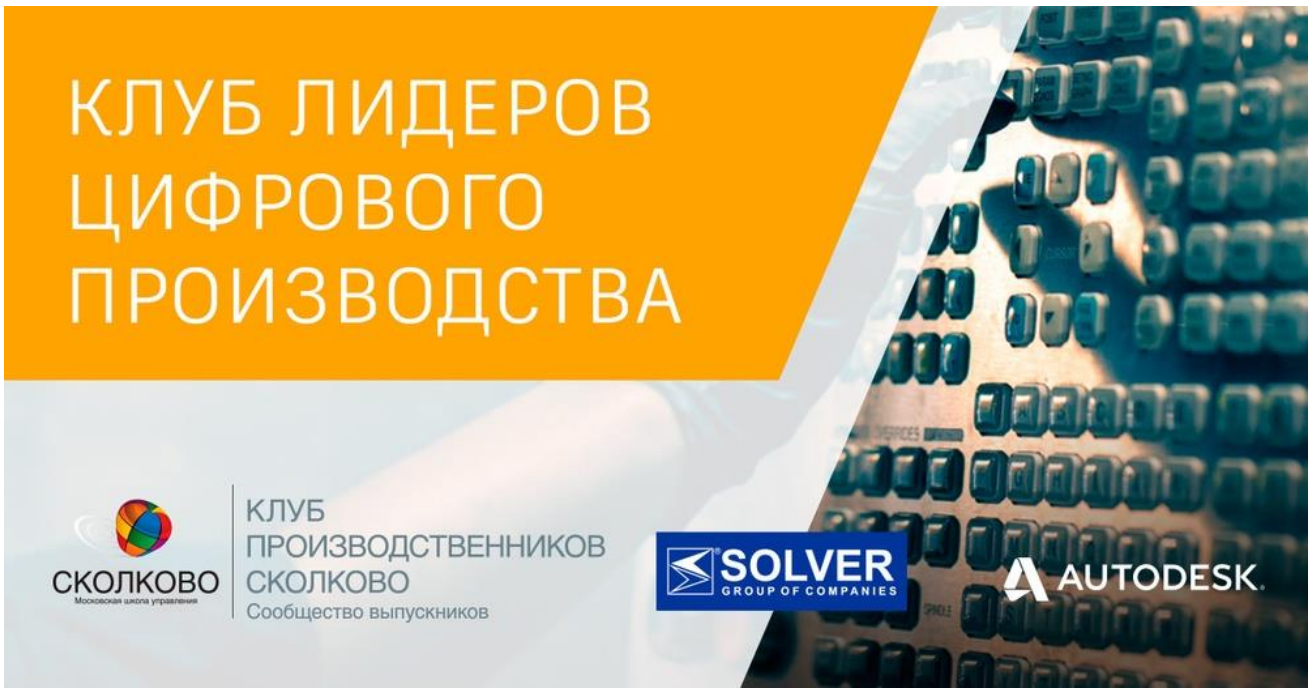


Руководство
по цифровой трансформации производственных предприятий

МОСКВА
2019

СВЕДЕНИЯ О РУКОВОДСТВЕ

Документ разработан под руководством ООО «Конкуратор».

АВТОРЫ РУКОВОДСТВА

Алексей Боровков, проректор по перспективным проектам СПбПУ

Радислав Бирбраер, генеральный конструктор ИКФ «СОЛВЕР»

Павел Биленко, руководитель образовательных программ Индустрии 4.0 Департамента корпоративного обучения Московской школы управления «Сколково»

Сергей Бенклян, ООО «Конкуратор»

Александр Маневич, НТЦ «Конструктор»

Андрей Шуляк, НТЦ «Конструктор»

Михаил Зобнин, НТЦ «Конструктор»

Сергей Прядильщиков, ООО «ДЕЛКАМ-М»

Алексей Никулин, Компания «ПОИНТ»

Дмитрий Шестаков, Компания «ПОИНТ»

РЕЦЕНЗЕНТЫ

Олег Шиловицкий, Сооснователь и генеральный директор OpenBOM, консультант Beyond PLM

Игорь Бобков, эксперт по цифровому производству

Артур Одров, технический директор, CAD Systems

ПЛОЩАДКА ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ

Если вы хотите задать вопрос по данному руководству или прислать комментарий/предложение, а также если вы заинтересованы в услугах по адаптации данного руководства под бизнес-задачи вашей компании или ищете подрядчиков на выполнение этих работ, напишите нам на адрес innovations@autodesk.com.

ПРАВИЛА РЕДАКТИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Материалы из настоящего произведения, полностью или в части, могут быть использованы путем копирования или цитирования, а также путем переработки, для целей создания внутренних руководств и регламентов третьих лиц. При этом ссылка на настоящее произведение как источник обязательна.

Autodesk, Inc. © 2019. Все права защищены.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ **5**

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ **7**

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ **8**

1. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ **10**

1.1. Цифровизация экономики 10
1.2. Концепция Индустрии 4.0. Умное производство 11
1.2.1. Технологии умного производства Индустрии 4.0 11
1.2.2. Этапы перехода к умному производству 13
1.3. Цифровая трансформация бизнес-процессов 15
1.3.1. Информационная архитектура современного предприятия 17
1.4. Стратегии цифровой трансформации 18
1.4.1. Сценарии применения технологий Индустрии 4.0 18
1.4.2. Сервисная бизнес-модель 18
1.4.3. Как сформировать стратегию? 20
1.4.4. Оценка цифровой зрелости предприятия 21
1.4.5. Оценка эффективности внедрения технологий Индустрии 4.0 24
1.4.6. Ключевые показатели для оценки эффективности производственной деятельности 28
1.5. Цифровое проектирование 29
1.5.1. Цифровые двойники и цифровые тени 32
1.6. Ключевые выводы и рекомендации от лидеров цифрового производства 33

2. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ И ПОСТАНОВКИ ПРОДУКЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВО **35**

2.1. Существующие подходы к организации процессов 35
2.1.1. Основные задачи и процессы на стадиях жизненного цикла продукции в разрезе конструкторско-технологической подготовки производства 37
2.1.1.1. Задачи КТПП 37
2.1.1.2. Работы в составе процессов цифрового проектирования 38
2.1.1.3. Основные участники КТПП 42
2.2. Передовые подходы к организации процессов 42
2.2.1. Стратегия PLM для поддержки процессов КТПП 42
2.2.1.1. Основные функции PLM-системы 42
2.2.1.2. Состав PLM-системы 43
2.2.1.3. Интеграция прикладных автоматизированных систем в PLM-системе 45
2.2.1.4. Общая информационная шина предприятия и интегрированная информационная среда для реализации стратегии PLM 45
2.2.2. Новые роли участников КТПП в разрезе реализации процессов цифрового проектирования 51
2.2.3. Новые процессы разработки изделий и гибкое производство 54
2.2.3.1. Роль PDM-системы в организации процессов 75
2.2.3.2. Электронный макет изделия в процессе разработки КД и ТД 75
2.2.3.3. Электронный макет изделия и цифровой двойник изделия 77
2.2.3.4. Модельно-ориентированное проектирование 78
2.2.3.5. Разработка электронного макета изделия 79
2.2.3.6. Подготовка производства 86
2.3. Ключевые выводы и рекомендации по организации процессов цифрового проектирования 97

3. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕШЕНИЙ КОМПАНИИ AUTODESK 99

3.1. Обзор портфеля решений Autodesk 99
3.1.1. Обзор ключевых продуктов машиностроительного портфеля 107
3.1.1.1. Autodesk Inventor 107
3.1.1.2. Autodesk Fusion 360 108
3.1.1.3. Autodesk CFD 111
3.1.1.4. Autodesk Alias 112
3.1.1.5. Autodesk VRED 117
3.2. Генеративный дизайн в Fusion 360 121
3.3. PDM-система Vault как связующее звено блоков цифрового инжиниринга и средство организации среды коллективной разработки 127
3.4. Использование линеек продукции Autodesk на различных этапах КТПП 131
3.5. Обеспечение интероперабельности 135
3.5.1. Особенности обмена данными Autodesk Inventor с наиболее распространенными САПР 136
3.6. Облачные сервисы Autodesk 137
3.7. Реализация процессов цифрового производства в технологических центрах Autodesk 144

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 147

ПРИЛОЖЕНИЕ А. МОДЕЛИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ САПР 148

А.1 Использование плоских эскизов для построения твердых тел и поверхностей 148
А.2 Восходящее и нисходящее проектирование при построении 3D-модели 150
А.3 Использование каркасных (скелетных) моделей 151
А.4 Использование прототипов и производных компонентов 153
А.5 Использование оцифрованных данных: облака точек, сканированные подложки 154
А.6 Твердотельное, поверхностное и гибридное моделирование 154

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ГЛОССАРИЙ 159

БИБЛИОГРАФИЯ 170

ВВЕДЕНИЕ

Лидеры не могут позволить себе мыслить
обособленно, не осуществляя обмена с другими лидерами.

Клаус Шваб, «Четвертая промышленная революция»

Компания Autodesk, мировой лидер в области разработки технологий для цифрового производства, стала одним из основателей движения цифрового лидерства в России. Так, 13 февраля 2019 года в головном офисе Autodesk в Москве состоялось первое заседание открытого Клуба лидеров цифрового производства. Организаторами Клуба выступили Московская школа управления СКОЛКОВО, Клуб производственников СКОЛКОВО, компании «СОЛВЕР» и Autodesk.

Одной из задач Клуба на 2019 год стало создание руководства по цифровой трансформации производственных предприятий. Настоящее руководство является итогом этой работы.

Руководство разработано на основе лучших практик и опыта, накопленного отечественными и зарубежными лидерами цифрового производства, и предназначено для производственных предприятий, которые переходят на современные цифровые технологии, – в том числе для руководителей и рабочих групп, ответственных за цифровую трансформацию предприятия. В руководстве представлены различные подходы, которые могут в деталях отличаться друг от друга. Читателям предоставляется возможность выбрать путь, наиболее применимый именно в их организации.

Цели руководства:

- повышение конкурентоспособности российских компаний через использование новых производственных технологий;
- формирование основы для разработки стратегии развития и повышения эффективности компаний;
- согласование с глобальными трендами Индустрии 4.0, действующими российскими стандартами и особенностями бизнеса;
- изменение культуры внедрения и работы с инновациями.

Основное внимание уделено этапу конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП), поскольку именно на этой стадии формируются цифровые модели, используемые затем на всех стадиях жизненного цикла изделия. В большей степени документ ориентирован на малые и средние производственные предприятия, которые находятся на начальных стадиях цифровой трансформации своих бизнес-процессов.

Одними из главных принципов руководства являются его открытость и практикоориентированность. Авторы приветствуют любое использование и распространение данного документа, а также открыты к диалогу по его улучшению. Предложения можно присылать на адрес: innovations@autodesk.com.

«Мы должны помочь нашим клиентам продвинуться вперед в цифровое будущее. И для Autodesk чрезвычайно важно следующее: в этом цифровом мире очень многое будет меняться, и главные изменения будут в области технологий и бизнес-моделей. То есть клиенты будут инвестировать в самые лучшие современные технологии. И поэтому наша частичная ответственность – помочь им смягчить риски в процессе перехода на "цифру". Мы предлагаем им присоединиться к этой поездке в будущее. Но это не пляжный туризм, здесь придется потрудиться».

Карл Ости, директор Autodesk по машиностроению в регионе EMEA

«В современном высокотехнологичном производстве центр тяжести смещается на этап проектирования, а он делается на основе математического моделирования полностью "в цифре", включая серии виртуальных испытаний. Это позволяет быстрее и дешевле устранять возможные ошибки, успевать сделать востребованную рынком продукцию, то есть войти в окно возможностей быстрее конкурентов и с меньшими затратами. То есть работать в 10 раз лучше, быстрее и дешевле».

Алексей Боровков, проректор по перспективным проектам СПбПУ, руководитель Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии», руководитель Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ, научный руководитель Института передовых производственных технологий (ИППТ) СПбПУ, лидер-соруководитель рабочей группы «Технет» (передовые производственные технологии) НТИ, лидер мегапроекта «Фабрики Будущего»

«Цифровизация – это наше понимание, что должны видеть себя в цифровом зеркале, которое правильно отражает наши процессы в реальной жизни, и научиться с помощью цифровых сервисов делать свой бизнес в реальном времени, принимать оптимальные решения в бизнесе и не только».

Радислав Бирбраер, генеральный конструктор ИКФ «СОЛВЕР»

«Если компания вместо прототипирования продуктов и моделирования бизнес-процессов вкладывает силы в создание концепций, стратегий и отчетов, то она зря теряет время. Мир меняется так быстро, что, пока она будет писать стратегию, западные компании уже перейдут на следующий уровень развития».

Павел Биленко, руководитель образовательных программ Индустрии 4.0 Департамента корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО, основатель и генеральный директор Инженерного центра ТЕКНЕР

«Как бы мы ни называли этот процесс – Индустрия 4.0 или интернет вещей, – важно помнить, что технологии существуют не ради технологий. Они нужны, чтобы бизнес развивался и зарабатывал».

Кристиан Хокен, генеральный директор проектного центра Industrie 4.0 Maturity Centre, Технический университет RWTH, Ахен, Германия

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Понимание современной терминологии в области цифровизации чрезвычайно важно. Поэтому, несмотря на то что в настоящее время терминология в данной предметной области в большинстве своем является неустоявшейся, авторы настоящего руководства считают чрезвычайно полезной работой сбор и анализ применяемых терминов – как уже используемых в ГОСТ, ИСО, так и неформализованных, идущих в ногу с постоянно развивающимися цифровыми технологиями.

Глоссарий является попыткой увязать в единое целое нормативную базу ГОСТ, ИСО и терминологию лидеров цифрового производства. Он не претендует на истину в последней инстанции, но его преимущество заключается в том, что множество терминов собраны в одном месте. Авторы будут благодарны за предложения по унификации. Глоссарий приведен в Приложении Б.

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

1. ГОСТ Р ИСО 22400-2-2016. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Ключевые технико-экономические показатели (KPIs) для управления производственными операциями. Часть 2. Определения и описания.
2. ГОСТ Р ИСО 10303-21-2002. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 21. Методы реализации. Кодирование открытым текстом структуры обмена.
3. ГОСТ 2.052-2015. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации.
4. ГОСТ 2.053-2013. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Общие положения.
5. ГОСТ 2.101-2016. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Виды изделий.
6. ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки.
7. ГОСТ 2.711-82. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Схема деления изделия на составные части.
8. ГОСТ 3.1102-2011. Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов.
9. ГОСТ 14.004-83. Межгосударственный стандарт. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий.
10. ГОСТ 15.016-2016. Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению.
11. ГОСТ Р 15.000-2016. Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Основные положения.
12. ГОСТ Р 15.301-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство.
13. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.
14. ГОСТ 20886-85. Организация данных в системах обработки данных. Термины и определения.
15. ГОСТ 23501.101-87. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения.
16. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология (ИТ). Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения.
17. ГОСТ Р 53394-2017. Интегрированная логистическая поддержка. Термины и определения.
18. ГОСТ Р 55.0.01-2014/ИСО 55000:2014. Управление активами. Национальная система стандартов. Общее представление, принципы и терминология.
19. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения.
20. ГОСТ 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения.
21. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения.

22. ГОСТ Р 57590-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 3. Общие требования.
23. ГОСТ 58299-2018. Управление данными об изделии. Порядок представления результатов проектно-конструкторских работ в электронной форме. Общие требования.
24. ГОСТ 58300-2018. Управление данными об изделии. Термины и определения.
25. ГОСТ 58301-2018. Управление данными об изделии. Электронный макет изделия. Общие требования.
26. DIN EN ISO 16739-2017. Формат данных с открытой спецификацией (IFC), для совместного использования данных в строительстве и управлении зданиями и сооружениями.

1. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

1.1. Цифровизация экономики

Цифровизация экономики и, в частности, переход к умному производству или Индустрии 4.0, является актуальным мировым трендом. Цифровизация экономики признана приоритетным направлением и в Российской Федерации.

Среди приоритетных направлений авторы стратегии научно-технологического развития России до 2035 г. выделили цифровые производственные технологии, развитие систем, способных обрабатывать большие объемы данных, искусственный интеллект и машинное обучение.

Распоряжением Правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р утверждена Программа **«Цифровая экономика Российской Федерации»**. В ней определены цели, задачи, направления и сроки реализации основных мер государственной политики по созданию необходимых условий для развития в России цифровой экономики, в которой данные в цифровом виде являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности.

В 2017 г. президиум Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию утвердил дорожную карту рабочей группы **«Технет»**. Документ представляет собой план мероприятий программы «Национальная технологическая инициатива» и включает в себя развитие цифрового проектирования, робототехники, Big Data и других технологий для управления и автоматизации промышленности.

Фонд развития промышленности РФ разработал Программу **«Цифровизация промышленности»**, в рамках которой планируется предоставлять заемное софинансирование на проекты, направленные на внедрение цифровых и технологических решений, призванных оптимизировать производственные процессы на предприятии. Согласно заявлению министра промышленности и торговли РФ Дениса Мантурова, на проекты разработки технологий интернета вещей будут предоставляться льготные займы под 1% годовых.

В соответствии с программой разработки национальных стандартов на 2019 год на официальном сайте **технического комитета 194 «Кибер-физические системы»** размещаются первые редакции трех предварительных национальных стандартов в области умного производства в части математического моделирования и виртуализации испытаний изделий[1]. Целью стандартов серии «Умное производство» является применение моделирования изделий на ранних этапах проектирования, снижение затрат на разработку, производство и обслуживание за счет повышения качества разработок.

Таким образом, в развитии цифровой экономики значительную роль призвано играть государство, которое имеет возможность направить свои усилия на внедрение цифровых технологий на промышленных предприятиях страны, а также на создание соответствующей экосистемы.

Учитывая актуальность и важность темы цифровизации производственных предприятий, в первой главе настоящего руководства освещаются такие вопросы, как:

- концепция и технологии умного производства;

[1] http://tc194.ru/smart_manufacturing_public.

- подходы к цифровой трансформации бизнес-процессов;
- стратегии цифровизации и их поэтапная реализация;
- новые бизнес-модели,

а также ряд других тем.

1.2. Концепция Индустрии 4.0. Умное производство

Постиндустриальная модель развития подошла к исчерпанию своих производительных возможностей в начале нового тысячелетия, о чем просигнализировали финансовый кризис 2008 г. и последующая рецессия. Средством выхода из данного кризиса стал полномасштабный переход к неоиндустриальной модели развития – Четвертая промышленная революция.

Трансформация производственной отрасли называется революцией именно потому, что изменения происходят не поверхностные, а радикальные: индустрия перестраивается сверху донизу. Меняются бизнес-модели, рождаются новые компании, известные бренды с долгой историей исчезают, если они не успели встать на путь цифровых преобразований. Путь этих преобразований привел к следующему технологическому рубежу, к формированию концепции **Индустрии 4.0**, которую также называют концепцией **«Умного производства»** (Smart Manufacturing).

