образцов ВВСТ на основе решений инженерного анализа и математического моделирования в организациях ОПК;
- пилотное внедрение ЦПП ОПК в части разработки цифровых двойников изделий и образцов ВВСТ;

- тиражирование методологии ЦПП в организациях ОПК в части разработки цифровых двойников изделий и образцов ВВСТ;
- создание системы сертификации программного обеспечения для формирования и применения компьютерных моделей в процессе разработки цифровых двойников изделий ВВСТ [7].

3.2 Примеры многоуровневого моделирования производственных систем и применяемого программного обеспечения при создании цифровых двойников

Задача оцифровывания объектов и процессов реального производства актуальна и реализуется за счет моделирования на трех уровнях: технологической операции, технологического процесса и производственного процесса. Вертикальные связи между уровнями, горизонтальные связи со смежными технологиями и объектами реального мира (концепция «Цифровой двойник») позволяют получить синергетический эффект при организации производств.

Производственная система — это совокупность технологических компонентов (оборудования, транспортных линий, оснастки), потоков ресурсов и информации в рамках одного предприятия. При создании имитационной модели предприятия производственную систему в зависимости от поставленных задач можно рассматривать на трех уровнях детализации:

- уровень отдельной технологической операции;
- уровень технологического процесса;
- уровень производственного процесса.

Схема уровней моделирования показана на **рис. 1**. Технологический процесс — это процесс изменения состояния деталей, заготовок или сырья в изделие путем последовательного выполнения технологических операций. Как правило, на предприятии реализуется более одного технологического процесса (в зависимости от типа производства и широты номенклатуры). Изготовленные компоненты составных устройств поступают на линии сборки,

где реализуются технологические процессы сборки. Модель технологического процесса включает все операции: как основные (связанные с изменением формы и свойств материала заготовки), так и вспомогательные (контроля, транспортирования и др.) [12, 13].

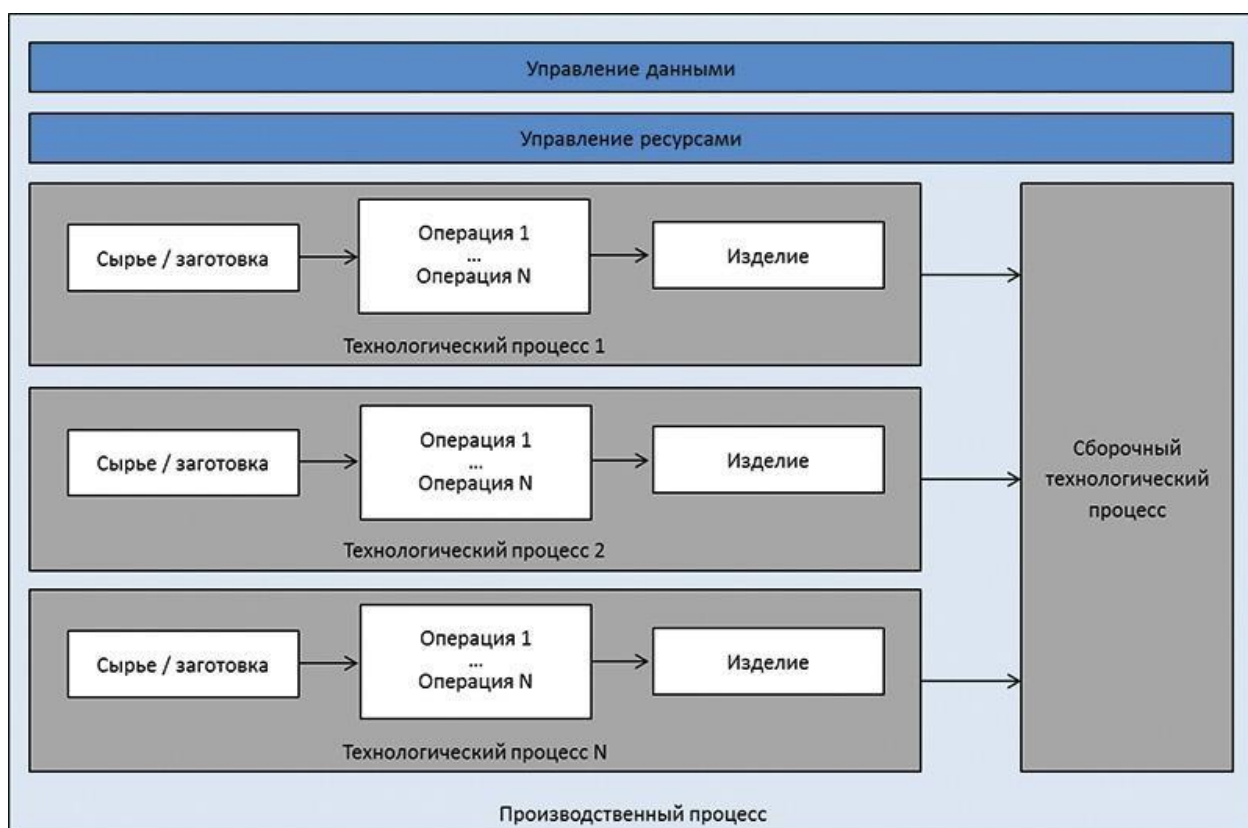


Рис. 1. Многоуровневая модель производственной системы [12, 13]

Модель производственного процесса помимо основных технологических процессов, непосредственно связанных с получением конечной продукции, включает вспомогательные процессы преобразования различных видов материальных и информационных ресурсов в продукцию предприятия и сопутствующие услуги. К ним относится *управление поставками, складами, человеческими ресурсами* и др. **A. RAMI 4.0** [14].

Стоит отметить, что описанная многоуровневая модель структуры производственного процесса, в свою очередь, находится в более сложной экосистеме, представление о которой дает *стандартизованная архитектурная модель RAMI 4.0* [14]. Поскольку данная система координат производствен-

ного сектора экономики принята на уровне стандартов (IEC 62264//IEC61512; IEC62890), стоит определить на ней область, к которой принадлежат рассматриваемые в данной статье модели производственных систем и процессов.

Их взаимодействие с другими уровнями модели RAMI 4.0 описывается в разделе **«Переход к созданию цифрового двойника»**. На оси уровней иерархии, отражающей структуру заводов или подразделений, описываемые далее в статье модели занимают отрезок от «продукт» до «производственный участок», частично затрагивая задачи, решаемые на уровне «предприятие». На левой горизонтальной оси, на которой представлен жизненный цикл услуг и продуктов, эти модели охватывают этапы от разработки изделия и выбора технологии его изготовления до подготовки производства, получения управляющих программ для оборудования и алгоритмов синхронизации его работы в условиях автоматизированных ячеек. На вертикальной оси, на которой указаны уровни декомпозиции системы, границы моделирования находятся в пределах от «интеграция» до «функционал». Таким образом, модели, рассматриваемые в статье, функционируют в довольно большом пространстве в рамках RAMI 4.0, что подчеркивает актуальность рассматриваемой темы виртуального моделирования производственных систем.