«Умное производство», наряду с промышленным интернетом вещей (IIoT), лежит в основе Индустрии 4.0 (Industrie 4.0). Такое название в 2011 году получила программа немецкого правительства по развитию высоких технологий. Характерная черта Индустрии 4.0 – полностью автоматизированные производства, на которых управление всеми процессами осуществляется в реальном масштабе времени и с учетом меняющихся внешних условий.

Стоит отметить, что понятия «Индустрия 4.0» и «Четвертая промышленная революция» не всегда являются синонимами. Первое относится только к изменениям, которые происходят в промышленности, а второе используется в более широком смысле для описания фундаментальных изменений в обществе.

Суть Индустрии 4.0 состоит в ускоренной интеграции киберфизических систем в производственные процессы, в результате чего значительная часть производства будет осуществляться без участия человека.

Концепция Индустрии 4.0 предполагает объединение современных информационно-коммуникационных технологий с производственным оборудованием и средствами автоматизации, направленное на организацию и контроль всей цепи создания стоимости на протяжении всего производственного цикла продуктов и услуг.

Основная цель концепции – значительное увеличение гибкости и оптимизация ценообразования, а также индивидуализация продукции и услуг за счет интенсивного взаимодействия потребителя и производителя.

1.2.1. Технологии умного производства Индустрии 4.0

В целом цифровая трансформация – это трансформация бизнеса путем пересмотра бизнес-стратегии, принятие новых моделей развития бизнеса, операций, продуктов, маркетингового подхода, целей и т.д. путем принятия передовых производственных технологий. Она призвана ускорить продажи и рост бизнеса.

Новая модель развития, по мнению Алексея Боровкова, проректора по перспективным проектам Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ) Петра Великого, руководителя Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии»,

«предполагает не только тотальную цифровизацию экономики и промышленности, но и учет триады требований современного глобального рынка:

- сокращение времени принятия решений (Time-to-Decision);
- сокращение времени исполнения решений (Time-to-Execution);
- сокращение времени вывода продукции на рынок (Time-to-Market).

Всё это, разумеется, требует своих моделей и технологий управления в том числе. Это серьезные проблемы-вызовы и для промышленности, и для науки, и для системы образования, и для бизнеса. Комплексность этих вызовов и определяет масштаб нынешних изменений как промышленную революцию. И те игроки, которые этого не понимают, лишают себя будущего на завтрашних (и даже уже сегодняшних) глобальных конкурентных рынках» [22].

Новая модель развития основывается на использовании **передовых производственных технологий** (Advanced Manufacturing Technologies), представляющих собой сложный комплекс мультидисциплинарных знаний, наукоемких технологий и систем, интеллектуальных ноу-хау, полученных с помощью длительных и дорогостоящих научных исследований, эффективного применения концепции открытых инноваций и трансфера передовых наукоемких технологий.

Передовые производственные технологии умного производства в первую очередь включают в себя:

- цифровое проектирование, включая компьютерное моделирование (Computer-Aided Design, CAD), компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг (Computer-Aided Engineering, CAE, и High-Performance Computing, HPC), технологии оптимизации (Computer-Aided Optimization, CAO), бионический (генеративный) дизайн (Bionic / Generative (Simulation&Optimization)-Driven Bionic / Generative Design), цифровые двойники (Digital Twin);
- большие данные (Big Data), генерацию «умных» больших данных (Smart Big Data) на основе цифровых двойников;
- промышленные датчики и индустриальный интернет (IIoT);
- новые материалы (в первую очередь композиционные материалы, метаматериалы, металлопорошки для аддитивного производства);
- аддитивные и гибридные технологии;
- гибкие производственные ячейки, робототехнические комплексы;
- информационные системы управления производством и предприятием;
- технологии виртуальной и дополненной реальности;
- экспертные системы и искусственный интеллект.

В рамках работ по проекту «Разработка прогноза реализации приоритета научно-технологического развития, определенного пунктом 20а Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, к новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта)» СПбПУ разработан прогноз развития передовых цифровых производственных технологий на период 2019–2030 гг. 17 (рис. 1.1).

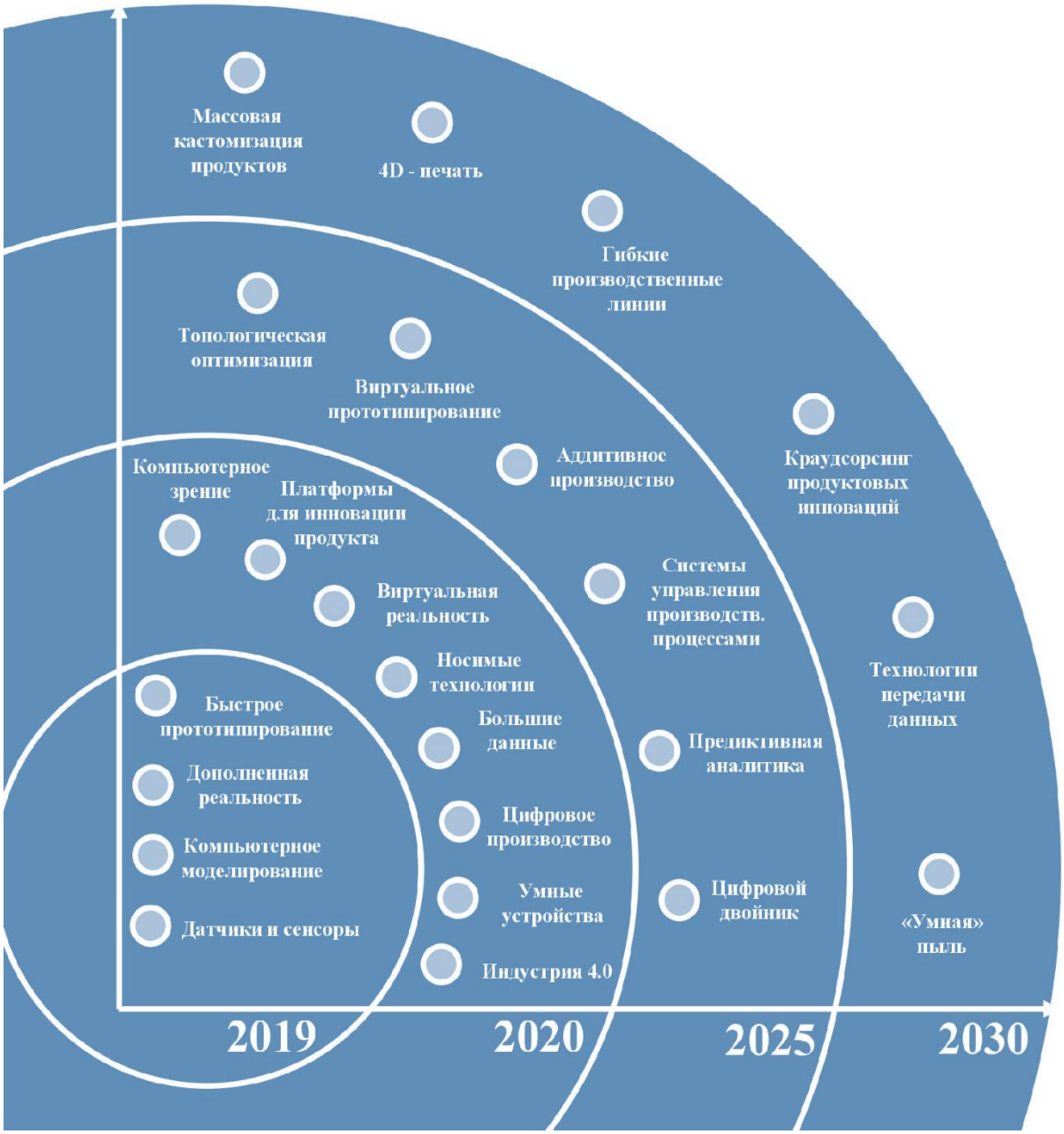


Рис. 1.1. Пример прогноза по передовым цифровым, производственным технологиям на 2019–2030 гг. (Источник: СПбПУ)

Анализ данной схемы показывает, в том числе, что в «ядре», в основе передовых цифровых технологий находятся компьютерное моделирование и прототипирование, позволяющие на стадии проектирования создавать цифровые модели, которые затем могут использоваться на всех последующих стадиях жизненного цикла изделия.

1.2.2. Этапы перехода к умному производству

Умное производство подразумевает применение широкого спектра технологий и поэтому переход к нему совершается в несколько этапов. Каждому этапу соответствует один из видов так называемых **фабрик будущего (Factories of the Future)**.

Эрастос Филос, координатор ИКТ-проектов в Factories of the Future Седьмой рамочной программы Европейского Союза по научно-технологическому сотрудничеству, выделяет

три вида фабрик будущего: цифровые фабрики (Digital Factory), умные фабрики (Smart Factory) и виртуальные фабрики (Virtual Factory).

Эти три вида производств отличаются по целям создания и применяемым технологиям.

Цифровые фабрики ставят целью «увидеть» продукт до того, как он будет реально произведен. Основные технологии: CAD/CAM/CAE, PDM/PLM, станки с ЧПУ, аддитивные технологии и др.

Умные фабрики в дополнение к целям цифровых фабрик предполагают более широкое использование средств автоматизации, улучшенный контроль и оптимизацию процессов. Умные фабрики нацелены на серийный выпуск изделий, но при сохранении максимальной гибкости производства. Обеспечивается это благодаря высокому уровню автоматизации и роботизации предприятия. Широко применяются автоматизированные системы управления технологическими и производственными процессами. Технологии промышленного интернета вещей (IIoT) обеспечивают межмашинное взаимодействие оборудования. Производственные активы предприятия, снабженного датчиками и средствами связи, работающими по протоколу IPv6, способны выпускать продукцию почти (или вовсе) без участия человека. Справиться с резко возросшими потоками информации, поступающими от датчиков и автоматизированных систем управления, позволяют технологии обработки больших данных (Big Data). Основные технологии: MDS (АСУТП), MES, IIoT, Big Data и др.

Виртуальные фабрики суммируют цели и технологии цифровых и умных фабрик, а также создаются с целью управления цепочками поставок и для того чтобы создавать ценность посредством объединения продуктов и услуг. Иной вариант интерпретации виртуальных фабрик – это объединение виртуальных активов и виртуальных способов управления. Для управления глобальными цепочками поставок и распределенными производственными активами на такой фабрике используется ряд автоматизированных систем управления предприятием. При должной степени интеграции они позволяют разрабатывать и использовать виртуальную модель всех организационных, технологических, логистических и прочих процессов, проходящих не только на предприятии, но и на уровне распределенных производственных активов и глобальных цепочек поставок, вплоть до послепродажного обслуживания. Основные технологии: ERP, CRM, SCM (Supply Chain Management, управление цепочками поставок) и др.

В российской дорожной карте **«Технет»** формированию фабрик будущего отводится ключевое значение. Речь идет о применении цифрового проектирования и производства, проведении виртуальных испытаний. В проекте задействуют цифровое проектирование и сертификацию, новые материалы, аддитивные технологии, промышленных роботов и информационные системы управления логистикой. Дорожная карта «Технет» предполагает создать три испытательных полигона, а к 2025 г. открыть до десяти таких фабрик.

Одним из примеров реализации фабрик будущего является открытый компанией Autodesk центр продвинутых технологий производства AMF (Advanced Manufacturing Facility) в Бирмингеме, Великобритания 30. Ультрасовременный технологический центр представляет собой производство, оснащенное новейшим оборудованием, а также собственными технологиями Autodesk. AMF в Бирмингеме стал первым центром такого рода в Европе и одним из шести технологических центров Autodesk во всем мире (см. раздел 3.7). В центре можно получить доступ **к технологиям производства будущего**: генеративному дизайну, аддитивному и гибридному производству, взаимодействию людей и роботов, дополненной и виртуальной реальности и другим технологиям. Более подробно технологии Autodesk представлены в главе 3 настоящего руководства.

1.3. Цифровая трансформация бизнес-процессов

Для предприятия цифровая трансформация – это последовательная системная работа, организованная в соответствии с комплексным подходом, который формируется на этапе разработки концепции. Концепция цифрового развития предприятия становится основной частью бизнес-стратегии компании. При этом следует помнить, что значительное улучшение результатов бизнеса достигается только тогда, когда выполняется хотя бы одно из следующих условий:

- *увеличение прибыли* от увеличения объема продаж или от увеличения доходности без существенного падения объемов продаж из-за увеличения цены;
- *сокращение затрат* без ущерба для качества исполнения заказов и качества продукции с точки зрения клиента.

Эти два условия должны быть главными целями любых новых действий менеджмента, включая внедрение новых технологий Индустрии 4.0.

Сегодня можно выделить восемь основных рычагов создания стоимости как следствие внедрения технологий Индустрии 4.0 на производстве:

- оптимизация режимов работы оборудования;
- оптимизация загрузки оборудования;
- повышение производительности и безопасности труда;
- логистическая оптимизация;
- повышение качества продукции;
- улучшение прогнозирования спроса;
- сокращение сроков вывода продукции на рынок;
- улучшение послепродажного обслуживания.

Цифровое предприятие предусматривает цифровизацию и интеграцию процессов по вертикали в рамках всего предприятия, начиная от разработки продуктов и закупок и заканчивая производством, логистикой и обслуживанием в процессе эксплуатации. В свою очередь, горизонтальная интеграция цифрового предприятия выходит за рамки внутренних операций и охватывает поставщиков, потребителей и всех ключевых партнеров по всей цепочке создания стоимости. Здесь используются различные технологии: от устройств слежения и контроля до комплексного планирования, интегрированного с исполнением в режиме реального времени. Все это делается на базе соответствующей **цифровой платформы** и все вместе составляет так называемую **цифровую экосистему цифрового предприятия**.

Под **цифровой платформой понимается** совокупность цифровых данных, моделей (логики, алгоритмов) и инструментов (методов, средств), информационно и технологически интегрированных в единую автоматизированную функциональную систему, предназначенную для квалифицированного управления целевой предметной областью с организацией взаимодействия заинтересованных субъектов. Таким образом, цифровая платформа – это суть любого цифрового предприятия, в которой как минимум присутствует цифровой двойник выпускаемого продукта и цифровой двойник (цифровой актив) непосредственно самого предприятия. Вокруг каждой цифровой платформы зарождается соответствующая экосистема цифрового предприятия, включающая в себя поставщиков ресурсов и комплектующих, потребителей, а также сервисные и эксплуатационные службы. Важно также, что при этом все данные об операционных процессах, эффективности процессов, управлении качеством и операционном планировании доступны в режиме реального времени в интегральной сети цифрового предприятия.

Следует делать различия между цифровизацией и автоматизацией. Автоматизация имела цель освободить человека от рутинных операций, оставляя ему больше времени на анализ и принятие решений. Цифровизация предполагает следующий шаг – анализ и принятие решений машинами, сужение до предела участия человека в производстве и минимизацию человеческого фактора. Автоматизация – одна из целей цифровизации или начальная стадия цифровизации, составляющая нижнего уровня.

Цифровую трансформацию предприятия можно рассматривать с двух перспектив. Первая – это цифровизация бизнес-модели: трансформация модели взаимодействия с клиентом, переход от традиционных продаж к модели «умного» продукта, дополненного цифровым сервисом для клиента. Вторая – операционная цифровизация: внедрение цифровых инструментов для повышения эффективности предприятия в рамках существующей бизнес-модели.

Согласно исследованию KPMG 23, наиболее эффективный подход к реализации цифровой трансформации – это использование методики «от бизнес-задач», которая предполагает, что сначала определяют результат, который необходимо достичь, и источники создания ценности, и лишь затем занимаются выбором конкретной технологии для внедрения. Это в корне отличается от традиционного подхода большинства компаний, когда сначала реализуют пилотный проект по той или иной технологии и только потом оценивают эффект от нее и необходимость этой технологии для организации. В соответствии с результатами данного исследования основные препятствия на пути к цифровизации, с которыми сталкиваются российские компании, – это недостаточная зрелость текущих бизнес-процессов и отсутствие необходимых навыков и компетенций.

Важность роли менеджмента в процессе цифровой трансформации бизнеса подтверждается совместным исследованием показателей финансовой эффективности, проведенным в 2015 году компаниями Capgemini Consulting и MIT Sloan School of Management 35.

Как показали результаты этого исследования, цифровую трансформацию нельзя просто проигнорировать, поскольку снижение прибыли в этом случае по сравнению с конкурентами составит 24% в год. Результаты тех компаний, которые проводили цифровые преобразования, зависели от сопровождения цифровой трансформации бизнеса параллельным совершенствованием менеджмента, то есть были напрямую связаны с проактивным управлением фирмой, ее топ-менеджментом. Так, прибыль фирм растет в среднем на 26%, если использовать технологии и новые методы управления совместно. Если же только совершенствовать менеджмент, не прибегая к цифровым технологиям, то прибыль фирм растет на 9%. Если же инвестировать только в технологии, забывая о необходимых изменениях в управлении, прибыль вообще не растет, а падает на 11%.

Таким образом, инвестиции в технологии при неэффективном менеджменте не только не окажут положительного влияния на бизнес, а, напротив, приведут к отрицательным результатам. Движущей силой цифровой трансформации являются не только новые цифровые технологии, но и руководство, ориентированное на внедрение новшеств и использующее современные методы управления. В этой связи одним из правил цифровой трансформации является ее проведение «сверху вниз».

Какие элементы прежде всего характеризуют новые бизнес-модели? В докладе «Что такое цифровая экономика? Тренды, компетенции, измерение» 24, подготовленном коллективом Института статистических исследований и экономики знаний (ИСИЭЗ) НИУ ВШЭ, отмечается, что цифровая экономика задает направления трансформации традиционных секторов экономики, возникновения новых рынков и ниш. Новые бизнес-

модели являются клиентоориентированными (customer centric), что полностью определяет их структуру: от ценностного предложения, направленного на решение предсказанной потребности клиента, своевременной доставки (just-in-time) и до потоков доходов, основанных на времени использования продукта клиентом. Ключевым источником создания стоимости становится высокоскоростная обработка больших данных, а основным параметром конкурентоспособности новых бизнес-моделей – скорость вывода нового продукта на рынок (time-to-market).

К основным элементам новой бизнес-модели можно отнести, в том числе:

- цифровые сервисы (включая сервисы реального времени);
- индивидуализацию конкретного экземпляра продукта;
- вовлечение конечного потребителя в процесс;
- сопровождение клиента в течение всего жизненного цикла продукта;
- управление потоком из единичных заказов;
- многоуровневую кооперацию с большой степенью интегрированности участников;
- переход от цепочек поставок к сети поставок и др.

Новые цифровые бизнес-модели, в основе которых лежит использование цифровых данных на всех этапах жизненного цикла продуктов, реализуются в рамках процессов цифрового производства.