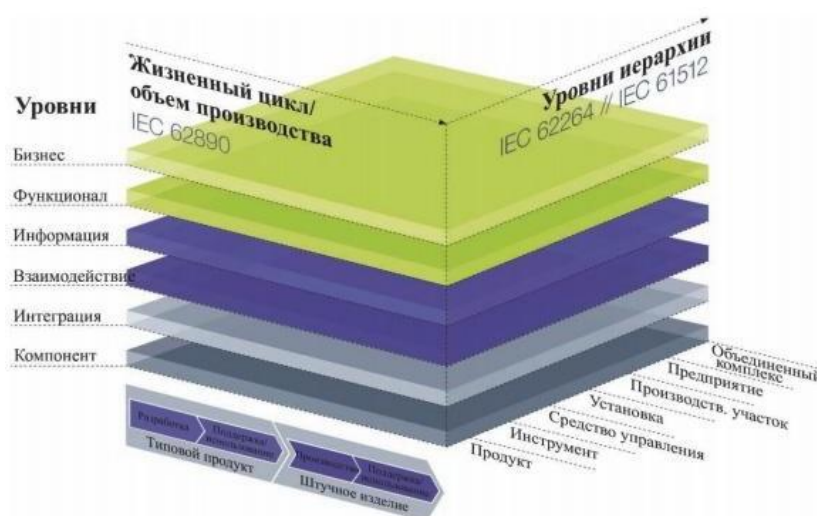


Рис. 2. Горизонтальные и вертикальные уровни стандартизированной архитектурной модели RAMI 4.0 [12, 13, 14]

В. Моделирование на уровне технологической операции

На уровне технологической операции моделируется процесс изменения формы или свойств материала заготовки: механической обработки (точение, фрезерование и др.), обработки давлением (штамповка, ковка), термической обработки, литья металлических и полимерных материалов и др. В качестве исходных данных выступает информация о свойствах материала заготовки, конструкции изделия, оборудования и технологической оснастки, предварительно выбранных технологических режимах.

Моделирование осуществляется с помощью *специализированных САЕ-систем*, основанных на методе конечных элементов, и др. С помощью модели технологической операции решаются следующие задачи [15]:

- отработка конструкции на технологичность;
- разработка технологического процесса производства изделия — выбор технологических режимов для каждой конкретной операции;
- проектирование и производство технологической оснастки;
- оценка стоимости производства.

Разработка моделей технологических процессов и отдельных технологических операций позволяет выявить и решить потенциальные проблемы на этапе производства еще на ранних стадиях и предотвратить появление производственного брака.

Для ряда современных промышленных технологий, таких как аддитивные технологии, производство изделий из композиционных материалов и др., характерно выраженное взаимное влияние параметров технологического процесса на свойства конечного изделия [16]. В таком случае одновременно с моделью технологической операции создается модель изделия, учитывающая его микроструктуру, сформированную в процессе изготовления, *а процесс моделирования носит итерационный характер.*

Важный результат моделирования технологической операции — расчетное время ее выполнения. Эти данные используются при построении имитационной модели технологического процесса — **модели производственной ячейки.**

Рассмотрим практическую реализацию многоуровневой модели промышленной системы на примере приборостроительного производства, продукцией которого являются приборы с полимерными оптическими элементами. При производстве данной продукции реализуются технологические процессы механической обработки, литья полимерных материалов и сборки. На уровне технологической операции рассмотрим модель операции литья термопластичного полимерного материала под давлением [17]. Процесс литья под давлением состоит из этапов заполнения литевой формы расплавленным материалом, выдержки под давлением, охлаждения и извлечения отливки из формы. Все эти этапы отражены в расчетной модели процесса (рис. 3), которая была создана с помощью **программного обеспечения Moldex3D (CoreTech System, Ltd.).**

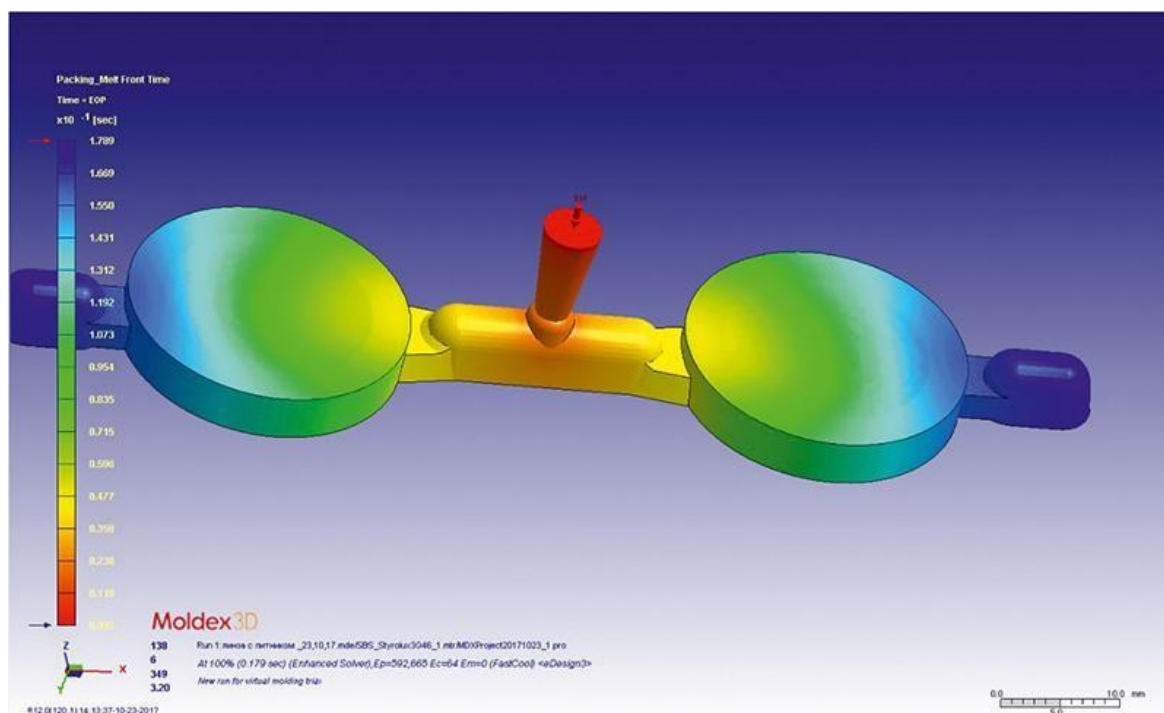


Рис. 3. Время выдержки под давлением (как показано в Moldex3D) [12, 13]

В качестве исходных данных выступали сведения о реологических и термомеханических свойствах полимерного материала, конфигурации формообразующей полости и расположении впускных литниковых каналов, устройстве системы охлаждения, параметрах технологического процесса (температура, давление и др.).

Результатом моделирования являлись следующие виды данных:

- распределение температур в конструкции;
- величины остаточных напряжений;
- наличие пор в материале;
- наличие и положение зон спая.

С использованием результатов моделирования на операционном уровне были выбраны технологические параметры, обеспечивающие наилучшее качество изделия. К числу варьируемых параметров относилось время впрыска, выдержки и раскрытия формы. ***Время выполнения цикла литья***, определенное с помощью расчетной модели, было ***использовано при построении имитационной модели автоматизированного роботизированного участка литья полимеров под давлением***.

С. Моделирование на уровне технологического процесса.

На уровне технологического процесса моделируется совокупность процессов изменения формы заготовки при изготовлении изделия или изменения состава изделия в процессе операций сборки или разборки. Также на этот уровень выносятся моделирование работы автоматизированных линий и участков, на которых технологический процесс реализуется полностью в рамках одной производственной ячейки, состоящей из различных технологических модулей (обрабатывающих, транспортных, сборочных и т. д.).

В качестве *исходных данных выступает информация о выбранной технологии производства (в виде маршрутных технологических процессов)*, параметрах, полученных при моделировании отдельных технологических операций, о геометрических ограничениях производственных участков, на которых располагается или должно располагаться оборудование, его составе в рамках производственного участка, а также 3D-модели отдельных станков и технологической оснастки, роботов и других устройств автоматизации и механизации.

С помощью *модели технологического процесса решаются следующие задачи:*

- программирование отдельных устройств автоматизации для выполнения заданных операций в рамках основного или вспомогательного процесса;
- определение длительности операций для устройств автоматизации с учетом управляющих программ;
- синхронизация совместно работающих устройств на уровне виртуальных контроллеров и логических последовательностей сигналов и переменных, запускающих или останавливающих выполнение заранее заданных программ;
- расчет времени рабочих циклов для автоматизированных ячеек и отдельного оборудования, задействованного в технологическом процессе;
- оптимизация времени циклов автоматизированных линий;
- расчет производительности элементов технологической системы.

Таким образом, *разработка моделей уровня технологического процесса позволяет не только получить управляющие программы для устройств и отработать в виртуальной среде алгоритмы их взаимодействия*, но и получить *данные, необходимые для экономического анализа того или иного организационного решения, а в отдельных случаях даже данные*

для отделов планирования производства, внутрипроизводственной логистики и планирования продаж.

В качестве примера рассмотрим имитационную модель автоматизированного роботизированного участка литья полимеров под давлением, показанную на **рис. 4**.



Рис. 4. Модель производственной ячейки и технологического процесса, представленная с помощью диаграммы Ганта (как показано в DELMIA 3DEXPERIENCE) [12, 13]

Для построения *имитационной модели участка была использована система DELMIA 3DEXPERIENCE*. Подробное описание состава модели приводилось в [13].

На первом этапе имитационного моделирования были определены виртуальные контроллеры для каждого исполнительного устройства, представленного на 3D-модели. Затем была организована связь между виртуальными контроллерами на уровне входных и выходных сигналов, посылаемых между устройствами.

Далее были смоделированы основные и вспомогательные операции (задачи) для отдельных устройств, такие как литье полимера, извлечение из формы и перемещение роботами полученной отливки, обработка на станке

лазерной резки (для удаления литниковой системы), перемещение по конвейеру и т. д.

Для обеспечения синхронной работы и своевременного выполнения задач несколькими устройствами в программу каждой отдельной задачи были введены переменные, инициирующие или останавливающие движение исполнительных устройств.

На втором этапе была построена *общая модель технологического процесса для расчета производительности роботизированного участка с применением инструментов имитационного моделирования технологических процессов системы DELMIA 3DEXPERIENCE*. Временные параметры технологических операций и циклов были получены с помощью моделирования процесса литья в САЕ-системе на операционном уровне. В результате моделирования были получены следующие данные:

- *четырёхмерная (3D + время) модель автоматизированного участка литья полимеров;*
- *управляющие программы для промышленных роботов;*
- *алгоритм взаимодействия оборудования;*
- *модели технологической оснастки;*
- *определение и оптимизация времени производственного цикла;*
- *расчет производительности автоматизированного литьевого участка.*

Полученные данные по отдельно взятым участкам и автоматизированным производственным ячейкам и линиям служат основой для моделирования производственных процессов на междеховом уровне.

D. Моделирование на уровне производственного процесса

Модели следующего уровня — производственного процесса — учитывают *междеховое взаимодействие и логистику, глобальные и локальные системы хранения и объединяют множество реализуемых технологи-*

ских процессов на производственном предприятии в единую цифровую модель производственного процесса.

Подобные модели представляют собой *уровень виртуального завода наиболее востребованы для задач проектирования производственных систем с нуля или комплексной модернизации существующих цехов и участков (расстановка оборудования и создание планировок, геометрические расчеты по планированию операций перемещения крупногабаритного оборудования).*

Подобные цифровые модели могут достигать масштабов завода и при этом содержать в своей структуре модели предыдущего уровня — отдельных участков и/или автоматизированных линий — с целью расчетов их производительности уже в рамках общего производственного процесса, оптимизации загрузки с учетом расчета производительности и загрузки соседних (параллельных) участков.

Для промышленного предприятия, схема процессов которого показана на **рис. 1**, а изображение модели на **рис. 5**, это *актуально при оптимизации загрузки механического производства, обеспечивающего сборочное производство с учетом производительности параллельных технологических и потенциальных сборочных процессов.*

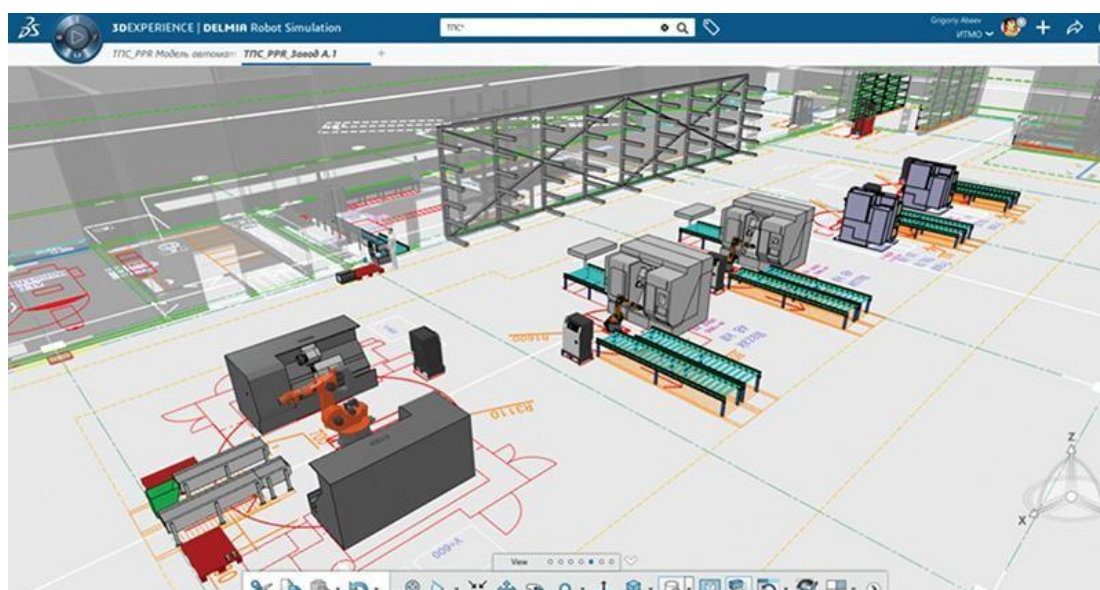


Рис. 5. Модель производственного процесса на приборостроительном предприятии (модель цеха — как показано в DELMIA 3DEXPERIENCE) [12, 13]

Подобная синхронизация процессов приводит к *минимизации складских запасов полуфабрикатов, сокращению количества или размеров промежуточных складских систем* и, возможно, к *пониманию необходимости увеличения количества производственных ресурсов для определенных процессов с целью увеличения общей производительности и устранения узких мест*.