1.3.1. Информационная архитектура современного предприятия

Переход на цифровое производство подразумевает также объединение в единую информационную сеть всех рабочих мест на предприятии. Цель – своевременный обмен объективными данными между всеми автоматизированными системами управления, а также оборудованием, что должно привести к повышению эффективности работы всех участников экосистемы предприятия. Такой переход подразумевает создание единого информационного пространства, представляющего собой пятиуровневую пирамиду (рис. 1.2).

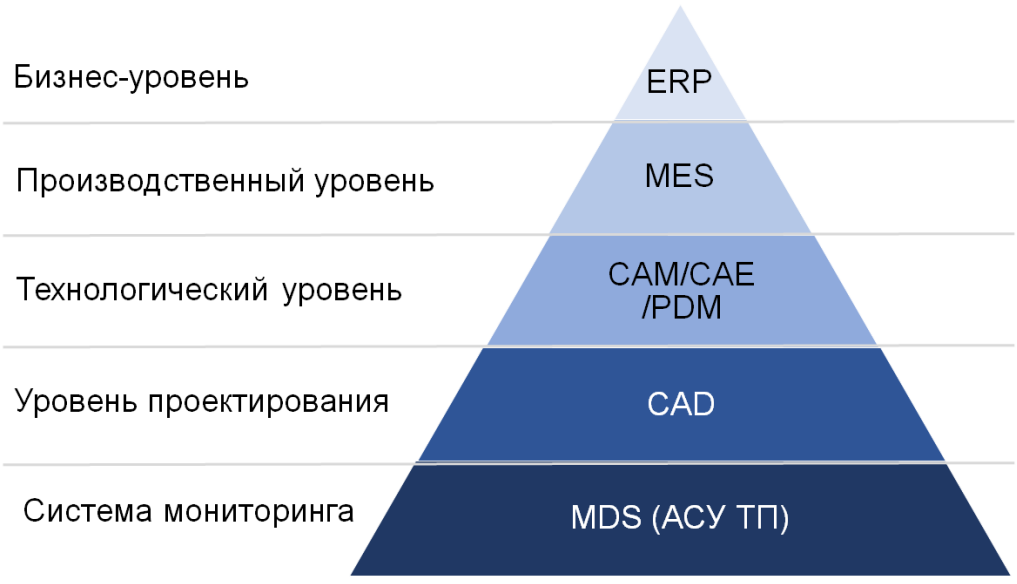


Рис. 1.2. Информационная архитектура современного предприятия (Источник: Национальный институт стандартов и технологий США, NIST)

Верхний бизнес-уровень – это ERP-система, на ее основе рассчитывается потребность в материалах, производственных мощностях, формируются заказы на закупку и производство. Далее следует производственный уровень, на котором с помощью MES-

системы составляется график загрузки оборудования, выполняется планирование изготовления деталей. Третий уровень – технологическая проработка в PDM-системе. Модель изделия разрабатывается на уровне проектирования в CAD/CAE-системе. И последний, базисный уровень пирамиды, на котором строится все остальное, – мониторинг работы оборудования и персонала. Этот уровень нужно автоматизировать в первую очередь, так как журнально-бумажные методы сбора и хранения информации не могут обеспечить объективность и скорость передачи информации. На цифровом производстве за мониторинг отвечают системы класса MDC (Machine Data Collection). Они позволяют собирать данные о работе всех производственных объектов на основе встроенных интеллектуальных датчиков, контролировать производство и эффективно управлять им.

1.4. Стратегии цифровой трансформации

1.4.1. Сценарии применения технологий Индустрии 4.0

В настоящее время из множества тенденций можно выделить следующие специфичные тренды новой модели развития:

- сокращение стоимости запуска технологического стартапа;
- изменение стоимости часа работы оператора и робота;
- падение стоимости производственных технологий;
- смещение конкуренции в сторону НИОКР и проектирования;
- применение гибких управленческих подходов (например, Agile, SCRUM).

Эти тренды опосредованно ускоряют применение современных прорывных технологий на промышленном предприятии, в том числе по следующим возможным сценариям:

- цифровое проектирование и моделирование, многокритериальная мультидисциплинарная оптимизация (бионический/генеративный дизайн), аддитивное производство;
- новые сервисные бизнес-модели;
- предсказательная аналитика на основе цифровых двойников. Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) по фактическому состоянию;
- дистанционное обслуживание и мониторинг на основе IIoT;
- оптимизация потребления ресурсов (электроэнергия, вода);
- «подключенные работники» (connected workers) – контроль трудовой деятельности, безопасности и состояния здоровья;
- управление складскими запасами, планирование логистики на основе цифровых двойников;
- оптимизация процессов производства (машинное обучение для прогнозирования и предотвращения нарушений процесса производства);
- кибербезопасность;
- экономия затрат (cost saving): энергосбережение, материалоемкость, оптимизация производства и расходов и пр.;
- другие сценарии.

1.4.2. Сервисная бизнес-модель

Сервисная бизнес-модель основана на сервисных контрактах. Сервисный контракт (подписка) – это комплексное предложение изделия и связанных с ним услуг, создающее дополнительную ценность как в момент продажи, так и на протяжении всего срока службы изделия. Объектом продажи и потребления в сервисной модели становится не только и не столько сам продукт, сколько услуги, оказываемые пользователю в связи

с этим продуктом, – в первую очередь, конечно, обслуживание и ремонт, но не только они.

Так, компания Rolls-Royce теперь не продает клиентам авиационные двигатели. Она предлагает им услугу TotalCare, в рамках которой оплачиваются только часы эксплуатации каждого двигателя. Основные сервисы TotalCare включают мониторинг технического состояния двигателя, работы по повышению его надежности, капитальный ремонт. В пакет дополнительных сервисов входят управление техническими данными, транспортировка двигателя, техническое обслуживание запасных двигателей и линия поддержки.

Важно понимать, что реализовать несомненные преимущества сервисной бизнес-модели можно только при условии использования современных информационных технологий. Чтобы отслеживать техническое состояние производственных активов и предупреждать сбои, все больше компаний из различных отраслей внедряют в свою продукцию датчики контроля эксплуатационных показателей, используют мобильные технологии и анализируют большие данные. Постоянный мониторинг, сбор и анализ всех данных позволяют буквально держать руку на пульсе промышленного оборудования и своевременно планировать его обслуживание, потому что благодаря анализу данных об оборудовании известно буквально все: как оно работает, как ведет себя в той или иной ситуации, когда дает сбои, какие его узлы стоит диагностировать заранее, не дожидаясь планового осмотра, и куда запланировать доставку запчастей, не дожидаясь нештатной ситуации.

Сервисные контракты открывают ряд возможностей и для производителей, и для потребителей. Применение сервисной модели меняет мотивацию производителя: оно побуждает его еще на стадии проектирования подбирать технические решения, исходя из минимизации общей стоимости владения на протяжении всего жизненного цикла изделия, а не только из цены его продажи. Модель сервисного контракта способствует расширению бизнеса производителя и умножению его доходов. Выгоду, которую может получить производитель, демонстрирует структура доходов Rolls-Royce от продажи оборудования и связанных с ним сервисов (рис. 1.3). Благодаря новой бизнес-стратегии компания смогла заключать более крупные контракты и формировать более устойчивую производственную программу, ее бизнес стал более предсказуемым, и он растет как в сегменте продаж собственных запасных частей, так и в сервисных сегментах рынка, оборот от которых для Rolls-Royce превышает оборот от сегмента оборудования более чем в четыре раза.

Рис. 1.3. Структура доходов Rolls-Royce от продажи оборудования и связанных с ним сервисов (Источник: «Harvard Business Review Россия»)

Существует ряд вариантов прикладного использования сервисной модели в машиностроении. Так, Kaeser Kompressoren предлагает сервис Sigma Air, в рамках которого имеется возможность приобрести кубометры сжатого воздуха в необходимом вам месте по заранее согласованному графику. Мониторинг и диагностика, управление работой компрессора осуществляются удаленно в облаке – в штаб-квартире компании в Германии. Инженер компании периодически проводит ТО, организован ServiceDesk, устраняющий замечания по работе оборудования и обеспечивающий взаимодействие с клиентом. Данный пример – классика применения цифровых технологий и изменения бизнес-модели в компании.

Радислав Бирбраер, генеральный конструктор ИКФ «СОЛВЕР», отмечает, что «главная цель развитого цифрового сервиса – независимость от конкретных физических объектов. Тогда прибыль растет, т.к. легко масштабировать. Не нужны земля, люди, нужны знания. При выводе цифровых сервисов на рынок степень их готовности – не более 80%, остальные 20% дорабатываются по мере расширения продаж и получения отклика от клиентов (в процессе эксплуатации). Быстрая скорость реализации сервиса для быстрой скорости принятия бизнес-решений – это суть цифрового сервиса в Индустрии 4.0. Это и есть реальная цифровая стратегия: преобразование классического (существующего) бизнеса в бизнес с цифровыми сервисами». Также для развития цифровых сервисов Радислав Бирбраер рекомендует предпринять следующие шаги:

Шаг 1. Цифровые сервисы нужно начать развивать для своих бизнес-процессов;
Шаг 2. Для продвижения на рынке цифровых услуг (сервисов) нужно создать в компании новые инновационные структуры (а не все специалисты должны вовлекаться в эту новую работу);
Шаг 3. Должны быть созданы так называемые «spin-off», внешние компании, чтобы не «убивать» классический бизнес.

Вначале рекомендуется развивать свои сервисы, потом создавать новые структуры и параллельный бизнес для инноваций.

1.4.3. Как сформировать стратегию?

Разработка стратегий предприятий является первым и основным этапом цифровой трансформации бизнес-процессов и включает в себя в том числе **набор сценариев**, отвечающих прежде всего бизнес-задачам предприятия. Эффективная стратегия уже не может быть просто целью повышения эффективности и оптимизации бизнеса. Успешная реализация цифровой стратегии позволит предприятиям не потерять свои конкурентные позиции и завоевать новые рынки.

При этом следует учитывать, что в современных конкурентных условиях необходимо оперативно разрабатывать стратегии. Карл Ости, директор Autodesk по машиностроению в регионе EMEA, рекомендует исполнительным директорам компаний в разных странах забыть о долгосрочном моделировании и планировании: «Казалось бы, без планирования невозможно выстроить стратегию развития бизнеса и нивелировать риски. Однако сейчас процессы планирования идут в условиях настолько возросшего количества неопределенностей, что к моменту формулирования результата планирования он уже фактически устаревает. То есть путем планирования и моделирования мы пытаемся довести до совершенства то, что уже перестало быть актуальным. Моя рекомендация – быть более прагматичными».

Оперативно сформировать стратегию способен помочь подход, называемый «3К». Он заключается в ответах на вопросы, структурированные по трем разделам:

1. Конкуренты. Кто наши главные конкуренты? Каковы их бизнес-процессы? Какие ключевые элементы Индустрии 4.0 они используют?
2. Клиенты. Кто наши клиенты? Что они ждут от нас и что повысит нашу конкурентоспособность? Как с ними работают наши конкуренты?
3. Компания. Какие товары и услуги мы производим? Каким образом мы продвигаем их на рынке? Насколько наши бизнес-процессы соответствуют лучшим практикам рынка?

Начать проект рекомендуется с анализа технологических трендов вообще и специфики вашей индустрии 14 с тем, чтобы на примере отечественного и международного опыта понять, как различные цифровые технологии «приземляются» на ваши реалии. При этом следует смотреть максимально широко, поскольку особенностью цифровой экономики является размытие границ между отраслями.

На основании анализа трендов и формируется идеальная картина будущего, которая будет описывать видение будущего цифрового производства, место вашего предприятия в ней, вашу новую бизнес-модель, опирающуюся на возможности новых технологий (цифровых и не только). Необходимо определить приоритеты, т.е. какие прорывные технологии прежде всего необходимы для развития вашего бизнеса, какие технологии реально доступны в финансовом плане и прочие аспекты.

Следующий этап – это оценка цифровой зрелости предприятия, процессов, информационных систем, технологий и компетенций, имеющихся на предприятии. По результатам этой работы можно будет понять отправную точку, с которой начнется цифровая трансформация. Имея начальную и конечную точки трансформации, можно сформировать дорожную карту проекта.

Далее рекомендуется провести оценку экономической эффективности применения новых технологий и **определить ключевые KPI**.

Радислав Бирбраер подчеркивает, что цифровая стратегия – это прежде всего нацеленность на рост оборота, а не борьба за сокращение затрат. Именно такие бизнес-решения легко масштабируются (при фиксированных затратах на внедрение объемы растут).

1.4.4. Оценка цифровой зрелости предприятия

В настоящем документе рассматриваются два взаимообогощающих подхода к оценке цифровой зрелости:

- методика «Индекс зрелости Индустрии 4.0» – разработка проектного центра Industrie 4.0 Maturity Center, созданного на базе Немецкой академии технических наук (Acatech) 4;
- методика Organizational Digital Manufacturing Maturity Model – **ODM3** (Модель зрелости цифровой производственной компании), разработанная Московской школой управления СКОЛКОВО. Методика приведена в Рабочем докладе Департамента Корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО 2.

Индекс зрелости Индустрии 4.0

Основная цель подготовки индекса – помочь предприятиям определить, на какой стадии развития цифровизации они находятся в данный момент, правильно выстроить дорожную карту цифровизации и стратегию перехода к Индустрии 4.0. Методика помогает провести

анализ технологического уровня развития предприятия, его организационной структуры и перспектив с точки зрения внутренней корпоративной культуры.

Согласно методике, для создания умного производства необходимо обеспечить тесную взаимосвязь и координацию между физическими и вычислительными ресурсами. Всего в его рамках выделено шесть этапов зрелости предприятия (рис. 1.4), каждый из которых показывает, какими характеристиками должно обладать предприятие для перехода к технологиям Индустрии 4.0:

1. **информатизация** – внедрение **отдельных ИТ-решений**, а также закупка оборудования, поддающегося цифровому управлению;
2. **связанность (набор ИТ-решений)** – объединение разрозненных технологий в единую среду промышленного интернета вещей. Как правило, по протоколу IP между собой интегрируются системы автоматизированного проектирования и производства (CAD/CAM), управления технологическими процессами (MES), а также новое либо модернизированное старое оборудование. Также должна быть организована возможность удаленного обслуживания этой среды;
3. **наглядность** – **сбор информации в реальном времени**, отображение актуальной рабочей картины предприятия в цифровой среде. Достигается путем установки датчиков на производственное оборудование и внедрения систем PLM, ERP и MES. Автоматизация учета позволяет принимать более оперативные и эффективные управленческие решения;
4. **проницаемость (анализ и реакция)** – интеграция среды цифрового отображения предприятия с системами аналитики (в частности, с инструментами обработки больших данных);
5. **предсказуемость (предсказательная аналитика)** – внедрение настроенных под производство технологий предиктивной аналитики (технологий прогнозирования);
6. **самокоррекция (самооптимизация)** – автоматизация функций, отвечающих за гибкость, адаптацию бизнеса к изменяющимся условиям внешней среды.

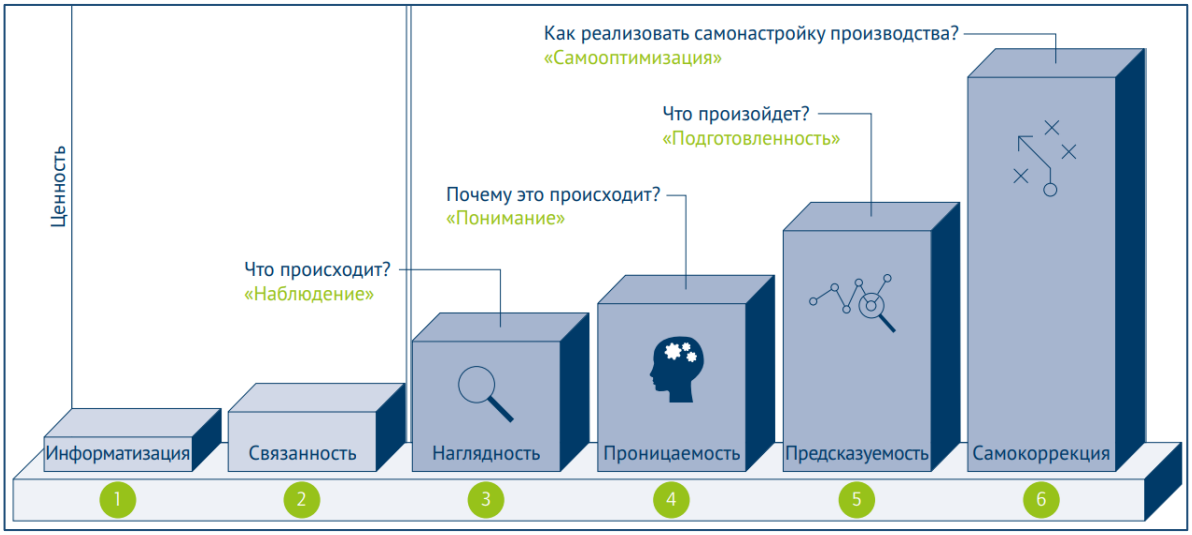


Рис. 1.4. Этапы на пути развития Индустрии 4.0 (Источник: Институт управления промышленной деятельностью при Рейнско-Вестфальском техническом университете Аахена)

Шесть стадий развития показывают, как в данной компании могут собираться, анализироваться и использоваться данные. Индекс зрелости на каждом этапе рассматривается в контексте характеристик, которыми должна обладать производственная компания для преобразования в постоянно развивающуюся, гибкую

организацию. В методике рассматриваются четыре структурные области ресурсов, информационных систем, культуры и организационной структуры. Совместно эти структурные области образуют организационную структуру. Они связаны шестью этапами пути развития для Индустрии 4.0, представленными шестью концентрическими кругами (рис. 1.5).

Рис. 1.5. Характеристики элементов структуры бизнеса компании (Источник: Институт управления промышленной деятельностью при Рейнско-Вестфальском техническом университете Аахена)

Особое внимание уделяется преобразованию организационной структуры и культуры. Основная цель преобразований – создание постоянно развивающейся, гибкой компании.

Использование индекса включает три последовательных этапа:

- первый этап – определение текущего этапа зрелости в различных функциональных областях;
- второй этап включает выявление компанией целевого этапа развития, которого она хочет достичь в конце процесса преобразования, на основании своей корпоративной стратегии. Сюда входит анализ существующих характеристик для Индустрии 4.0 по функциональным и структурным областям. Характеристики зависят от текущей стадии развития, достигнутой на этапе 1, и целевого состояния, которого компания хочет достичь к концу преобразования;
- третий этап включает определение действий и включение их в план с целью развития характеристик, выявленных на этапе 2.

Практические рекомендации и процессы перехода из текущего состояния к целевому на начальных этапах разработки изделий приведены в главе 2 настоящего руководства.

Методика ODM3

Методика ODM3 2 позволяет решать следующие задачи:

1. оценивать компании через сопоставительный анализ с наиболее развитыми предприятиями посредством использования системы оценки лучших практик цифрового производства отраслевых лидеров;
2. визуализировать стадию развития компании во внедрении ключевых компонентов и систем цифрового производства для планирования и реализации производственной программы, а также достижения стратегических целей компании;
3. определять направления развития компании для поддержки в достижении лучших бизнес-результатов, включая развитие специалистов компании;

4. моделировать экономический эффект в результате внедрения ключевых производственных технологий;
5. при управлении национальной экономикой – определять состояние отраслей, ставить цели развития и координировать их достижение для отраслевых флагманов.

Для дтальной диагностики предприятия авторами ODM3 разработаны **опросный лист и калькулятор диагностики зрелости**, которые можно загрузить по ссылке https://autodesk.ru/digitalguide.

Опросный лист диагностики цифровой зрелости компании включает в себя три раздела:

- «Проектирование и технологическая подготовка производства»;
- «Производство»;
- «Управление и материально-техническое снабжение».

В каждом из разделов представлено по пять сегментов, где, в свою очередь, выделен ряд ключевых характеристик для оценки по пятибалльной шкале (0-4).

Сами критерии, применяемые в методике, были отобраны в результате консолидации и систематизации отечественного и мирового опыта цифровизации, с учетом трендов нового технологического уклада.

Заполнив опросный лист и обработав результаты в калькуляторе, предприятие получит реальную картину своего уровня цифровой зрелости.

1.4.5. Оценка эффективности внедрения технологий Индустрии 4.0

При принятии решений об инвестициях сегодня в мировой практике чаще всего оценивается окупаемость технологий Индустрии 4.0 и, в частности, киберфизических систем, представляющих собой комплексные системы вычислительных и физических элементов, которые постоянно получают данные из окружающей среды и используют их для дальнейшей оптимизации процессов управления.

С такого анализа RoCPS (Return on cyber-physical systems) производственным компаниям после оценки цифровой зрелости рекомендуется начинать цифровую трансформацию 14.

Под руководством Павла Биленко, руководителя образовательных программ Индустрии 4.0 Московской школы управления СКОЛКОВО, была адаптирована методология RoCPS Института управления промышленной деятельностью при Рейнско-Вестфальском техническом университете Аахена (RWTH Aachen University).

Для систематизации определения киберфизических систем в университете предложили шесть технологических кластеров, показанных в табл. 1-1.

Табл. 1-1. Шесть кластеров киберфизических технологий (Источник: журнал «Умное Производство»)

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ	
Исполнительные механизмы Манипулирование физической реальностью с помощью аппаратного и программного обеспечения	**Датчики** Собирают данные из физического окружения и передают их в цифровую среду
Человеко-машинный интерфейс Интерфейс для взаимодействия человека с киберфизической системой	**Технологии передачи данных** Инфраструктура для обмена данными между цифровой и физической средой
ИТ-инфраструктура Инфраструктура для хранения и обработки данных внутри цифровой среды	**Анализ и обработка данных** Возможность анализировать и обрабатывать данные из/для бизнес-операций

Табл. 1-2. Структура затрат на внедрение киберфизических технологий (Источник: журнал «Умное Производство»)

Расходы на оборудование • Расходы на приобретение • Компоненты аппаратных средств • Стоимость настройки пользовательских интерфейсов • Затраты на настройку для аппаратных интерфейсов • Датчики • Сетевая инфраструктура	**Расходы на программное обеспечение** • Прикладные программы • Инструменты администрирования • Системы банков данных • Затраты на настройку программного модуля • Разработка программного обеспечения • Программные обновления • Стоимость лицензии	**Защита данных** • Контроль доступа • Системы авторизации • Носители данных • Шифрование носителей данных
Затраты на инфраструктуру • Новое здание (при необходимости) • Ремонт • Строительное оборудование • Серверные помещения • Склад • Внутренняя логистика	**Проектные затраты** • Расходы на персонал • Расходы на обучение • Расходы на инженерный и управленческий консалтинг • Командировочные расходы • Расходы на аренду помещения	**Прочие расходы** • Расходы на техническое обслуживание • Затраты на энергетические ресурсы • Расходы на связь

Для определения наиболее эффективных направлений цифрового развития следует провести сравнительный экономический анализ финансовой модели каждого направления. Система оценки потенциального экономического эффекта от внедрения киберфизических технологий включает следующие направления анализа:

- совокупные затраты на внедрение;
- прибыль и прочие преимущества;
- риски;

- потенциал (гибкость в будущем).

Затраты

При реализации производственных процессов на предприятии возникают группы производственных, административно-управленческих и маркетинговых затрат. Внедрение киберфизических технологий предполагает новую группу затрат (табл. 1-2), к которым относят следующие:

- закупка, доставка и установка оборудования;
- закупка, установка и интеграция программного обеспечения;
- переподготовка и переобучение производственного и инженерно-технического персонала;
- поиск, наем нового персонала и обучение специалистов;
- обучение руководителей.

Внедрение киберфизических систем способствует сокращению затрат на производство и реализацию продукции по сравнению с базовым вариантом, что обеспечивает эффективность и достижение целевых значений прироста прибыли.

Прибыль и другие преимущества

Факторы прироста прибыли и повышения конкурентных преимуществ компании:

- прирост производительности труда и оборудования;
- сокращение затрат на обеспечение качества;
- повышение точности прогнозов и сокращение срока вывода на рынок;
- сокращение затрат на хранение запасов и обслуживание продукции.

Риски

Риск является третьим важным компонентом в системе оценки экономического эффекта и используется как фильтр для определения погрешности в различных оценках затрат и прибыли.

Цифры с учетом рисков должны рассматриваться как «испытанные на прочность» ожидания, поскольку они являются ожидаемыми величинами с поправкой на риски. Обычно при учете рисков повышаются затраты и уменьшается прибыль по сравнению с исходными оценками.

Самые распространенные риски при внедрении киберфизических технологий:

- интеграция и опытная эксплуатация киберфизических технологий могут потребовать большего количества дней для консультационных услуг;
- скорость внедрения может быть медленнее планируемой;
- прирост прибыли на одного работника в каждой группе работников может быть ниже;
- сумма сэкономленных средств может быть меньше намеченной;
- оценки прибыли благодаря сокращению сроков реализации проектов, сокращению торговых циклов, экономии затрат могут быть ниже запланированных показателей.

Потенциал (гибкость в будущем)

Этот элемент является инвестицией в дополнительные возможности или быстроту действий сегодня, которые в будущем можно превратить в дополнительную прибыль за некоторые дополнительные затраты. Это дает компании право или способность (а не обязательство) заниматься будущими инициативами.

Экономический эффект внедрения новой технологии определяется по формуле:

$$Э_{нт} = (З_{баз} - З_{нов})N_{нов} = [(С_{баз} + Е_н К_{баз}) - (С_{нов} + Е_н К_{нов})]N_{нов},$$

где $Э_{нт}$ – экономический эффект новой технологии, руб.;

$З_{баз}$ – затраты на производство единицы продукции с помощью базового варианта технологии, руб.;

$З_{нов}$ – затраты на производство продукции с помощью новой технологии, руб.;

$N_{нов}$ – годовой объем производства продукции с помощью новой технологии, ед.;

$С_{баз}$ – себестоимость продукции базового варианта, руб.;

$С_{нов}$ – себестоимость продукции на основе новой технологии, руб.;

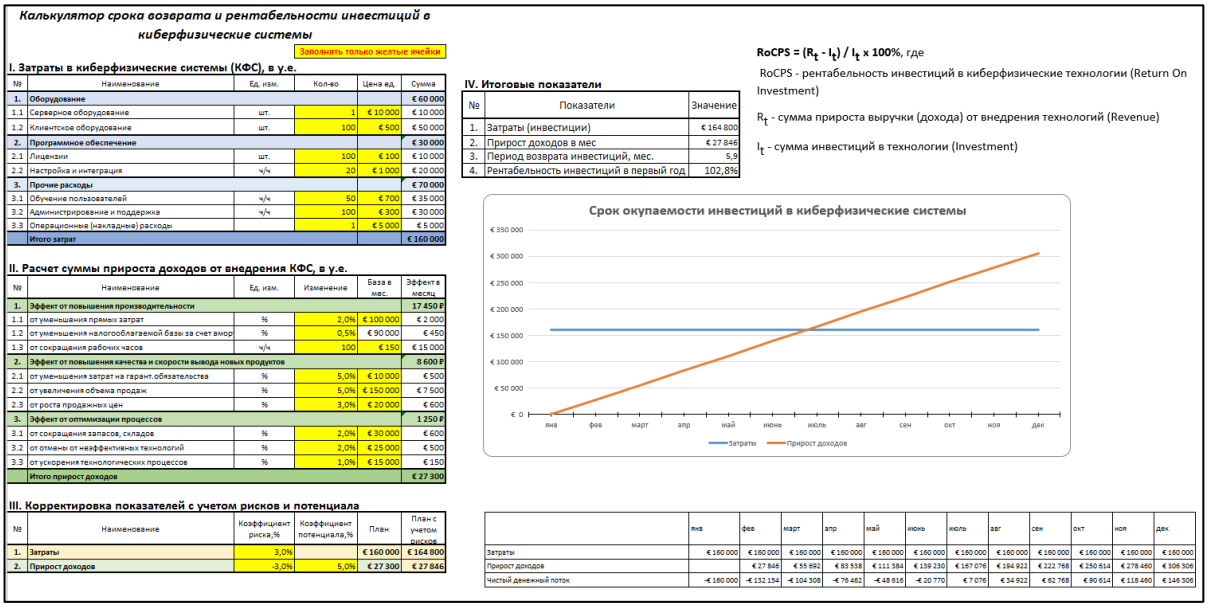
$К_{баз}$ – капиталовложения на единицу продукции базового варианта, руб.;

$К_{нов}$ – капиталовложения на единицу продукции на основе новой технологии, руб.;

$Е_н$ – нормативный коэффициент эффективности.

Данная формула является основой для расчета экономического эффекта от внедрения новой технологии практически в любой компании. Индекс прибыльности находится как отношение суммы потоков денежных доходов по проекту, приведенных к единице времени, к объему инвестиций. Эффективным является проект с индексом прибыльности более 1. Указанный показатель необходимо рассматривать в совокупности с абсолютным эффектом проекта. При сравнении двух проектов с одинаковым абсолютным эффектом выбирают тот, чей индекс прибыльности выше. Срок возврата вложенных инвестиций определяется периодом времени, необходимым для того, чтобы дополнительные доходы, генерируемые от внедрения новой технологии, покрыли затраты на ее внедрение.

Для экспресс-анализа показателей экономического эффекта достаточно использовать сравнительно простой и наглядный **калькулятор RoCPS** (рис. 1.6, можно скачать по ссылке https://autodesk.ru/digitalguide).



Калькулятор срока возврата и рентабельности инвестиций в киберфизические системы

Заполнять только желтые ячейки

I. Затраты в киберфизические системы (КФС), в у.е.

№	Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена ед.	Сумма
1.	Оборудование				€ 60 000
1.1	Серверное оборудование	шт.	1	€ 10 000	€ 10 000
1.2	Клиентское оборудование	шт.	100	€ 500	€ 50 000
2.	Программное обеспечение				€ 30 000
2.1	Лицензии	шт.	100	€ 100	€ 10 000
2.2	Настройка и интеграция	ч/ч	20	€ 1 000	€ 20 000
3.	Прочие расходы				€ 70 000
3.1	Обучение пользователей	ч/ч	50	€ 700	€ 35 000
3.2	Администрирование и поддержка	ч/ч	100	€ 300	€ 30 000
3.3	Операционные (накладные) расходы		1	€ 5 000	€ 5 000
	Итого затрат				€ 160 000

II. Расчет суммы прироста доходов от внедрения КФС, в у.е.

№	Наименование	Ед. изм.	Изменение	База в мес.	Эффект в месяц
1.	Эффект от повышения производительности				17 450 ₽
1.1	от уменьшения прямых затрат	%	2,0%	€ 100 000	€ 2 000
1.2	от уменьшения налогооблагаемой базы за счет амор	%	0,5%	€ 90 000	€ 450
1.3	от сокращения рабочих часов	ч/ч	100	€ 150	€ 15 000
2.	Эффект от повышения качества и скорости вывода новых продуктов				8 600 ₽
2.1	от уменьшения затрат на гарант.обязательства	%	5,0%	€ 10 000	€ 500
2.2	от увеличения объема продаж	%	5,0%	€ 150 000	€ 7 500
2.3	от роста продажных цен	%	3,0%	€ 20 000	€ 600
3.	Эффект от оптимизации процессов				1 250 ₽
3.1	от сокращения запасов, складов	%	2,0%	€ 30 000	€ 600
3.2	от отмены от неэффективных технологий	%	2,0%	€ 25 000	€ 500
3.3	от ускорения технологических процессов	%	1,0%	€ 15 000	€ 150
	Итого прирост доходов				€ 27 300

III. Корректировка показателей с учетом рисков и потенциала

№	Наименование	Коэффициент риска,%	Коэффициент потенциала,%	План	План с учетом рисков
1.	Затраты	3,0%		€ 160 000	€ 164 800
2.	Прирост доходов	-3,0%	5,0%	€ 27 300	€ 27 846

IV. Итоговые показатели

№	Показатели	Значение
1.	Затраты (инвестиции)	€ 164 800
2.	Прирост доходов в мес	€ 27 846
3.	Период возврата инвестиций, мес.	5,9
4.	Рентабельность инвестиций в первый год	102,8%

RoCPS = (R_t - I_t) / I_t x 100%, где

RoCPS - рентабельность инвестиций в киберфизические технологии (Return On Investment)

R_t - сумма прироста выручки (дохода) от внедрения технологий (Revenue)

I_t - сумма инвестиций в технологии (Investment)

	янв	фев	март	апр	май	июнь	июль	авг	сен	окт	ноя	дек
Затраты	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000	€ 160 000
Прирост доходов		€ 27 846	€ 55 692	€ 83 538	€ 111 384	€ 139 230	€ 167 076	€ 194 922	€ 222 768	€ 250 614	€ 278 460	€ 306 306
Чистый денежный поток	-€ 160 000	-€ 132 154	-€ 104 308	-€ 76 462	-€ 48 616	-€ 20 770	€ 7 076	€ 34 922	€ 62 768	€ 90 614	€ 118 460	€ 146 306

Рис. 1.6. Калькулятор RoCPS

1.4.6. Ключевые показатели для оценки эффективности производственной деятельности

После оценки уровня цифровой зрелости и экономической эффективности применения новых технологий рекомендуется определить ключевые KPI.

Ключевые показатели эффективности (КПЭ или KPI, key performance indicators) – это поддающиеся количественной оценке результаты расчетов, характеризующие наиболее важные факторы успешной деятельности предприятия. KPI важны для понимания и совершенствования производственных результатов как с точки зрения перспектив создания эффективного цифрового производства, так и для достижения стратегических целей.

На Деловом портале «Управление производством» 1 приведен примерный перечень KPI по различным направлениям производственной деятельности.

Оборудование:

- общая эффективность оборудования (OEE – Overall equipment effectiveness), %;
- загрузка мощностей, %;
- доля износа имеющегося оборудования, %;
- коэффициент обновления основных фондов, %.

Качество:

- выход годного с первого предъявления (FTT – First time through), %;
- доля затрат на технологический брак в себестоимости, %;
- доля рекламаций к количеству отгруженной готовой продукции, %.

Производство:

- коэффициент выполнения плана точно в срок (BSD – Build to schedule), %;
- коэффициент эффективности производственных процессов семейства критических изделий/услуг, %;
- доля себестоимости произведенной продукции к объему произведенной готовой продукции, %;
- оборачиваемость запасов незавершенного производства и запасов сырья, материалов, комплектующих, в днях;
- доля остатков готовой продукции к выручке, %;
- доля остатков запасов незавершенного производства к объему произведенной готовой продукции, %;
- доля запасов сырья, материалов и комплектующих к объему произведенной готовой продукции, %.

Логистика:

- общее время производственного цикла (TPT –Through put time), в днях;
- доля поставок готовой продукции заказчику точно в срок, %;
- качество цепочки поставок внутренним заказчикам точно в срок (OTIF – On time in full), %;
- доля поставок сырья, материалов и комплектующих от поставщиков точно в срок, %.

Персонал:

- выработка на одного сотрудника, млн руб.;
- количество несчастных случаев, шт.;

- количество реализованных предложений по улучшению на одного сотрудника, шт.

В июне 2017 года был принят ГОСТ Р ИСО 22400-2-2016 «Системы промышленной автоматизации и интеграция. Ключевые технико-экономические показатели (KPIs) для управления производственными операциями. Часть 2. Определения и описания», который идентичен международному стандарту ИСО 22400-2:2014. В этом стандарте определены КПЭ, используемые на практике для оценки эффективности работы оборудования и производственного персонала непрерывного, серийного, дискретного производства, а также при хранении и транспортировке продукции. В документе рассмотрены формулы для расчета КПЭ, потребители этих показателей, а также описана методика применения КПЭ.

Одним из основных КПЭ при оценке эффективности работы технологического оборудования является комплексный показатель «Общая эффективность оборудования» (OEE, Overall Equipment Effectiveness). OEE (рис. 1.7) учитывает готовность (доступность) оборудования, его эффективность (производительность) и качество продукции, выпускаемой на данном оборудовании.

Рис. 1.7. Структура OEE (Источник: First National Consulting Group)

Лучшие мировые производители достигают уровня производственного процесса с показателями OEE выше 80% (для дискретных процессов), однако среднее значение показателя OEE для производителей не превышает 60% и часто бывает в пределах 30-35%. Таким образом, целевым OEE может быть 80%. При значениях меньше 60% нужно срочно предпринимать активные действия, поскольку производственные мощности используются неэффективно.

1.5. Цифровое проектирование

После разработки стратегии предприятия, оценки уровня цифровой зрелости, оценки эффективности внедрения новых технологий и определения ключевых KPI, первоначальным этапом реализации стратегии цифровизации является цифровизация процессов проектирования, которые описаны в разделах 2 и 3 настоящего документа.

В современной высокотехнологичной промышленности произошли значительные структурные изменения – смещение центра тяжести в глобальной конкуренции на этап проектирования. Традиционные подходы и технологии, основанные, как правило, на

доводке изделий путем дорогостоящих испытаний, достигли своего «потолка» в развитии и применении и фактически становятся неконкурентоспособными.

Современное цифровое проектирование – это совокупность компьютерных технологий, которые помогают упорядочить информационные потоки, генерируемые в процессе многовариантного моделирования и проектирования, систематизируют информацию и облегчают доступ к ней. Новая парадигма цифрового проектирования 11 позволяет в кратчайшие сроки разрабатывать и создавать глобально конкурентоспособную продукцию нового поколения (рис. 1.8).