Стоит отметить, что *на основе подобных моделей могут создаваться модели Building Information Modeling (BIM)*. Это модели, описывающие конструктивные особенности здания завода, этапность строительства и необходимое строительное оборудование и содержащие в себе информацию о различных инженерных и информационных коммуникациях: электрических сетях и энергетических системах, гидравлических системах подачи технических жидкостей и промышленных газов к производственному оборудованию, информационных моделях, описывающих обмен данными между компьютерными системами, оборудованием, людьми и многое другое.

При этом *на одной модели реализуются одновременно несколько слоев информации:*

- 2D-планировка;
- 3D-планировка и оборудование;
- инженерные системы;
- функциональные и логические диаграммы информационных потоков;
- технологические процессы и материальные потоки и др.

В качестве примера рассматривается *модель приборостроительного завода (рис. 5)*, предназначенная для решения ряда задач:

- визуализация комплексных проектных решений;
- поиск узких мест в технологических маршрутах с учетом имеющегося и планируемого к закупке оборудования;

- оптимизация локальных систем хранения, расположенных в зонах между производственными участками и непосредственно у автоматизированных ячеек типа «робот — станок».

Исходными данными для моделирования служили:

- технологическая планировка цехов и участков;
- маршрутный технологический процесс в виде таблицы Excel;
- BOM (Bill of Materials) — спецификация изделия, которое должен выпускать завод.

Результаты моделирования:

- построена масштабируемая 3D-модель завода;
- выявлено и устранено за счет добавления дополнительного оборудования узкое место в технологическом процессе; рассчитана производительность обозначенного технологического процесса с учетом планового объема выпуска и продолжительности рабочих смен;
- сокращено количество промежуточных складов;
- ***принято принципиальное решение об изменении и перепроектировании всего механического производства в сторону комплексной автоматизации и роботизации производства.***

ПЕРЕХОД К СОЗДАНИЮ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Технология, связывающая цифровую модель объекта и реальный объект, получила название Digital Twin и с 1 января 2022 года узаконена в России в качестве **ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения** [8].

Реализация подобной модели производится с применением технологий IoT и Big Data в части построения коммуникаций, сбора и аналитики данных, поступающих с датчиков и промышленных контроллеров [18].

Также стоит отметить перспективы в области решения коммуникационных задач между цифровым двойником и реальным объектом, связанные

с интеграцией в решения класса PLM таких пакетов, как ***Modelica/Dymola*** [19, 20], ***Matlab/Simulink***.

Это позволяет не просто создать связь между реальным и цифровым объектом, но и, путем использования специальных библиотек (например, библиотеки TrueTime и Modelica_EmbeddedSystems), описывать коммуникационные проблемы, что в перспективе должно обеспечить максимально точное совпадение между моделью и реальным процессом.

Организация цифрового двойника преследует три цели:

- удаленный мониторинг состояния реального объекта путем отображения на цифровой модели параметров его функционирования и индикации узлов и деталей оборудования, рабочие значения параметров которых отклоняются от нормальных; организация системы предиктивного обслуживания через анализ больших объемов статистических данных по работе оборудования за период времени;
- удаленное управление объектом через цифровую модель (передача управляющих сигналов от цифровой модели на реальный объект);
- ***нативное программирование промышленных роботов: человек управляет роботом, естественным образом (руками) перемещая реальный объект по необходимой для выполнения промышленной операции траектории, а цифровая модель в это время производит запись этих действий, тем самым генерируя программу для робота.***

Последний пункт очень важен, поскольку напрямую подводит нас к вопросам обучения автоматизированных производственных систем. В контексте современных программ модернизации промышленности (Industry 4.0, Advanced Manufacturing, «Национальная технологическая инициатива» и др.) актуален вопрос самообучения промышленных киберфизических систем [19, 20], поэтому авторы статьи [12] предлагают дополнить представленное в ГОСТ Р 57700.37-2021 определение цифрового двойника следующим абзацем: «Подобная цифровая модель генерирует большие объе-

мы данных, которые могут быть переданы в систему машинного обучения вместе со статистическими данными о качестве выпускаемой продукции. После сбора и анализа информации система начинает самостоятельно обучаться и становится способной к прогнозированию и предотвращению издержек производства, связанных с браком или поломкой производственного оборудования, в том числе путем проведения высокоточного, высокопроизводительного моделирования и статистического анализа его результатов».

В контексте парадигмы цифрового производства модели технологических операций служат для проведения множества виртуальных экспериментов, результаты которых в совокупности с данными о браке и результатами реальных экспериментов могут стать статистической базой для обучения ICPS в плане качества, что уже сейчас приводит к сокращению натурных экспериментов.

Модели уровня производственных процессов (отдельное оборудование, участки и линии) служат для отображения на них данных и состояний производственного оборудования, приема сигналов с датчиков и отправки сигналов на PLC. Следовательно, именно они являются необходимой и достаточной основой для организации за счет создания коммуникаций цифровых двойников.

На данном этапе развития и внедрения описанных технологий подробные глобальные модели заводов кажутся избыточными, а организация цифрового двойника целого завода нецелесообразной из-за больших требований к вычислительным мощностям и трудоемкости их детальной разработки при условии отсутствия четкого понимания сферы их дальнейшего применения непосредственно в самом производстве, за исключением задач мониторинга.

Однако при развитии области CPS, и в частности ICPS, подобные модели могут служить интерактивной картой, отражающей состояние всех объектов и хранящей в себе точную информацию о геометрическом расположении объектов. Такие карты могут быть использованы для организации системы взаимодействия автономных мобильных роботов, служить сферой расшире-

ния области IoT на цифровой мир трехмерных моделей. Они могут быть источниками данных для устройств дополненной реальности, а также выполнять другие функции по связи мира цифрового с реальным для решения производственных задач.

Заключение

Приведенные в представленных Методических указаниях **«Проектирование систем автоматизации и управления: цифровые двойники объектов, процессов и систем»** материалы обзора публикаций из открытых источников на заданную тему не дает пока окончательного ответа на вопрос «Как построить цифровой двойник?».

Однако эти материалы демонстрируют возможности компьютерного моделирования на этапе перехода к цифровому производству, показывает перспективу и направления применения трехмерных моделей в совокупности с другими передовыми информационными технологиями и моделями.

Среди недостатков современных средств моделирования нужно отметить достаточно высокую трудоемкость разработки точных моделей стандартных производственных систем, таких как промышленные станки, роботизированные обрабатывающие системы типа «робот — станок» и ряд других.

Это вызвано отсутствием стандартных библиотек 3D-моделей промышленного оборудования или коммерческой торговой платформы для 3D-моделей, на которой можно было бы приобрести облегченную в части коммерческой информации 3D-модель оборудования напрямую у его производителя, соблюдая юридическую чистоту использования подобных моделей.

В настоящее многие авторы, упомянутые в Библиографическом списке к данным МУ, занимаются методологическими вопросами построения цифровых двойников: определением набора контролируемых параметров (сигналов), их классификацией, в том числе на функциональные (влияют на качество, производительность и т. д., т. е. относятся к оценочным характе-

ристикам функционирования реальной системы) и вспомогательные (необходимые для передачи на цифровую модель для организации цифрового двойника), а также выявлением взаимосвязей между ними.

Дальнейшие исследования будут направлены на организацию коммуникации между реальным промышленным объектом и его цифровой моделью, то есть обмена сигналами между реальным и виртуальным контроллерами. Подобную связь предполагается реализовать через инструментарий Modelica/Dymola в рамках цифровой платформы 3DEXPERIENCE. При этом виртуальный контроллер на первом этапе управляет цифровой моделью, а реальный PLC — реальным объектом или объектами. После отладки коммуникаций станет возможной отладка программ реального контроллера на цифровой модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорожная карта Технет НТИ.
URL: <http://www.nti2035.ru/docs/ДК%20Технет%20-%20приложение%20к%20протоколу%20заседания%20президиума%20Совета.pdf>
2. Национальная технологическая инициатива. –
URL: <http://www.nti2035.ru/nti/>
3. Национальная технологическая инициатива. «Технет». –
URL: <http://www.nti2035.ru/technology/technet>
4. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. –
URL: [http://sntr-rf.ru/media/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%8F%20%D0%9D%D0%A2%D0%A0%20%D0%A0%D0%A4%20%D0%B1%D1%83%D0%BA%D0%BB%D0%B5%D1%82\(%D1%80%D1%83%D1%81\).pdf](http://sntr-rf.ru/media/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%8F%20%D0%9D%D0%A2%D0%A0%20%D0%A0%D0%A4%20%D0%B1%D1%83%D0%BA%D0%BB%D0%B5%D1%82(%D1%80%D1%83%D1%81).pdf)
5. Цифровая экономика Российской Федерации. –
URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>
6. Белослудцев Е.В. Компьютерный инжиниринг, возможности цифрового проектирования. Презентация директора МНОЦП «Altair – CML – Политехник» СПбПУ.
7. А. Боровков, проректор по перспективным проектам СПбПУ, руководитель Центра НТИ СПбПУ ©«Новый оборонный заказ. Стратегии» № 4 (63), 2020 г., Санкт-Петербург. URL: <https://dfnc.ru/arhiv-zhurnalov/2020-4-63/novaya-paradigma-tsifrovye-dvojniki-strategiya-innovatsionnogo-proryva-v-opk/>
8. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. URL: <https://ncmu.spbstu.ru/article/gost-cifrovye-dvojniki-izdelij>
9. Третий международный форум «Передовые цифровые и производственные технологии»: итоги **1-2 декабря 2021 года, С.-Петербург**. Научный центр мирового уровня «Передовые цифровые технологии» СПбПУ (НЦМУ СПбПУ) и Центр компетенций Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» СПбПУ (Центр НТИ СПбПУ). Тематика форума: цифровая трансформация экономики на основе применения передовых цифровых и производственных технологий. (в онлайн-формате). URL: <https://npt-forum.ru/>
10. Global Horizons. United States Air Force Global Science and Technology Vision URL: http://www.airforcemag.com/DocumentFile/Documents/2013/GlobalHorizons_062313.pdf
11. Department of Defense. Digital Engineering Strategy. – Washington, D.C. – June 2018 URL: <https://fas.org/man/eprint/digeng-2018.pdf>

12. Н. А. Демкович, Г. Е. Абаев, и Е. И. Яблочников/ Многоуровневое моделирование цифровых производств. URL: <https://ritm-magazine.ru/ru/public/mnogourovnevoe-modelirovanie-cifrovyyh-proizvodstv>
13. Г. Е. Абаев, Н. А. Демкович и Е. И. Яблочников/ Роль и задачи имитационного моделирования на этапе перехода от цифрового производства к умным фабрикам, ИММОД–2017 (труды конференции). Санкт-Петербург. 2017. С. 219–227.
14. Ф. А. Глущенко, В. Борzych, Дж. Верманн, А.В. Коломбо. Разработка модели обучающей платформы для исследования процесса производства в концепции Индустрия 4.0., Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, том 18, № 3, с. 554-560, 2018. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-554-560.
15. K. Chang, Product Manufacturing and Cost Estimating Using CAD/CAE. EU: Elsevier Inc., 2014.
16. Н. А. Демкович, И. А. Волков и Е. И. Яблочников, «Применение систем численного моделирования при внедрении новых производственных технологий», Известия Самарского научного центра РАН, том 18, № 3–4, с. 459–463, 2016.
17. E. Yablochnikov, A. Pirogov, S. Vasilkov, Y. Andreev and N. Demkovich, «Developing and modeling production processes for manufacturing polymeric optical items in a distributed integrated medium», Journal of Optical Technology, vol. 84, no. 1, p. 62, 2017. DOI: 10.1364/JOT.84.000062.
18. J. Tolujew, «Simulation tasks during the implementation of the Industry 4.0 concept in the field of production and logistics», Proceedings from IMMOD-2017, St. Petersburg, 2017, pp. 57–65.
19. D. Henriksson and H. Elmqvist, «Cyber-Physical systems modeling and simulation with Modelica», Proceedings from the 8th International Modelica Conference, Technical University, Dresden, Germany, 2011.
20. J. Lee, B. Bagheri and H. Kao, «A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems», Manufacturing Letters, vol. 3, pp. 18–23, 2015.

Приложения

ГОСТ Р 57700.37—2021

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Компьютерные модели и моделирование

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ

Общие положения

Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions

Дата введения — 2022—01—01

• 1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общее понятие цифрового двойника изделия, а также общие положения и требования по разработке и применению цифровых двойников изделий.

Стандарт распространяется на изделия машиностроения. На основе настоящего стандарта допускается, при необходимости, разрабатывать стандарты, устанавливающие требования к цифровым двойникам изделий различных отраслей промышленности с учетом их специфики.

• 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 2.001 Единая система конструкторской документации. Общие положения.

ГОСТ 2.053 Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Общие положения.

ГОСТ 2.503 Единая система конструкторской документации. Правила внесения изменений.

ГОСТ 3.1001 Единая система технологической документации. Общие положения.