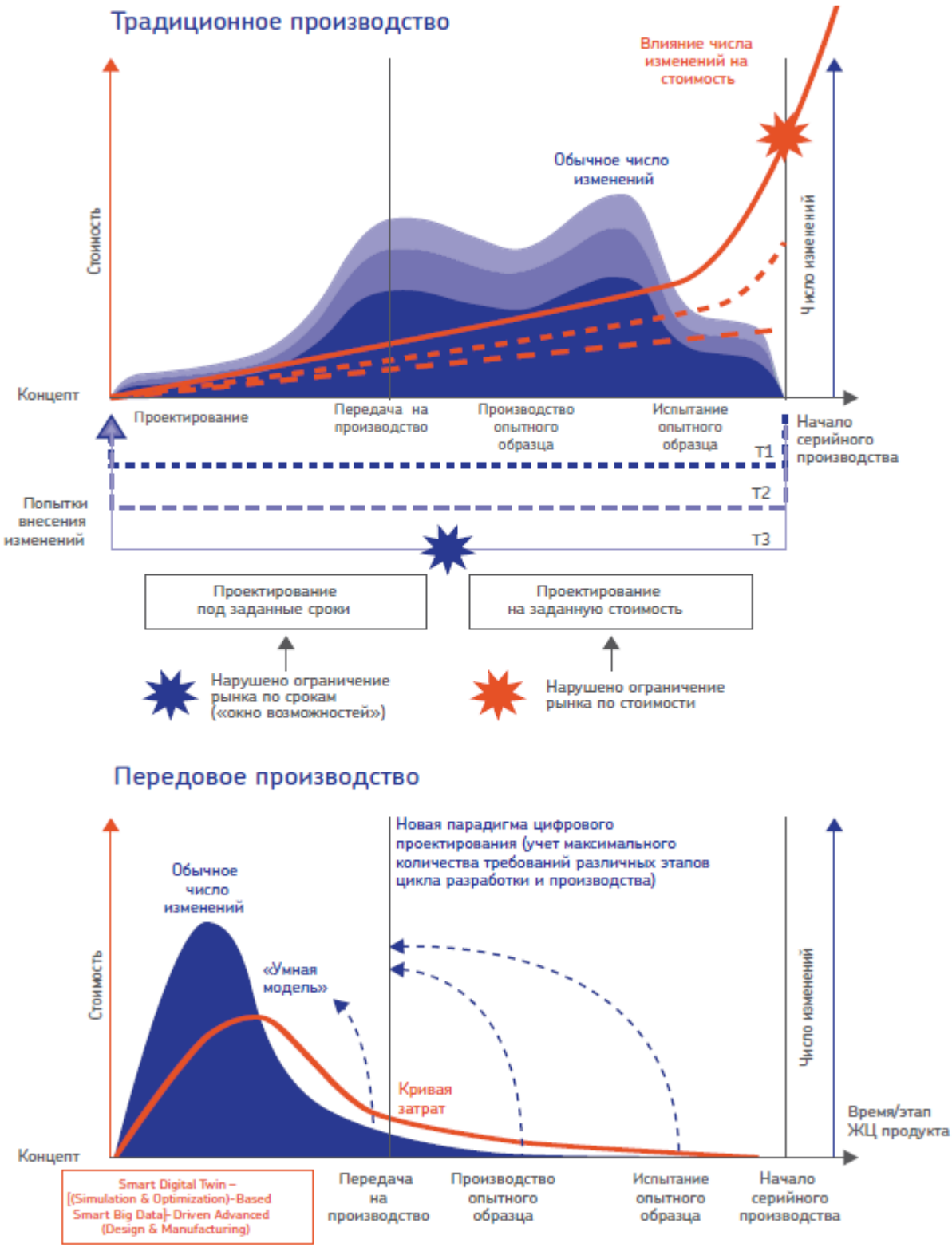


Рис. 1.8. Сравнение традиционного и передового подходов к производству (Источник: Центр НТИ СПбПУ)

В итоге становится принципиально возможным сосредоточить основную долю изменений и затрат на стадии проектирования.

Во второй главе данного руководства подробно рассматриваются новые процессы на стадии проектирования.

1.5.1. Цифровые двойники и цифровые тени

Специалисты Центра НТИ СПбПУ под руководством Алексея Боровкова подготовили главу «Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения» 11 в Рабочий доклад Московской школы управления СКОЛКОВО «Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии».

В докладе отмечается, что основу новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования составляет использование сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, конструкциям и физико-механическим процессам, разработка **цифровых двойников** как продукции (DT-1), так и производственных и технологических процессов (DT-2).

Такие математические модели агрегируют в себе все знания, которые применяются при проектировании, производстве и эксплуатации изделия. Модель за счет своей высокой адекватности позволяет значительно «приблизиться» к реальному объекту, что обеспечивает отличие между результатами виртуальных и натурных испытаний в пределах ± 5%. Именно такую высокоадекватную модель можно назвать **цифровым двойником объекта.**

Для ее получения необходимо применять следующие основные подходы, методы и технологии (выделены в рамках подготовки краткого доклада Центра НТИ СПбПУ и Инфраструктурного центра «Технет» «Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности»):

- «Best-in-class» технологии мирового уровня, из которых путем комплексирования формируется цепочка создания глобально конкурентоспособной продукции;
- системный инжиниринг;
- многоуровневая матрица требований / целевых показателей и ресурсных ограничений;
- «Виртуальные испытания» & «Виртуальные стенды» & «Виртуальные полигоны» 33.

В своих докладах Алексей Боровков отмечает, что многие до сих пор путают понятия **цифровой тени** и **цифрового двойника**. Говоря простым языком, цифровая тень может использовать трехмерные модели с заданными параметрами, но при этом не способна прогнозировать то, что может случиться с изделием при определенных условиях эксплуатации. Таким образом, цифровая тень может предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных (Big Data), но не позволяет моделировать ситуации, в которых реальный объект не эксплуатировался. В основе цифровой тени лежит, как правило, 3D геометрическая модель (электронный макет изделия), уровень адекватности которой пытаются повысить за счет длительных и дорогостоящих натурных испытаний или режимов эксплуатации и поступающих данных с избыточного количества датчиков на реальном объекте.

Кроме того, важным представляется комплексирование цифрового двойника изделия (DT-1) и цифрового двойника производственных и технологических процессов (DT-2) в рамках единой цифровой модели на основе выполнения десятков тысяч виртуальных

испытаний в процессе «цифровой сертификации», что ведет к формированию «умного» цифрового двойника первого уровня (Smart Digital Twin, $SDT_{(1)}$) (рис. 1.9).

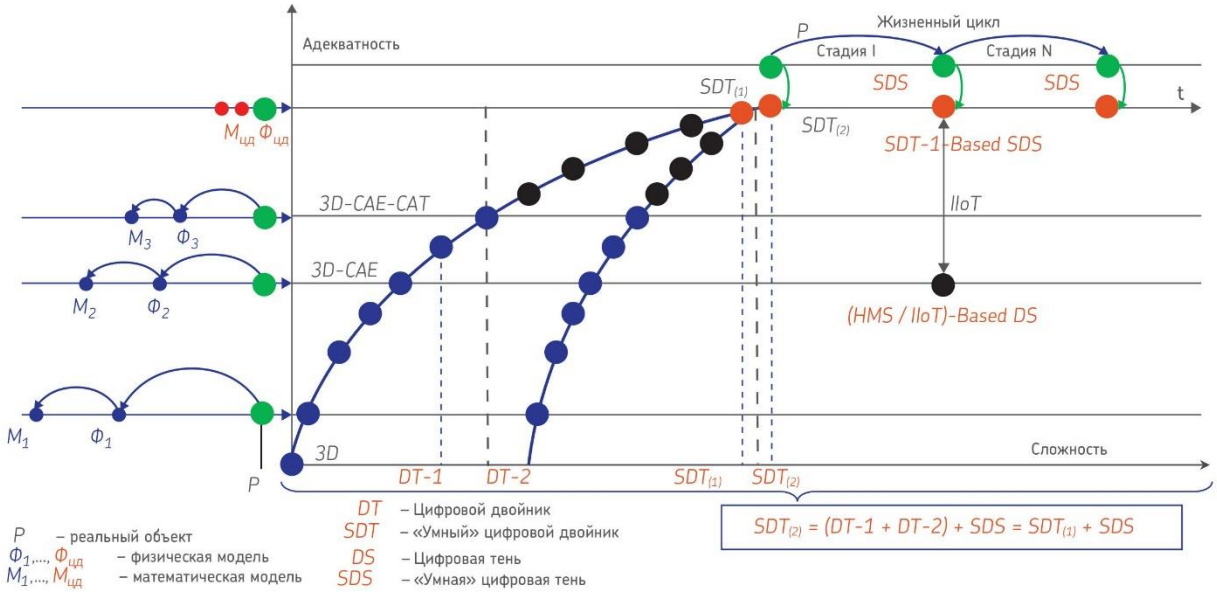


Рис. 1.9. Семейство физических и математических моделей. Цифровой двойник, «умный» цифровой двойник, цифровая тень (Источник: Центр НТИ СПбПУ)

1.6. Ключевые выводы и рекомендации от лидеров цифрового производства

Ниже приведены ключевые рекомендации, адресованные руководителям, осуществляющим цифровую трансформацию, и представленные в виде ключевых тезисов от лидеров цифрового производства: Алексея Боровкова, Радислава Бирбраера, Павла Биленко, Карла Ости, Кристиана Хокена и других экспертов:

- инвестиции в технологии при неэффективном менеджменте не только не окажут положительного влияния на бизнес, но, напротив, приведут к отрицательным результатам, а движущей силой цифровой трансформации являются не только новые цифровые технологии, но и руководство, ориентированное на внедрение новшеств и использующее современные методы управления. В этой связи одним из правил цифровой трансформации является ее проведение «сверху вниз»;
- для тестирования новых технологий должны быть созданы так называемые «spin-off», внешние компании, чтобы не «убивать» классический бизнес;
- в современных конкурентных условиях необходимо отказаться от разработки долгосрочных стратегических планов. Сейчас процессы планирования идут в условиях настолько возросшего количества неопределенностей, что к моменту формулирования результата планирования он уже фактически устаревает;
- цифровая стратегия – это прежде всего нацеленность на рост оборота, а не борьба за сокращение затрат. Именно такие бизнес-решения легко масштабируются (при фиксированных затратах на внедрение объемы растут);
- скорость принятия решений – это сегодня фактор № 1 успеха в бизнесе. Таким образом, решения должны приниматься в реальном времени;
- быстрая скорость реализации сервиса для быстрой скорости принятия бизнес-решений – это суть цифрового сервиса в Индустрии 4.0. При выводе цифровых сервисов на рынок степень их готовности – не более 80%, остальные 20% дорабатываются по мере расширения продаж и получения отклика от клиентов (в процессе эксплуатации);

- необходимо думать о реальных потребностях клиентов, и вы получите новую бизнес-модель, которую поддержат цифровые данные, цифровые сервисы.

В современном высокотехнологичном производстве центр тяжести смещается на этап проектирования [33], [11], поэтому одним из первых шагов цифровизации должно быть поэтапное внедрение технологий и процессов цифрового проектирования.

В первой главе данного руководства были рассмотрены основные концепции, тенденции и технологии умного производства, а также стратегии, бизнес-модели и методики трансформации бизнес-процессов. Следующие главы посвящены вопросам организации и реализации процессов цифрового проектирования.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ И ПОСТАНОВКИ ПРОДУКЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВО

Традиционные подходы к организации процессов разработки и производства изделий, реализуемые на многих промышленных предприятиях, имеют в своей основе стандарты:

- система разработки и постановки продукции на производство (СРПП, ГОСТ 15);
- технологическая подготовка производства (ТПП, ГОСТ 14.004-83);
- единая система конструкторской документации (ЕСКД, ГОСТ 2);
- единая система технологической документации (ГОСТ 3).

Несмотря на то, что эти стандарты регулярно обновляются, дополняются с учетом общей тенденции цифровизации процессов промышленного производства, их основой является традиционный бумажный документооборот. Эта особенность делает затруднительной оптимизацию производственных процессов под требования Индустрии 4.0 и повсеместное использование концепции цифровых двойников изделий на всех этапах жизненного цикла.

В первую очередь следует определить, какие бизнес-процессы могут быть адаптированы (изменены) под современные требования. Если процесс не может быть адаптирован, то следует подумать о его замене на новый процесс. При работе с процессами нужно иметь в виду, что эти процессы должны быть размещены в PDM-системе, а сами процессы должны быть в первую очередь ориентированы на данные цифрового двойника изделия. В последующих разделах описаны основные процессы КТПП в приложении к соответствующим этапам жизненного цикла цифрового двойника изделия.

2.1. Существующие подходы к организации процессов

Подходы к организации цифрового проектирования определяются уровнем цифровой зрелости предприятия (см. раздел 1.4.4).

Производственным предприятиям следует определять свои возможности, ставить цели развития и повышения производительности труда, используя комплексную модель оценки степени развития цифровой производственной компании. Руководству предприятия чрезвычайно важно диагностировать уровень развития ключевых компонентов, оценить степень воздействия их состояния на финансовый результат работы компании, разработать и реализовать программу развития ключевых технологических компонентов.

Методология Organizational Digital Manufacturing Maturity Model – ODM3, модель цифровой зрелости производственного предприятия, выделяет пять уровней развития производительности компании:

- **Ad hoc** – несистемный;
- **Defined** – базовый;
- **Managed** – управляемый;
- **Integrated** – интегрируемый;
- **Optimized** – оптимизируемый.

Особого внимания заслуживают уровни *Несистемный* и *Базовый*, так как нахождение предприятия на этих уровнях делает практически невозможной оптимизацию процессов цифрового проектирования под нужды Индустрии 4.0 и будущего преобразования предприятия в цифровую фабрику. К сожалению, сейчас в России к компаниям зачастую применимы именно эти уровни.

Далее приведем описание упомянутых уровней, как наиболее часто распространенных. Подробное описание других уровней, выходящее за рамки настоящего документа, вы можете найти в работе 2.

Уровень организации процессов «Несистемный»

Использование технологического решения или системы нерегулярное и неплановое. Правила и методики использования не определены. Используются общие инструменты, зачастую разработанные без опоры на лучшие практики. Программа развития направлений не разработана, связь технологии и производительности компании для руководства предприятия не определена. Оцениваются зависимости между технологиями, средствами производства, качественными характеристиками продуктов и производительностью труда.

Основные аспекты, оказывающие негативное влияние на общее состояние процессов при данном уровне развития:

- приобретение CAD/CAM/CAE/PDM программного обеспечения с избыточным функционалом;
- приобретение CAD/CAM/CAE/PDM программного обеспечения «в стол», без должного уровня интеграции;
- низкий уровень использования прикладных АС для цифрового проектирования: например, 3D САПР применяется в режиме 2D «электронного кульмана», отсутствует практика автоматизированного получения комплекта КД с 3D-модели, не используются специализированные 3D САПР. Это приводит к увеличению времени внесения изменений в комплект КД;
- отсутствие централизованной автоматизированной PDM-системы для хранения и управления проектными данными приводит к отсутствию единого представления компьютерной модели ЭМИ для всех участников процессов управления жизненным циклом изделия;
- отсутствие раннего доступа к цифровым данным ЭМИ приводит к увеличению времени выполнения начальных этапов КТПП;
- отсутствие документации, регламентирующей организацию процессов цифрового проектирования и управления данными в электронном виде;
- обмен данными осуществляется с использованием электронных средств общего назначения (электронная почта, веб-сервисы), а в некоторых случаях в письменном виде (на типовых бланках);
- хранение данных организовано на общем сетевом ресурсе, а в некоторых случаях на локальных дисках пользователей;
- в организации отсутствуют корпоративные программы повышения квалификации специалистов. Сотрудники отмечают, что опыт и навыки владения специализированным программным обеспечением они получают самостоятельно либо обращаются за помощью к службе технической поддержки поставщика ПО.

Уровень организации процессов «Базовый»

Определен единый подход к внедрению технологий. Определена результативность работы технологий для обеспечения эффективности работы компании. Реализованы отдельные технологические модули. Осознана потребность в изменениях через анализ практик и референс-визитов в компании с более высоким уровнем цифровой зрелости. Сформировано понимание эффективности использования цифровых технологий и систем. Формируются исследовательские и аналитические результаты. Планируется использование технологий, определены результаты оценки влияния систем и технологий на эффективность компании.

Основные аспекты, оказывающие негативное влияние на общее состояние процессов при данном уровне развития:

- функционал основной технологической платформы, PDM-системы, используется не полностью. Причина – отсутствие полноценного внедрения с учетом автоматизируемых бизнес-процессов предприятия;
- в организации существует документ, регламентирующий правила хранения, именования, оформления и выпуска чертежей в электронном виде (САПР-стандарт), но в большинстве отделов применяются собственные подходы к указанным процессам. Кроме того, отсутствуют средства и подходы, обеспечивающие контроль соответствия электронных чертежей требованиям Стандарта предприятия;
- отсутствуют единые правила обмена данными между прикладными программными решениями, используемыми для разработки и управления электронным макетом изделия, нет единых подходов к использованию унифицированных обменных форматов при передаче данных между этими решениями;
- отсутствует централизованная процедура формирования проектных данных с утвержденной структурой данных;
- не регламентирован процесс коллективной разработки ЭМИ под управлением PDM-системы.

Как правило, на предприятиях с низким уровнем цифровизации используется модель управления жизненным циклом (МЖЦ) «Водопад». МЖЦ «Водопад» является устаревшей и плохо подходит для современных производственных предприятий, ориентированных на повышение уровня своей цифровой зрелости и/или реализацию новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования (см. раздел 1.4.4, 11 и 2).

В силу того что большинство техник и подходов в парадигме организации КТПП по ГОСТ были написаны под «бумажную» технологию организации работ, потребуются адаптация и изменение существующих, разработка и внедрение новых процессов, учитывающих реалии сегодняшнего и завтрашнего дня.

В разделе 2.2.3 приведены схемы классических процессов КТПП, настроенных с целью обеспечить повышение уровня цифровой зрелости предприятия.

2.1.1. Основные задачи и процессы на стадиях жизненного цикла продукции в разрезе конструкторско-технологической подготовки производства

Процессы производственного предприятия делятся на две группы:

- **основные процессы**. Если посмотреть на предприятие как на бизнес-объект, это те процессы, которые генерируют *прибыль* и/или способствуют росту *активов* предприятия;
- **обеспечивающие (вспомогательные) процессы**. Процессы, которые способствуют, предоставляют ресурсы, обеспечивают бесперебойное и эффективное исполнение основных процессов.

Количество и вид процессов определяются *моделью ЖЦ (МЖЦ)* той номенклатуры, которую выпускает данное предприятие.

2.1.1.1. Задачи КТПП

Задачи КТПП включают в себя согласно ГОСТ Р 15.000-2016:

- разработку, производство продукции высокого технического уровня и качества, отвечающую современным достижениям научно-технического прогресса с учетом новых технологий, бережливого производства, безопасности для жизни и здоровья людей, охраны окружающей среды, совместимости и взаимозаменяемости, экономии материально-технических, энергетических ресурсов;
- сокращение сроков и затрат на разработку, производство и ремонт, а также затрат на эксплуатацию (применение, хранение) и ликвидацию продукции;
- обоснование состава качественных и количественных значений показателей по стандартизации продукции.