ГОСТ 3.1102 Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов. Общие положения.

ГОСТ 19.101 Единая система программной документации. Виды программ и программных документов.

ГОСТ 19.102 Единая система программной документации. Стадии разработки.

ГОСТ 34.601 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания.

ГОСТ 16504—81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

ГОСТ Р 56135 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения.

ГОСТ Р 56136 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения.

ГОСТ Р 57188 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения.

ГОСТ Р 57412 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения.

ГОСТ Р 58301 Управление данными об изделии. Электронный макет изделия. Общие требования.

ГОСТ Р 57700.1 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования.

ГОСТ Р 57700.2 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения.

Издание официальное

ГОСТ Р 57700.10 Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно деформированного состояния, верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области.

ГОСТ Р 57700.22 Компьютерные модели и моделирование. Классификация.

ГОСТ Р 57700.25 Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации.

Примечание.

При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год.

Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

• 3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

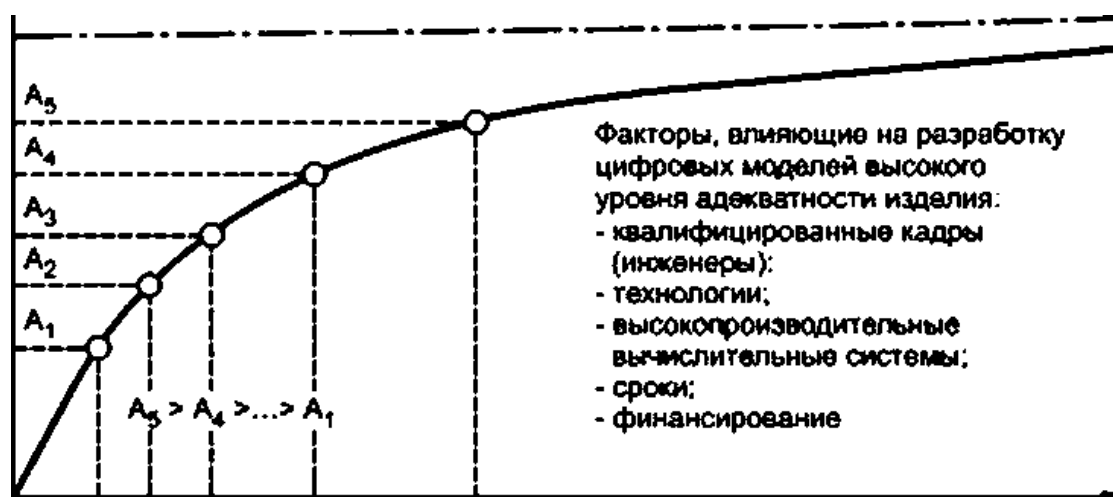
- **3.1 Адекватность модели:** Соответствие модели моделируемому изделию (процессу, явлению) по обоснованному перечню характеристик.

Примечания:

- 1 Факторы, влияющие на разработку цифровых моделей высокого уровня адекватности изделию:
 - квалифицированные кадры (инженеры);
 - технологии;
 - высокопроизводительные вычислительные системы;
 - сроки;
 - финансирование.
- 2 График качественной зависимости адекватности цифровых моделей изделия от различных факторов приведен на рисунке 1.

Адекватность A

Изделие (составная часть)



Время t , O - цифровые модели изделия ($A_1, \dots, A_3, \dots, A_5$): — адекватность

Рисунок 1

- **3.2 Валидация модели изделия:** Подтверждение адекватности модели моделируемому изделию.

Примечания

- 1 **Валидация модели изделия** выполняется для выбранного множества характеристик и заданной степени точности.
- 2 Определение распространяется на математические, компьютерные, цифровые модели.
- **3.3 Валидация программного обеспечения** компьютерного моделирования: Подтверждение того, что программное обеспечение компью-

терного моделирования в заявленной области применения адекватно с заданной степенью точности выполняет подготовку исходных данных, расчеты и обработку результатов таких расчетов.

- 1 При наличии в составе программного обеспечения компьютерного моделирования методического обеспечения необходимо выполнить его валидацию совместно с программами компьютерного моделирования.
- 2 Валидацию методического и программного обеспечения необходимо проводить на основе анализа результатов испытаний изделия.
- **3.4 Верификация программного обеспечения компьютерного моделирования:** Подтверждение того, что программное обеспечение компьютерного моделирования выполняет подготовку исходных данных, расчеты и обработку результатов таких расчетов в соответствии с указанной математической моделью.

Примечание — ***Верификация программного обеспечения компьютерного моделирования является необходимым условием для последующей его валидации.***

- 3.5 данные: Информация, обработанная и представленная в формализованном виде для дальнейшей обработки.

[ГОСТ 7.0—99. статья 3.2.1.2]

- 3.6 жизненный цикл изделия, жизненный цикл (life cycle): Совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации.

[ГОСТ Р 56136—2014. статья 3.16]

- 3.7 изделие: Предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению в организации (на предприятии) по конструкторской документации.

Примечания

- 1 Изделиями могут быть: устройства, средства, машины, агрегаты, аппараты, приспособления, оборудование, установки, инструменты, механизмы, системы и др.
- 2 Число изделий может измеряться в штуках (экземплярах).
- 3 К изделиям допускается относить завершенные и незавершенные предметы производства, в том числе заготовки.

[ГОСТ 2.101—2016. пункт 3.1]

- **3.8 Инструментальное программное средство:** Программное обеспечение для разработки, проверки, анализа или эксплуатации программы или документации к ней. Примеры: генератор перекрестных ссылок, декомпилятор, драйвер, редактор, программа составления блок-схем, монитор, генератор контрольных примеров, анализатор временных диаграмм.

[ГОСТ 33707—2016, пункт 4.434]

- **3.9 Испытания:** Экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий.

Примечание — Определение включает оценивание и (или) контроль.
(ГОСТ 16504—81. статья 1]

- **3.10 Испытательный полигон:** Территория и испытательные сооружения на ней, оснащенные средствами испытаний и обеспечивающие испытания объекта в условиях, близких к условиям эксплуатации объекта.

(ГОСТ 16504—81. статья 25}

- **3.11 Компьютерная модель (электронная модель):** Модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными.

Примечание — В основе компьютерной модели лежит математическая модель, реализованная в виде программного кода, и данные, определяющие конкретный объект моделирования. Для применения компьютерной модели в процессе моделирования необходимо использовать программное обеспечение компьютерного моделирования и вычислительной техники.

(ГОСТ Р 57700.22—2020. пункт 3.1.3)

- **3.12 Компьютерная модель изделия:** Компьютерная модель, в которой объектом моделирования является изделие(ия).

Примечание — Компьютерную модель разрабатывают при помощи соответствующих программных средств.

(ГОСТ Р 57412—2017, пункт 3.1.10)

3.13 Компьютерное моделирование изделия: Моделирование, выполненное с использованием компьютерной модели изделия.