2.1.1.2. Работы в составе процессов цифрового проектирования

Основные работы в составе КТПП и процессов цифрового проектирования в проекции на стадии жизненного цикла продукции (ЖЦП) приведены в табл. 2-1.

Табл. 2-1. Основные процессы и работы в составе КТПП и процессов цифрового проектирования в проекции на стадии ЖЦП

Стадия ЖЦП	Этап КТПП	Процесс	Работа
Исследование и проектирование	Разработка концепта ЭМИ/ЭСИ (СДИ)	Эскизное и концептуальное проектирование	• Концептуальное проектирование промышленных изделий • Поверхностное моделирование. Дизайнерские задачи • Календарное планирование проекта
		Управление инженерными данными и совместная работа[2]	• Управление инженерными данными, жизненным циклом изделия и совместная работа • Организация совместной работы проектных групп

Разработка	Разработка ЭМИ (КТР)	Трехмерное моделирование в машиностроении	• Моделирование обычных деталей и деталей из листового материала
			• Моделирование сложных поверхностных моделей
			• Генеративный дизайн (генерация топологии деталей, порождающее проектирование)
			• Моделирование узлов и сборок изделий
			  ○ каркасные конструкции
			  ○ трубопроводные системы
			  ○ прокладка электрических кабелей по 3D-модели
			• Моделирование типовых узлов механических систем:
			  ○ болтовые соединения
			  ○ валы и детали вала
			  ○ ременные и зубчатые передачи

		Проектирование электротехнической составляющей изделий	• Проектирование принципиальных схем • Проектирование печатных плат • Проектирование электромеханических изделий
		Разработка больших сборок	• Разработка больших сборок промышленных изделий • Консолидация больших трехмерных проектов из разрозненных источников, анализ коллизий

[2] Данный процесс повторяется на всех стадиях ЖЦП.

Стадия ЖЦП	Этап КТПП	Процесс	Работа
		Подключение внешних данных	• Векторизация сканированных бумажных документов • Наработки в 2D/3D из различных САПР • Подключение данных трехмерного сканирования • Параллельная работа в условиях использования данных, полученных в различных САПР и САПР разных вендоров
		Виртуальные испытания ЭМИ и инженерный анализ	• Расчеты кинематики и динамический анализ • Расчеты на прочность, деформации, устойчивость, ударные нагрузки и др. • Расчеты гидрогазодинамики
		Выпуск конструкторской документации	• Выпуск 2D-чертежей • Выпуск эксплуатационных и сборочных руководств • Визуализация
Изготовление (производство)	Подготовка производства	Проектирование, анализ и оптимизация цифровых моделей предприятий и отдельных производственных мощностей	• Проектирование цифровых 2D/3D-моделей производства • Анализ эффективности и оптимизация производства

		Проектирование и расчет технологии изготовления	• Разработка технологических процессов и карт
			• Создание карт раскроя и оптимизация раскроя листовых деталей
			• Проектирование технологической оснастки (штампов, пресс-форм и приспособлений) с использованием 3D-моделей деталей, которые будут изготавливаться с помощью этой оснастки
			• Пресс-формы для литья под давлением: расчет проливаемости и коробления детали
			• Подготовка УП для ЧПУ:
			  ○ фрезерная обработка
			  ○ токарная обработка
			  ○ роботы
			  ○ гибридная аддитивно-субтрактивная обработка

Стадия ЖЦП	Этап КТПП	Процесс	Работа
			○ инструментальный контроль формы
		Проектирование и расчет технологии изготовления для аддитивного производства	• Экспресс-инструменты подготовки 3D-печати • Полный комплекс инструментов подготовки 3D-печати, оптимизации моделей под аддитивное производство и математического моделирования процессов 3D-печати из металлов

2.1.1.3. Основные участники КТПП

Основными участниками КТПП на производственном предприятии являются:

- главный конструктор;
- главный технолог;
- отдел главного конструктора (ОГК);
- отдел главного технолога (ОГТ);
- конструкторское бюро;
- технологическое бюро;
- отдел расчетного обоснования;
- отдел нормоконтроля;
- группа дизайна;
- инструментальный и экспериментальный цеха.

2.2. Передовые подходы к организации процессов

2.2.1. Стратегия PLM для поддержки процессов КТПП

Методология PLM или методология управления жизненным циклом изделия – это концепция ведения бизнеса на основе системных решений, обеспечивающих коллективную разработку, распространение и использование технических данных об изделии, а также управление ими, начиная с создания концептуального прототипа изделия и заканчивая его утилизацией. PLM обеспечивает интеграцию персонала, производственных процессов, бизнес-систем и информации.

Согласно 9, управление жизненным циклом обеспечивает сокращение:

- затрат на разработку и производство наукоемкой продукции на 20-30%;
- затрат, связанных с браком и устранением дефектов продукции, на 15-20%;
- затрат в период эксплуатации продукции на 20-25%;
- времени вывода на рынок новых образцов продукции на 60-70%.

Таким образом, разнообразные потребности в данных об изделии, представленных в цифровом формате, могут быть полностью обеспечены только на основе системного подхода к информационной поддержке жизненного цикла изделия.

Поддержка жизненного цикла изделия обеспечивает интеграцию информации, персонала, бизнес-процессов, проектных, конструкторских, производственных и управленческих систем на всех этапах ЖЦ и объединяет в комплексную систему передовые подходы и опорные технологии, включая управление данными об изделии (PDM), коллективные разработки, визуализацию, цифровое производство, выбор стратегических поставщиков, управление соответствиями, их проверку и пр.

2.2.1.1. Основные функции PLM-системы

PLM – это не только методология, но и название класса автоматизированных систем (АС), в которых данная методология реализована. Так же, как и в случае с ERP-системами, PLM-системы, представленные в настоящее время на рынке, имеют различную функциональность и, в общем случае, **модульную структуру**.

Тем не менее, есть некоторый набор функций, который может считаться типовым для программных продуктов класса PLM. Такими типовыми функциями являются 10:

- создание подмножества интегрированной информационной среды (ИИС) для сотрудников предприятия за счет хранения и предоставления нужных им данных в нужное время в нужной форме в соответствии с правами доступа;
- формирование и поддержка электронного архива документации (конструкторской, технологической, проектной, организационно-распорядительной);
- управление разработкой данных и документации (совместная работа в рабочей группе);
- организация электронного документооборота (согласование и утверждение данных и документов, контроль исполнения);
- управление составом (конструкторским, технологическим, проектным, производственным и т.д.) и конфигурациями изделия;
- управление изменениями (выпуск извещений об изменениях, согласование измененной документации, оповещение сотрудников о проведенных изменениях);
- управление нормативно-справочной информацией (ведение классификаторов и справочников: материалы, стандартные изделия, радиоэлементы, оборудование, оснастка и т.д.);
- обмен данными об изделии со смежными системами (ERP/MES и др.).

Как видно из предоставленного списка типовых функциональных возможностей, некая усредненная PLM-система не охватывает все потребности в управлении ЖЦ изделия: в частности, не закрыты вопросы разработки электронных макетов изделия (ЭМИ) различных видов (конструкторский ЭМИ, технологический ЭМИ и т.д по ГОСТ 58301-2018), планирования и управления проектами КТПП и производства, автоматизации управления требованиями к изделиям и т.п.

2.2.1.2. Состав PLM-системы

В настоящее время в рамках одной **автоматизированной системы (АС)** охватить все задачи управления ЖЦ изделия не представляется возможным, поэтому под PLM-системой, как правило, понимается некий набор взаимоувязанных (интегрированных) АС (Рис. 2.1):

- **автоматизированная система управления данными об изделии** (АС УДИ, Product Data Management), PDM-система (ГОСТ 58300-2018);
- **система автоматизированного проектирования**, CAD (ГОСТ 23501.101-87);
- **система инженерного анализа**, CAE (Computer-aided Engineering);
- **система автоматизации изготовления**, CAM (Computer-aided manufacturing);
- **система автоматизированной технологической подготовки производства**, CAPP (Computer-aided Process Planning);
- **система планирования производства продукции** (Manufacturing Process Management), MPM.

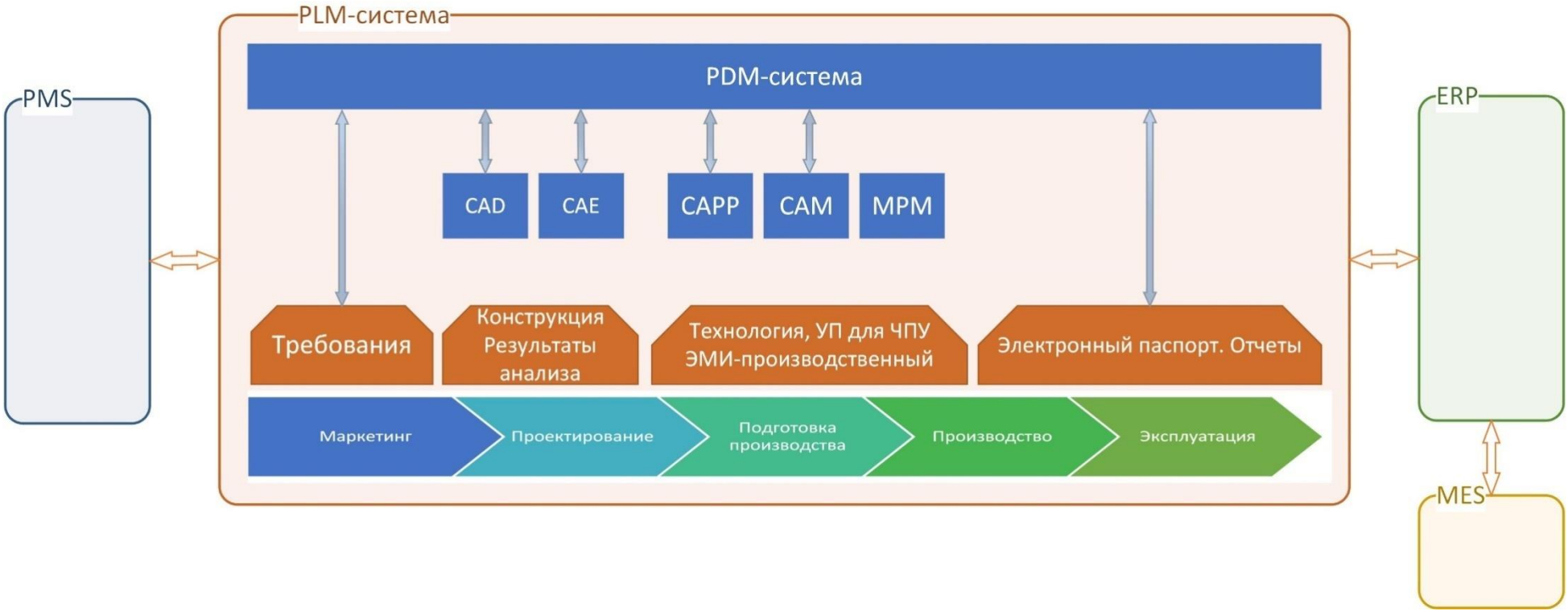


Рис. 2.1. Схема варианта реализации PLM-системы и ее ближайшего окружения (Источник: компания «КЭЛС-центр»)

Следует обратить внимание на неоднозначность в терминологии, используемой разработчиками PLM-систем. Зачастую под PLM-системой они понимают и, соответственно, выпускают на рынок либо АС в объеме базовой функциональности, либо АС, расширенную некоторыми встроенными функциями, характерными для смежных АС в рамках PLM-стратегии (к примеру, модуль управления проектами, модуль управления требованиями и т.п.). В целом это хорошая тенденция в рамках общей эволюции PLM-методологии, ведущая к будущим полнофункциональным PLM-системам.

2.2.1.3. Интеграция прикладных автоматизированных систем в PLM-системе

Необходимо отметить, что в процессе развития прикладных АС, входящих в PLM-систему, происходили процессы взаимной интеграции этих АС в направлениях:

- использования PDM-системы как локальной шины обмена данными – защищенного хранилища данных. При этом PDM-система функционально развивается в сторону интеграции в прикладных АС инструментов доступа к данным в защищенном хранилище (модули интеграции PDM-САПР);
- обмена данными через чтение файлов в *проприетарных форматах* одной АС в другой АС. Примером такого формата является DWG, экспорт и прямое чтение которого поддерживаются широким спектром систем класса CAD/CAM/CAE;
- обмена данными через обменные форматы, такие как:
  - **стандартизированные обменные форматы**: STEP, IGES, STL, IFC и ряд других;
  - **проприетарные обменные форматы** разработчиков ядер геометрического моделирования: Parasolid, ACIS и ряд других;
- интеграции через **сервисы интерфейса прикладного программирования** (API). Таким образом обычно интегрируются между собой прикладная АС и PDM-система. Интерфейс, как правило, реализуется на стороне прикладной АС в виде дополнительных вкладок ленты, панелей инструментов, меню и т.п., отвечающих за вызовы функций PDM-системы.

2.2.1.4. Общая информационная шина предприятия и интегрированная информационная среда для реализации стратегии PLM

При анализе методологии PLM становится очевидным, что эта методология имеет концепцию **единого источника данных (общей/единой базы данных)** для некоторой группы сотрудников производственного предприятия, в то время как другие потребности других групп пользователей могут быть закрыты другими автоматизированными системами.

Таким образом, можно выделить два основных аспекта, влияющих на построение ИТ-ландшафта:

- в силу **стадийности моделей ЖЦ изделия** данные об изделии порождаются на разных стадиях ЖЦ. При этом выходные данные предыдущей стадии являются входными для последующей (в том или ином объеме);
- данные об изделии порождаются в различных прикладных АС, которые могут как входить, так и не входить в контур PLM. При этом данные должны быть доступны пользователям всех АС, имеющим отношение к управлению ЖЦ изделий, производимых на предприятии. Согласно методологии PLM, данные об изделии должны быть доступны на всех стадиях его ЖЦ всем заинтересованным

участникам бизнес-процессов деятельности предприятия в объеме их (участников) реквизитов доступа.

Проекция вышеизложенных аспектов на ИТ-ландшафт предприятия в разрезе прикладных АС и порождаемых ими потоков данных показана на рис. 2.2, рис. 2.3, рис. 2.4, где:

- **MDC** – система мониторинга станков с ЧПУ, MDC/MDA (Machine Data Collection/Machine Data Acquisition);
- **CAI** – система компьютерного обследования (Computer-aided inspection);
- **MES** – система организации производства (Manufacturing Execution System);
- **ERP** – система управления и планирования ресурсами (предприятия), СУПР, ERP-система (Enterprise Resources Management);
- **подсистема УКП (MPM)** – подсистема управления, контроля и планирования производства;
- **подсистема СКП** – подсистема складирования и комплектования поставки. Состоит из АС ERP, MES, интеграционных решений и локальной сервисной шины данных;
- **подсистема ППР** – подсистема планирования и подготовки производства. Состоит из АС ERP, MES, MDC, интеграционных решений и локальной сервисной шины данных;
- **подсистема ОТК** – подсистема технического контроля. Состоит из АС MES, CAI, интеграционных решений и локальной сервисной шины данных.