Примечание — Компьютерное моделирование изделия выполняют с целью получения данных, необходимых для принятия решений в процессах разработки, проектирования, производства, сопровождения эксплуатации и других задач в ходе жизненного цикла изделия.

(ГОСТ Р 57412—2017, пункт 3.1.11)

3.14 Математическая модель: Модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений.

(ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.1.2)

3.15 Математическое моделирование: Исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения, применения и изучения их математических моделей.

Примечание — Процесс математического моделирования можно разделить на пять этапов:

первый — формулирование законов, связывающих основные объекты модели;

второй — исследование математических задач, к которым приводит математическая модель;

третий — верификация модели;

четвертый — валидация модели;

пятый — последующий анализ модели в связи с накоплением данных об изучаемых явлениях и модернизация модели.

(ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.2.3]

- **3.16 многоуровневая система требований:** Иерархическая система взаимосвязанных структур данных, содержащих формализованные требования к изделию и его составным частям.

Примечания

- 1 В процессе создания цифрового двойника требования верхних уровней декомпозируются, в том числе на целевые показатели и ресурсные ограничения для нижних уровней. Достижение целевых показателей и (или) удовлетворение ресурсным ограничениям всех нижних уровней должно обеспечивать удовлетворение требований более высокого уровня.
- 2 Частным случаем многоуровневой системы требований является многоуровневая матрица требований (см. 3.22, включая целевые показатели и ресурсные ограничения).
- 3 Данные, поступающие от эксплуатируемого изделия, используются для уточнения многоуровневой системы требований, доработки цифровых моделей с целью прогнозирования поведения изделия в различных условиях эксплуатации, оптимизации затрат на техническое обслуживание, ремонт, а также для модернизации изделия.
- **3.17 Модель:** Сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира. (ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.1.1]

- **3.18 Программное обеспечение компьютерного моделирования:** ПО КМ: Программы, выполняющие математические расчеты, и программы, предназначенные для подготовки исходных данных, обработки результатов расчета, а также другие вспомогательные программы. Программное обеспечение компьютерного моделирования не является программным обеспечением средств измерений согласно ГОСТ Р 8.654.

(ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.1]

Примечание — ПО КМ позволяет моделировать различные объекты моделирования в соответствии с классификацией (ГОСТ Р 57412 и ГОСТ Р 57700.22), а также содержит в своем составе программные средства для реализации различных сервисных (по отношению к компьютерной модели) функций. Примеры: препроцессор и постпроцессор (по ГОСТ Р 57700.10), программные модули импорта и экспорта моделей, визуализации геометрических моделей, результатов моделирования, цифровых (виртуальных) испытаний, программы составления схем и сценариев.

- **3.19 Сертификация программного обеспечения компьютерного моделирования:** Форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия программного обеспечения компьютерного моделирования заявленной области применения.

Примечание — При наличии в составе программного обеспечения компьютерного моделирования методического обеспечения необходимо выполнить подтверждение его соответствия заявленной области применения совместно с программами компьютерного моделирования.

- **3.20 Составная часть изделия; СЧ:** Изделие, выполняющее определенные функции в составе другого изделия.

Примечание — Понятие «Составная часть изделия» следует применять в отношении конкретного изделия, в состав которого оно входит. СЧ может быть любым видом изделия по конструкторско-функциональным характеристикам (деталь, сборочная единица, комплекс и комплект).

(ГОСТ 2.101—2016, пункт 3.2]

- **3.21 Стадия жизненного цикла (life cycle stage):** Часть ЖЦ, выделяемая по признакам характерных для нее явлений, процессов (работ) и конечных результатов.

(ГОСТ Р 56136—2014, статья 3.17]

- **3.22 Требование:** Требуемая (ожидаемая) количественная или качественная характеристика или свойство объекта, а также связанные ограничения и условия.

(ГОСТ Р 59194—2020, пункт 3.1.21]

Примечание — К требованиям также относятся целевые показатели — величины контролируемых параметров, необходимые для удовлетворения требований к изделию с заданной точностью.

- **3.23 Цифровая модель изделия:** Система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям.

Примечания

- 1 Цифровая модель создается с использованием ПО КМ и (или) инструментальных программных и иных средств.
- 2 Цифровая модель должна описывать структуру, функциональность и поведение разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на тех стадиях жизненного цикла, которые установлены в соответствующих технических заданиях.
- 3 Наполнение и функциональность цифровой модели зависит от стадии жизненного цикла изделия.
- 4 Оценка соответствия цифровой модели изделия в общем случае включает в себя процедуры верификации и валидации математических моделей по ГОСТ Р 57188, компьютерных моделей и ПО КМ по ГОСТ Р 57700.1, ГОСТ Р 57700.2, ГОСТ Р 57700.24, ГОСТ Р 57700.25.
- 5 Под электронными документами понимаются электронные документы по ГОСТ 2.001, ГОСТ 3.1001, ГОСТ 3.1102, ГОСТ 19.101, ГОСТ 34.601, ГОСТ Р 58301.
- **3.24 Цифровой двойник изделия; ЦД:** Система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями.

Примечания

- 1 Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия.
- 2 При создании и применении цифрового двойника изделия участникам процессов жизненного цикла (по ГОСТ Р 56135) рекомендуется применять **программно-технологическую платформу цифровых двойников** (см. 6.3).

- **3.25 Цифровой (виртуальный) испытательный полигон:** Система, в общем случае состоящая из технических средств, программного, методического и организационного обеспечения и квалифицированного персонала, предназначенная для проведения полигонных испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) объекта испытаний.

Примечание — Цифровая модель для проведения полигонных испытаний должна обеспечивать испытания объекта в условиях, близких к условиям эксплуатации объекта.

- **3.26 Цифровой (виртуальный) испытательный стенд:** Система, в общем случае состоящая из технических средств, программного, методического и организационного обеспечения и квалифицированного персонала, предназначенная для проведения стендовых испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) объекта испытаний.
- **3.27 Цифровые (виртуальные) испытания:** Определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) этого объекта.

Примечания

- 1 В настоящем стандарте под объектом испытания подразумевается изделие.
- 2 В зависимости от вида цифровых (виртуальных) испытаний (см. ГОСТ 16504—81. приложение 2) может быть использован как сам объект испытаний, так и его составные части.
- 3 Для проведения цифровых (виртуальных) испытаний рекомендуется использовать программно-технологические платформы видов испытаний, определенных ГОСТ 16504.

• 4 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ЖЦ — жизненный цикл;

ПО КМ — программное обеспечение компьютерного моделирования;

ЦД — цифровой двойник;

ЦД-Р — цифровой двойник, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии разработки изделия;

ЦД-П — цифровой двойник, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии производства изделия;

ЦД-Э — цифровой двойник, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии эксплуатации изделия.

5 Общие положения

5.1 Целью создания ЦД является выполнение технических и тактико-технических требований к изделию, снижение себестоимости и сроков разработки опытных образцов изделия, повышение технологичности изделия, а также повышение надежности и эффективности эксплуатации изделия.