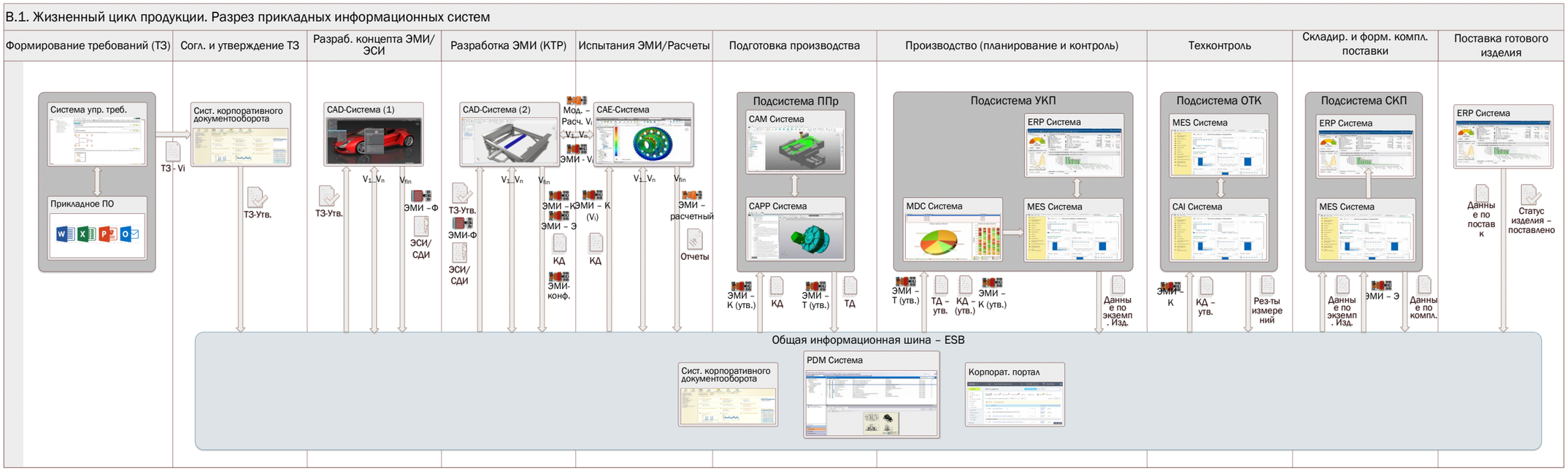


Рис. 2.2. Прикладные АС в разрезе стадий ЖЦ производимых изделий

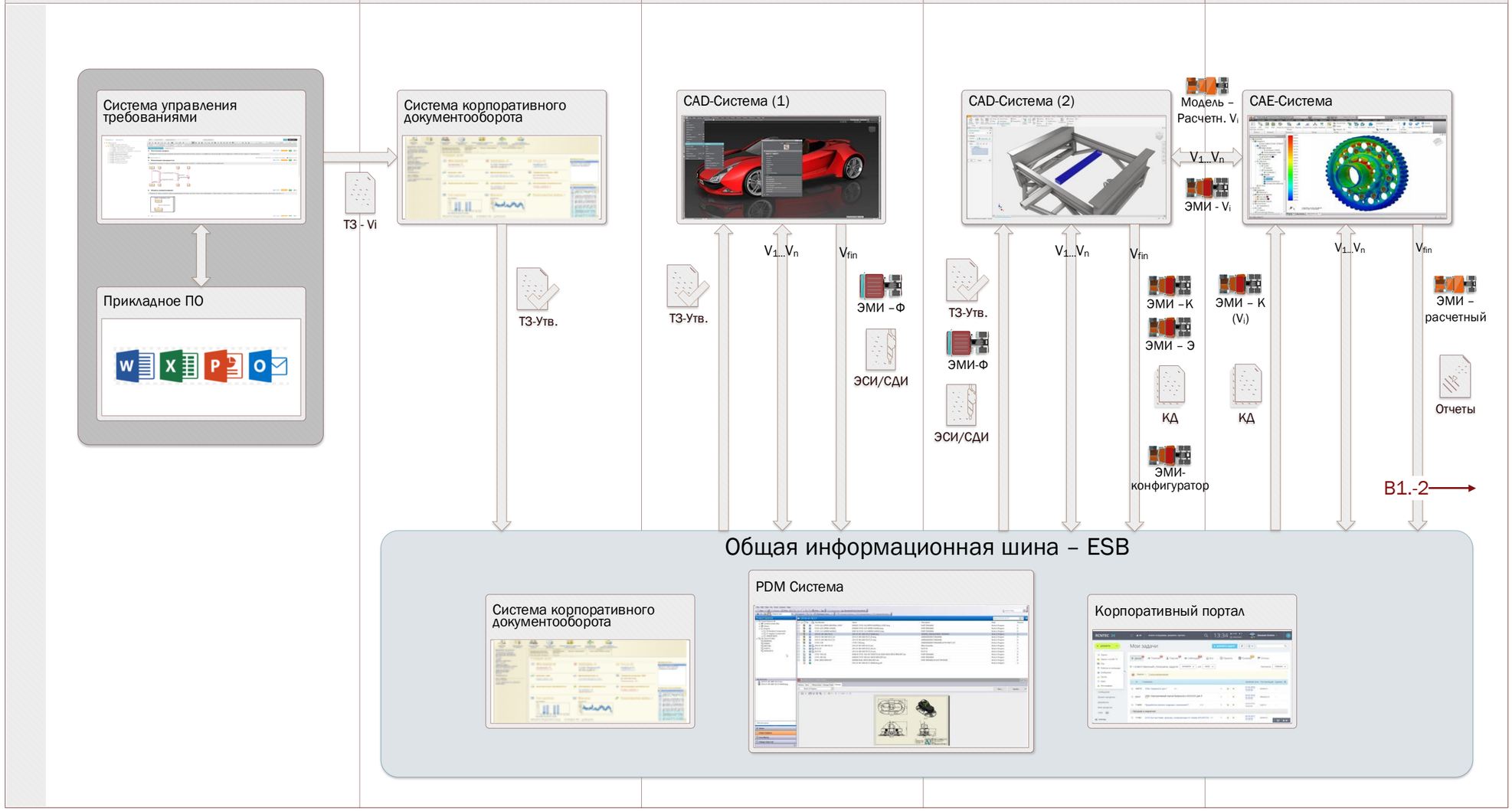


Рис. 2.3. Фрагмент 1 схемы B.1

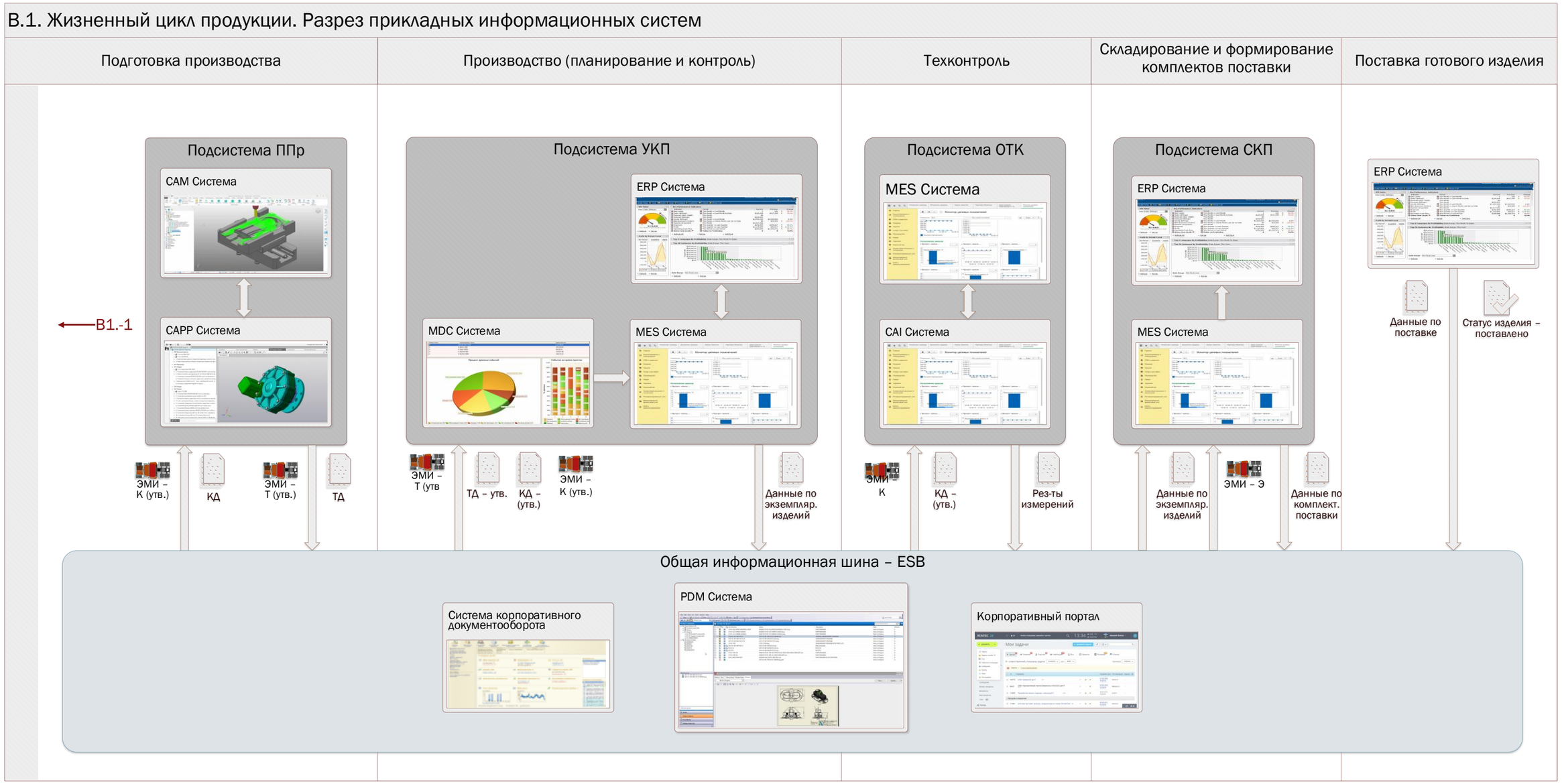


Рис. 2.4. Фрагмент 2 схемы В.1

В силу вышеизложенного ИТ-ландшафт современного производственного предприятия должен строиться с учетом парадигм:

- интегрированной информационной среды;
- корпоративной сервисной шины данных.

Далее рассмотрим более подробно каждую из парадигм.

2.2.1.4.1. Интегрированная информационная среда производственного предприятия

Интегрированная информационная среда (ИИС) – организационно-техническая система, обеспечивающая информационную поддержку процессов управления жизненным циклом промышленно изготавливаемого изделия.

В общем случае ИИС состоит из следующих компонентов 9:

- **набор прикладных АС**, обеспечивающих создание информации об изделии и ее преобразование в форму, пригодную для изготовления и эксплуатации этого изделия;
- **набор программно-технических комплексов (ПТК АС)**, необходимых и достаточных для надлежащего технического обеспечения функционирования АС;
- **комплекс программно-аппаратных системотехнических решений**, увязывающих набор прикладных АС, ПТК АС, информационных потоков в целях организации межсистемного взаимодействия, обеспечивающего сквозную информационную поддержку бизнес-процессов производства;
- **необходимые организационные элементы**: обученный персонал, методики работы в ИИС, регламенты взаимодействия с внешними участниками информационного обмена и т.п.

Данные из ИИС доступны пользователям в различных разрезах с помощью соответствующих интерфейсов, предоставляемых в том или ином виде любой из прикладных АС, входящих в ИИС: ERP-системой; АС, входящими в состав PLM-системы и т.д.

2.2.1.4.2. Корпоративная сервисная шина данных и ИТ-ландшафт современного производственного предприятия

Корпоративная сервисная шина данных (Enterprise Service Bus), ESB, КСШД – прикладная АС, предназначенная для построения распределенного информационного ландшафта предприятия. Она обеспечивает взаимодействие всех интегрируемых приложений в одном центре, объединяя существующие источники информации и предоставляя централизованный обмен данными между разными информационными системами.

В общем случае, КСШД является **системной архитектурой** для построения ИИС. Это набор принципов и правил для интеграции множества приложений с использованием инфраструктуры шины. Каждое ESB-решение позволяет построить один и тот же тип архитектуры, но все они предлагают для этого разные способы и возможности.

Основной принцип **Enterprise Service Bus** – интеграция различных приложений путем установки коммуникационной шины между ними и настройка «общения» этих приложений с шиной. Шина отделяет приложения друг от друга, позволяя им коммуницировать независимо от других приложений и даже «не зная» о существовании друг друга.

Преимущества ESB вытекают из недостатков способа интеграции приложений, при котором увеличение на порядок количества сопрягаемых АС приводит к увеличению объема работ и поддержки на 2-3 порядка. Этого недостатка лишена системная архитектура на ESB.

2.2.2. Новые роли участников КТПП в разрезе реализации процессов цифрового проектирования

Следует адаптировать существующие, традиционные методы построения структур управления производственными предприятиями к современным трендам Индустрии 4.0.

Для этого нужно пойти путем эволюционного развития, постепенно повышая свой уровень цифровой зрелости (см. главу 1). При повышении уровня цифровой зрелости до оптимизированного необходимо будет привлечь в штатный состав предприятия специалистов по новым направлениям цифровизации. Также возможно повышение квалификации имеющихся специалистов с последующим делегированием им новых функциональных обязанностей.

Одним из способов повышения уровня цифровой зрелости является **горизонтальное масштабирование** существующей структуры управления. Этот способ сравнительно безболезнен, однако следует заметить, что наиболее эффективно он работает с **линейно-функциональной структурой управления** 20.

Горизонтальное масштабирование в данном аспекте реализуется как добавление новых структурных подразделений и соответственно рабочих мест в существующую иерархию управления. Таким образом, новых вертикальных уровней и связей на верхних уровнях управления не создается (что наименее болезненно именно для иерархических структур, характерных для низких уровней цифровой зрелости). Все изменения происходят либо по горизонтали, либо на средних и начальных уровнях структуры управления.

Примеры масштабирования линейно-функциональной структуры управления в рамках производственного машиностроительного предприятия показаны на рис. 2.5,рис. 2.6, рис. 2.7. Оранжевой заливкой отмечены новые структурные подразделения/рабочие места, а оранжевыми рамками – новые рабочие места (РМ) в рамках существующих структурных подразделений, то есть показано делегирование новых функций штатной единице.

Отдельно следует заметить, что текущий вектор развития продуктовых решений вендоров предполагает совмещение ролей конструктора и технолога (генеративный дизайн), конструктора и расчетчика (в САПР интегрируются расчетные модули CAE).

Ниже представлены варианты реструктуризации в зависимости от масштаба предприятия, а также наличия производства полного и частичного цикла (рис. 2.5 и 2.6 соответственно). Третья схема (рис. 2.7) иллюстрирует реструктуризацию мини-бизнеса инжиниринговой компании.

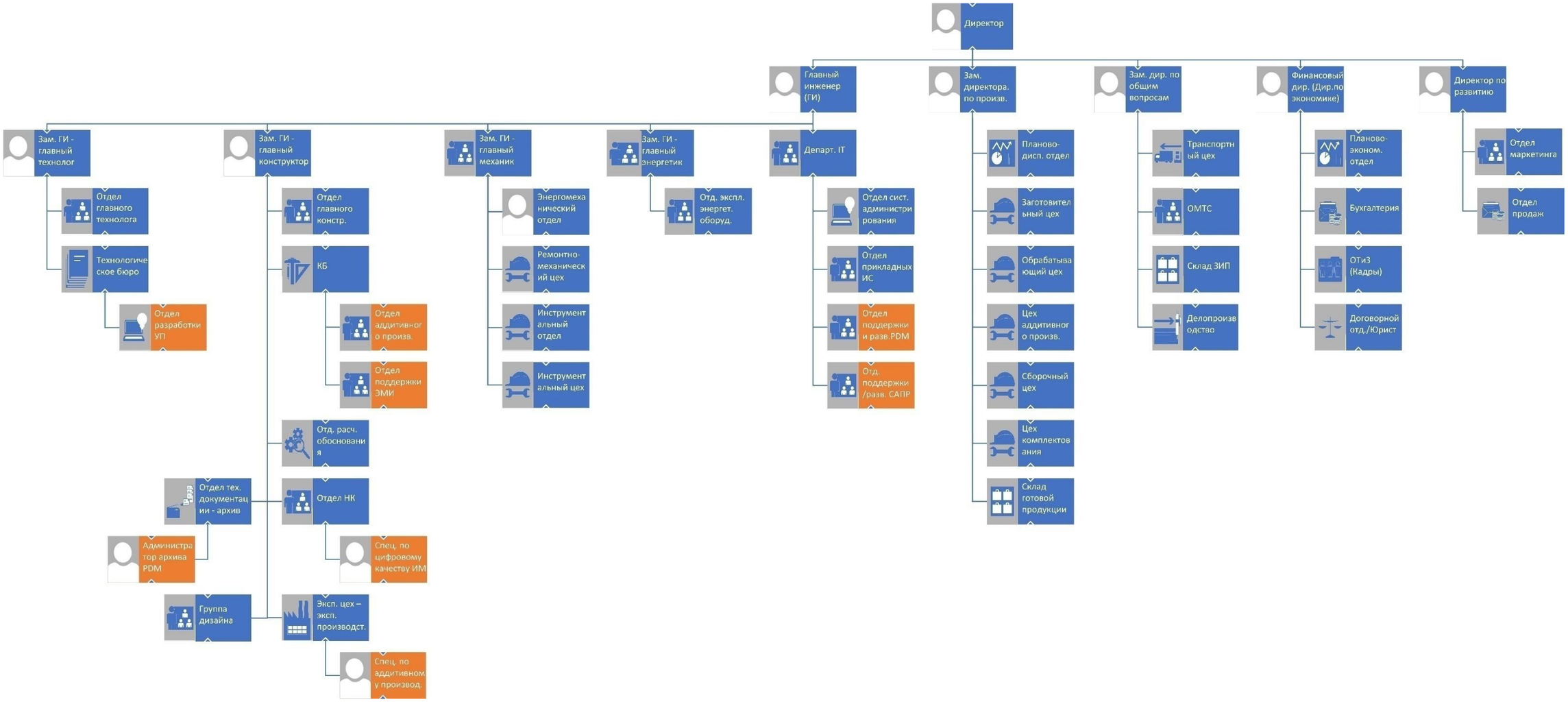


Рис. 2.5. Схема линейно-функциональной структуры производства полного цикла

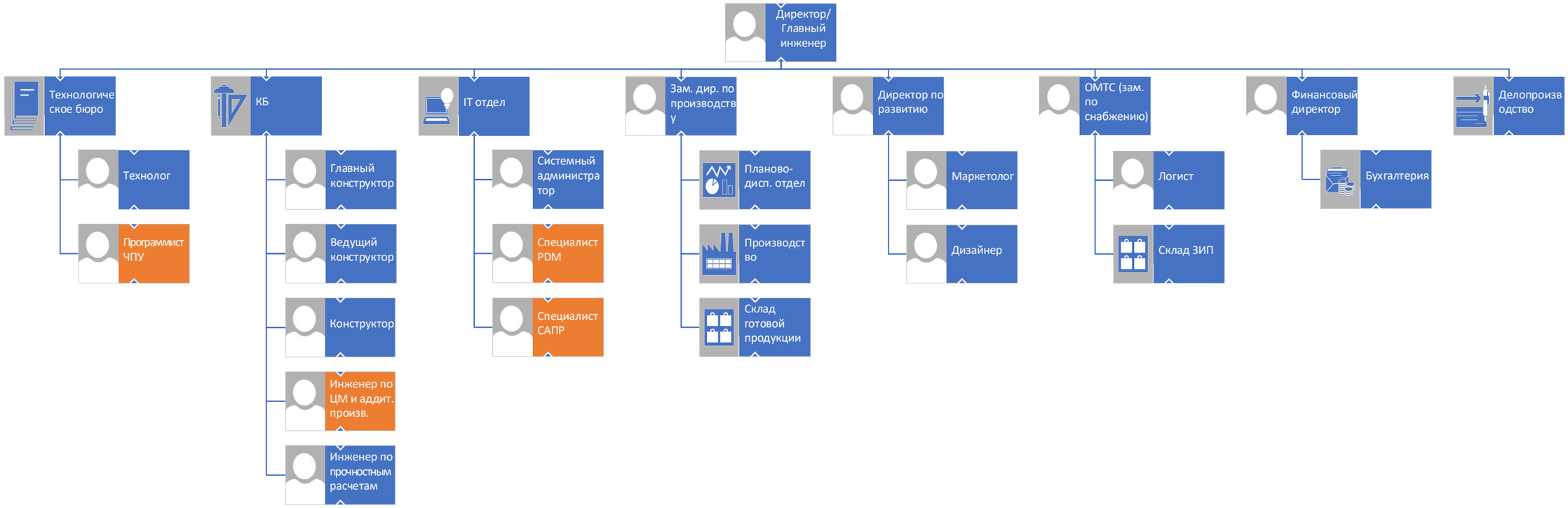


Рис. 2.6. Схема линейно-функциональной структуры производства частичного цикла

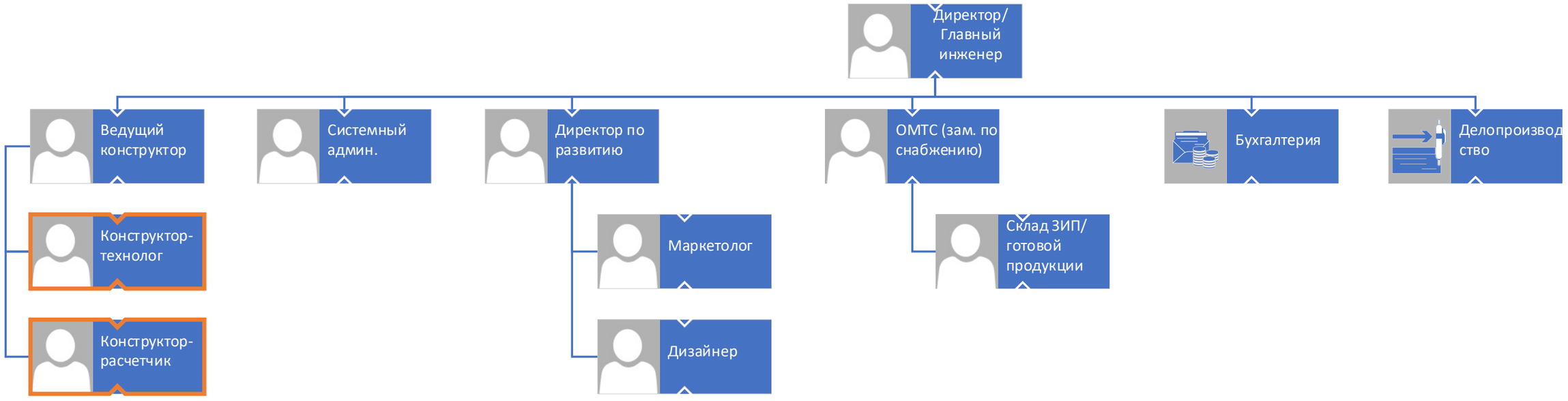


Рис. 2.7. Схема линейно-функциональной структуры малой инжиниринговой компании

2.2.3. Новые процессы разработки изделий и гибкое производство

Новые процессы разработки изделий не должны строиться на «классических» подходах, описанных в ГОСТ «доцифровой» эпохи, но должны представлять собой их глобальное переосмысление в разрезе парадигмы цифрового проектирования. Таким образом, прежде чем разрабатывать новые процессы, следует внимательно присмотреться к имеющимся работоспособным процессам, изучить их: может быть, они пригодны для переосмысления, оптимизации.