5.2 Задачи ЦД:

- оценка научной обоснованности, тактико-технической целесообразности и технологической реализуемости разрабатываемого или готового изделия в различных условиях эксплуатации;
- возможность на различных стадиях ЖЦ изделия проследить принятые технические решения и их обоснованность.
- обеспечение выполнения участниками процессов ЖЦ функций управления требованиями, конфигурацией и эксплуатационно-техническими характеристиками изделия (ГОСТ Р 56135);
- снижение себестоимости и сроков разработки опытных образцов и испытаний изделия и (или) его составных частей за счет проведения цифровых (виртуальных) испытаний в объеме, достаточном для подтверждения соответствия требованиям технического задания.

5.3 Наполнение и функциональность ЦД зависит от стадии ЖЦ изделия.

5.4 Решение о разработке, составе и функциональности ЦД-Р, ЦД-П и ЦД-Э изделия, в том числе двусторонних информационных связей в составе цифровых двойников, определяет заказчик по согласованию с разработчиком.

Примечание — В зависимости от области применения, типа изделия и стадии его ЖЦ могут быть выделены следующие **варианты реализации цифрового двойника: цифровой прототип изделия, цифровой двойник экземпляра изделия, цифровая тень изделия** и др. Требования к вариантам реализации цифрового двойника, включая требования к его валидации, могут устанавливаться в рамках серии национальных стандартов и стандартов организаций по цифровым двойникам, разработанных в развитие данного стандарта.

6 Общие требования к разработке цифровых двойников

- 6.1 Разработка ЦД на каждой стадии ЖЦ изделия осуществляется в соответствии со стандартами, разработанными в развитие данного стандарта.

Допускается по решению заказчика порядок разработки и приемки ЦД осуществлять по ГОСТ 34.601 или ГОСТ 19.102.

Требования к разработке ЦД на каждой стадии ЖЦ изделия могут устанавливаться стандартами организаций.

Требования к разработке ЦД по государственному оборонному заказу, в том числе требования к режиму секретности и обеспечению защиты государственной тайны, устанавливаются в соответствующих документах по стандартизации оборонной продукции.

- 6.2 Требования к ЦД и состав отчетных документов устанавливаются заказчиком в техническом задании.

- 6.3 Для создания цифровых моделей и (или) ЦД, проведения цифровых (виртуальных) испытаний, применения результатов математического и компьютерного моделирования и организации совместной работы по созданию цифрового двойника изделия **рекомендуется применять программно-технологическую платформу цифровых двойников**, включающую, как правило:
 - средства управления программным обеспечением компьютерного моделирования;
 - средства управления проектами;
 - средства сбора, обработки, анализа, визуализации, каталогизации, хранения, передачи компьютерных моделей и результатов компьютерного моделирования;
 - средства отслеживания всех изменений конструкторских, технологических решений и модификации компьютерных моделей и вариантов инженерных расчетов;
 - средства оформления результатов;
 - средства защиты данных и организации совместной работы участников проекта в соответствии с правами доступа;
 - средства компьютерного моделирования для планирования применения изделия по назначению, поддержки его технического обслуживания и ремонта.
- 6.4 Верификация и валидация методического и программного обеспечения компьютерного моделирования, используемого при создании ЦД, а также при необходимости сертификация программного обеспечения компьютерного моделирования выполняются в соответствии с нормативно-техническими документами, указанными в техническом задании.
- 6.5 Для разработки ЦД изделия создается многоуровневая система требований, которая позволяет проверять соответствие значений показателей, необходимых для удовлетворения требований к изделию, установленным диапазонам значений, а также анализировать их взаимное влияние. Достижение целевых показателей и (или) удовлетворение ресурсным ограничениям многоуровневой системы требований обеспечивается за счет проведения цифровых (виртуальных) испытаний изделия, его составных частей и материалов.
- 6.6 Цифровые (виртуальные) испытания проводят на цифровых (виртуальных) испытательных стендах и полигонах. В случае невозможности проведения физических (то есть нецифровых) испытаний изделия или его составных частей, цифровые (виртуальные) испытания следует проводить в обязательном порядке. Требования к составу цифровых (виртуальных) испытательных стендов и полигонов определяются стандартами, разработанными в развитие настоящего стандарта.

- 6.7 Для разработки ЦД необходимо провести оценку соответствия цифровых (виртуальных) испытательных стендов и полигонов нормативно-техническим документам.

Допускается по решению заказчика проводить оценку соответствия требованиям ГОСТ Р 57700.1, ГОСТ Р 57700.2.

- 6.6 При разработке ЦД используется электронная структура изделия по ГОСТ 2.053.
- 6.9 Обновление ЦД осуществляют за счет двусторонних информационных связей изделия с ЦД, формируемых на разных стадиях ЖЦ изделия. Обновление ЦД рекомендуется осуществлять с применением программно-технологической платформы цифровых двойников. Полученные данные могут быть преобразованы в новые требования к изделию, которые вносятся в многоуровневую систему требований.

Обновление ЦД рекомендуется осуществлять в соответствии с порядком, определенным в ГОСТ 2.503.

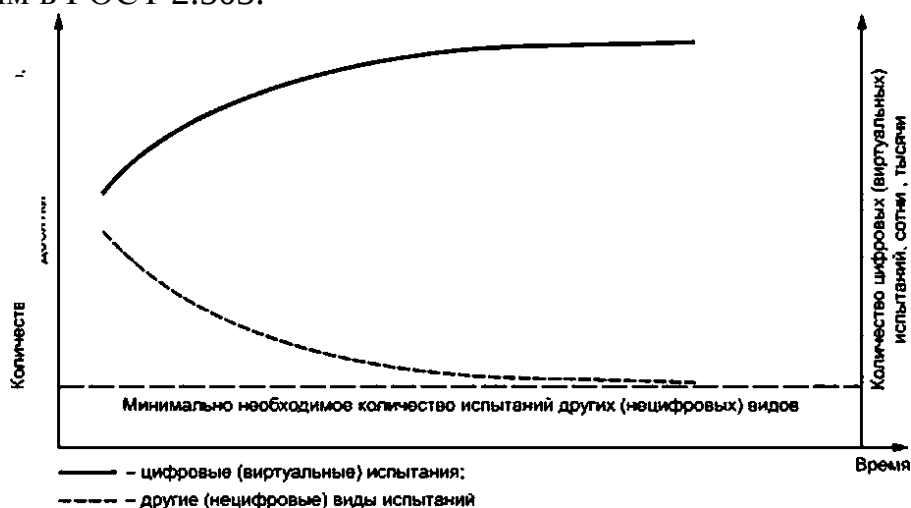


Рисунок А.1

УДК 006.354:004.942:006.354, ОКС 01.140.01

Снижение объемов испытаний за счет проведения достаточного количества цифровых (виртуальных) испытаний и испытаний других видов.

Учебное издание

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ:
цифровые двойники объектов, процессов и систем**

Учебно-методическое пособие

Составитель : Карлов Антон Георгиевич

В авторской редакции

Изд. № 19/2022. Объем 4.5 п.л. Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 4,41.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»