В конечном счете, цель оптимизации существующих процессов, как и разработки новых, в первую очередь – повышение конкурентоспособности предприятия на глобальных рынках в свете тренда цифровизации и Индустрии 4.0.

Новые процессы разработки изделий тесно связаны с другой концепцией – *гибкого производства*. Гибкое производство – это производство, оптимизировавшее все свои производственные процессы, чтобы иметь возможность быстро реагировать на потребности клиентов и изменения на рынке, сохраняя при этом контроль над затратами и качеством.

При разработке новых процессов в рамках реализации концепции гибкого производства следует принимать во внимание:

- максимально возможное распараллеливание работ;
- смещение циклов доработок изделия на начальные стадии ЖЦ;
- внедрение новых технологий производства – в частности, аддитивных технологий (ГОСТ Р 57590-2017);
- переход на прогрессивные модели управления ЖЦ изделий;
- оптимизацию штатного состава организации согласно новой парадигме цифрового проектирования (см. раздел 2.2.2);
- развитие интеграционных сервисов – платформ корпоративных шин данных (см. раздел 2.2.1.4.2), интеграцию прикладных АС между собой;
- широкое распространение прикладных АС, решающих задачи автоматизации выполнения проектно-конструкторских работ (ПКР, ГОСТ 58300-2018);
- представление результатов проектно-конструкторских работ – РКР (ГОСТ 58299-2018) в виде электронных макетов изделий – ЭМИ (ГОСТ 58301-2018).

Максимально возможное распараллеливание работ

Данный подход призван устранить основной недостаток классических подходов к выстраиванию последовательных процессов разработки и производства изделий – когда мы вынуждены дожидаться окончания предыдущего этапа разработки, не имея возможности начать следующий этап. В конечном счете, это увеличивает время вывода изделия на рынок (time-to-market) и снижает конкурентоспособность предприятия.

Чтобы устранить этот недостаток, мы должны выстраивать бизнес-процессы с параллельной рассылкой заданий и с обязательными этапами сведения частей выполненных работ в единое целое (документ, часть изделия и т.п.). Такое распараллеливание работ должно управляться, автоматизироваться и настраиваться в рамках системы управления бизнес-процессами (Business-process EDM, EDMS). Зачастую функциональность управления бизнес-процессами присутствует также в PDM- и EDM-системах (Система электронного документооборота (Electronic Document Management), СЭД, EDM).

Система организует параллельную выдачу заданий исполнителям, может быть установлено время исполнения заданий, благодаря чему система будет сигнализировать о факте просрочки.

Преимуществом подобных систем также является возможность в любой момент проконтролировать состояние процесса: кто исполняет этап процесса, сколько времени прошло с момента начала выполнения, как долго исполнялся тот или иной этап, комментарии исполнителей и другие необходимые сведения.

Смещение циклов доработок изделия на начальные стадии ЖЦ осуществляется за счет:

- использования концепции модельно-ориентированного проектирования (см. раздел 2.2.3.3);
- использования PDM-системы для обеспечения раннего доступа всех вовлеченных пользователей к материалам проекта;
- построения цифровых фабрик с использованием технологий цифрового проектирования изделий (см. главу 1).

Внедрение новых технологий производства и, в частности, аддитивных технологий позволяет:

- перейти от массового производства к массовой кастомизации (возможность удовлетворения запросов как можно большего числа индивидуальных заказчиков);
- сократить производственные издержки по причине отсутствия длинных технологических переделов;
- не содержать большого парка технологического оборудования;
- создавать изделия со сложной или даже невозможной в обычном производстве конфигурацией (бионический/генеративный дизайн);
- исключить использование технологической оснастки;
- повысить гибкость производства (отсутствует необходимость переналадки оборудования под новое изделие, достаточно загрузить новую 3D-модель);
- полностью автоматизировать процесс производства (весь производственный процесс проходит в автоматическом режиме без дополнительных технологических операций со стороны оператора);
- децентрализовать производство и организовать дистанционное управление (для запуска производства нет необходимости в личном присутствии оператора, можно удаленно отправить 3D-модель по Сети интернет, а затем лишь забирать готовые партии изделий);
- значительно уменьшить объем отходов;
- влиять на качество получаемых изделий за счет улучшения качества используемых материалов (дисперсность и т.д.).

Выстраивание единой цифровой шины производства с обратными связями

В концепции единой цифровой шины код управляющих программ генерируется на основании ЭМИ и в автоматическом режиме поступает на производство, загружаясь в соответствующее производственное оборудование.

В то же время информация о состоянии станочного оборудования, режимах обработки деталей, характеристиках обработанных партий и т.д. в режиме онлайн поступает на рабочие места технологов, мастеров, начальников цехов – что позволяет осуществлять управляющие воздействия на оборудование, оптимизируя производственный процесс. Данная технология носит название «*цикл обратной связи*» – **closed loop feedback** 33.

Переход на прогрессивные модели управления ЖЦ изделий

На данный момент прогрессивными моделями управления ЖЦ считаются **V-модель** (рис. *2.8*) и **спиральная модель** (***Ошибка! Неизвестный аргумент ключа.***).

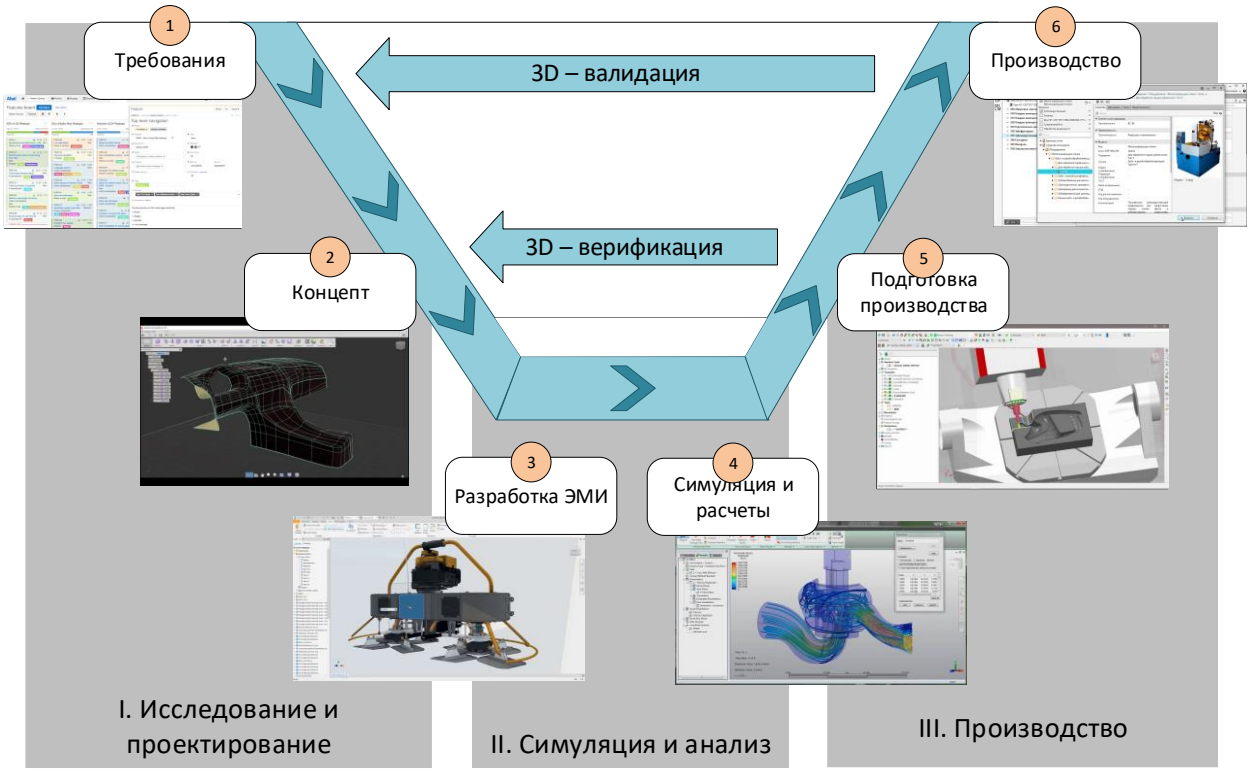


Рис. 2.8. Схема V-модели управления ЖЦ производства изделия (Источник: ICED17)

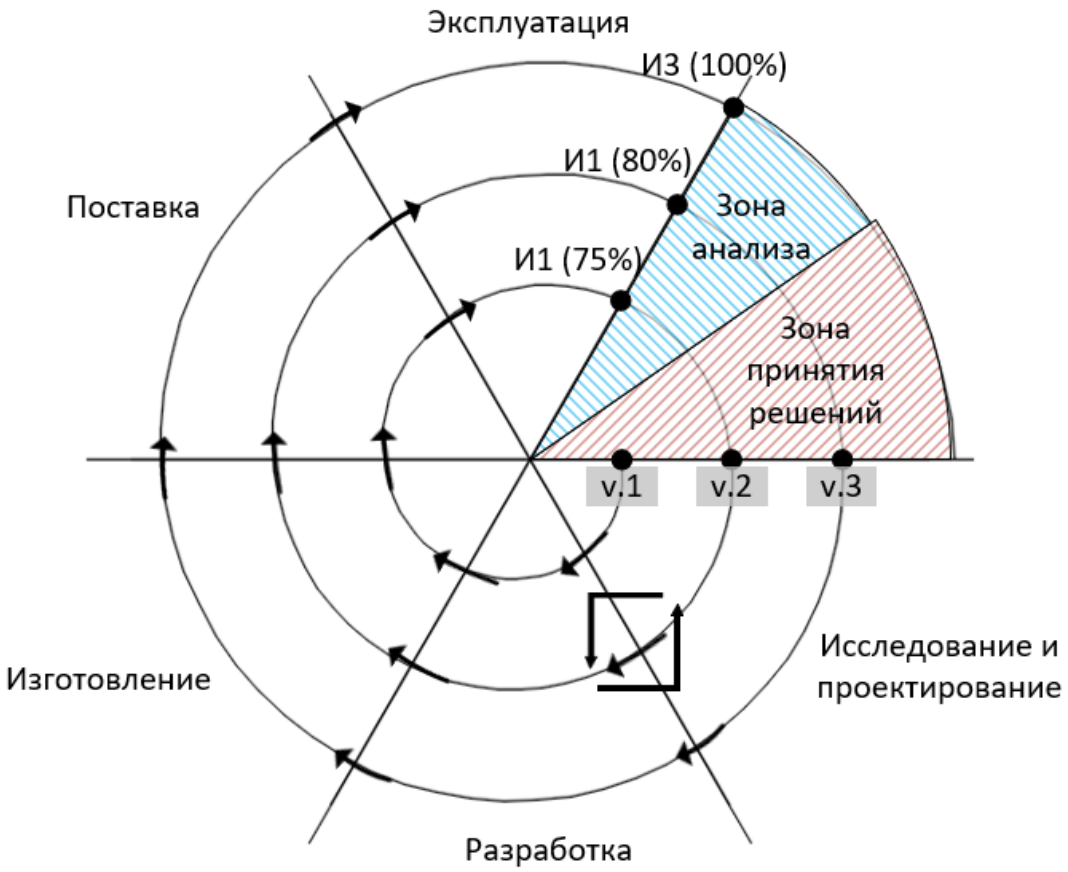


Рис. 2.9. Спиральная МЖЦ с ранним выпуском прототипов на рынок

Плюсами прогрессивных моделей управления ЖЦ являются:

- наличие действий по анализу рисков, что обеспечивает их сокращение и заблаговременное определение непреодолимых рисков;
- обеспечение разбиения большого потенциального объема работ по выполнению проекта на небольшие части;
- первоочередность реализации решающих функций с высокой степенью риска, что позволяет при необходимости остановить работы над проектом на ранних циклах модели и уменьшить расходы;
- возможность гибкого проектирования, основанная на преимуществах каскадной модели при одновременном разрешении итераций;
- реализация связи с пользователем с высокой частотой и на ранних этапах модели, что обеспечивает создание нужного продукта высокого качества;
- возможность оценки продукта пользователем на ранних этапах – благодаря использованию в жизненном цикле разработки ускоренного прототипирования и выпуска на рынок изделий, закрывающих требования ТЗ не на 100% (циклы V.1…V.n);
- предоставленная потребителям возможность принимать участие в планировании, анализе рисков, проектировании, разработке, выполнении оценочных действий;
- возможность регулярной оценки совокупных затрат, что в результате приводит к их общему сокращению.

Примеры организации процессов в виде диаграмм нотации BPM приведены на рис. 2.10, рис. 2.13, рис. 2.14, рис. 2.17, рис. 2.18 и рис. 2.19. Иллюстрации являются декомпозицией основного процесса «Постановка изделия на производство».

Показаны следующие процессы:

- А.1. Постановка изделия на производство;
- А.1.2. Согласование и утверждение ТЗ;
- А.1.2.1. Формирование версии ТЗ на стороне Исполнителя;
- А.1.3. Разработка концепта ЭМИ/электронного состава изделия (ЭСИ)/схемы деления изделия (СДИ);
- А.1.3.1. Разработка предварительной ЭСИ (СДИ);
- А.1.4. Разработка конструкторско-технологического решения (КТР/ЭМИ).

Процесс «Постановка изделия на производство»

Это процесс верхнего уровня, в нем показаны этапы конструкторско-технологической подготовки (КТПП) в окружении более общего процесса – системы разработки и постановки продукции на производство (СРПП, ГОСТ Р 15.000-2016). Непосредственно к КТПП относятся этапы:

- разработка концепта ЭМИ/ЭСИ (СДИ);
- разработка ЭМИ (КТР)/Испытания ЭМИ/Расчеты;
- подготовка и планирование производства.

Показано распределение ролей участников СРПП по структурным подразделениям Заказчика и Исполнителя проектно-конструкторских работ.

Входные параметры для процесса предоставляет документ «Техническое задание» от Заказчика, выходным параметром является готовое изделие в виде поставляемого Заказчику комплекта поставки.

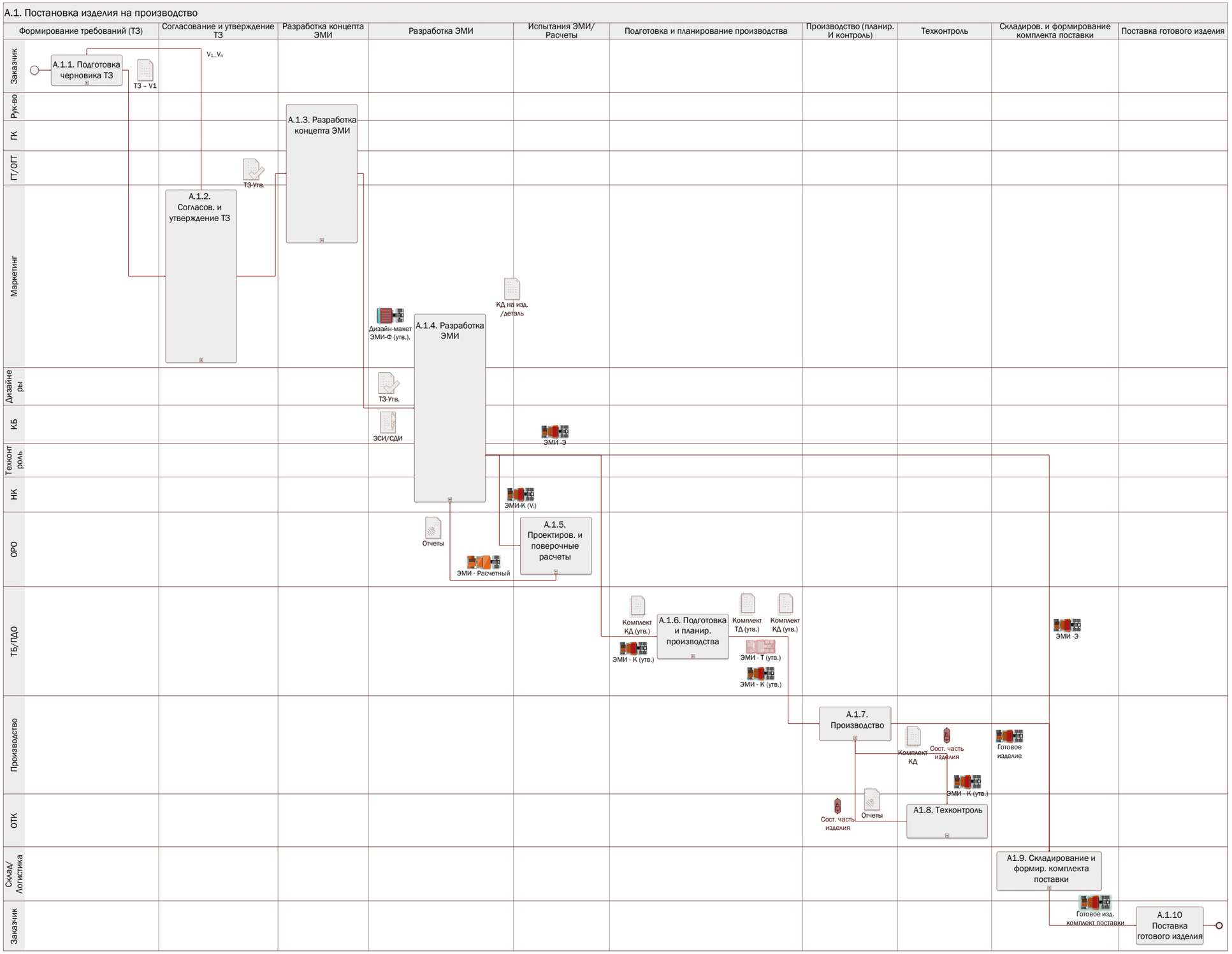


Рис. 2.10. Процесс «Постановка изделия на производство»

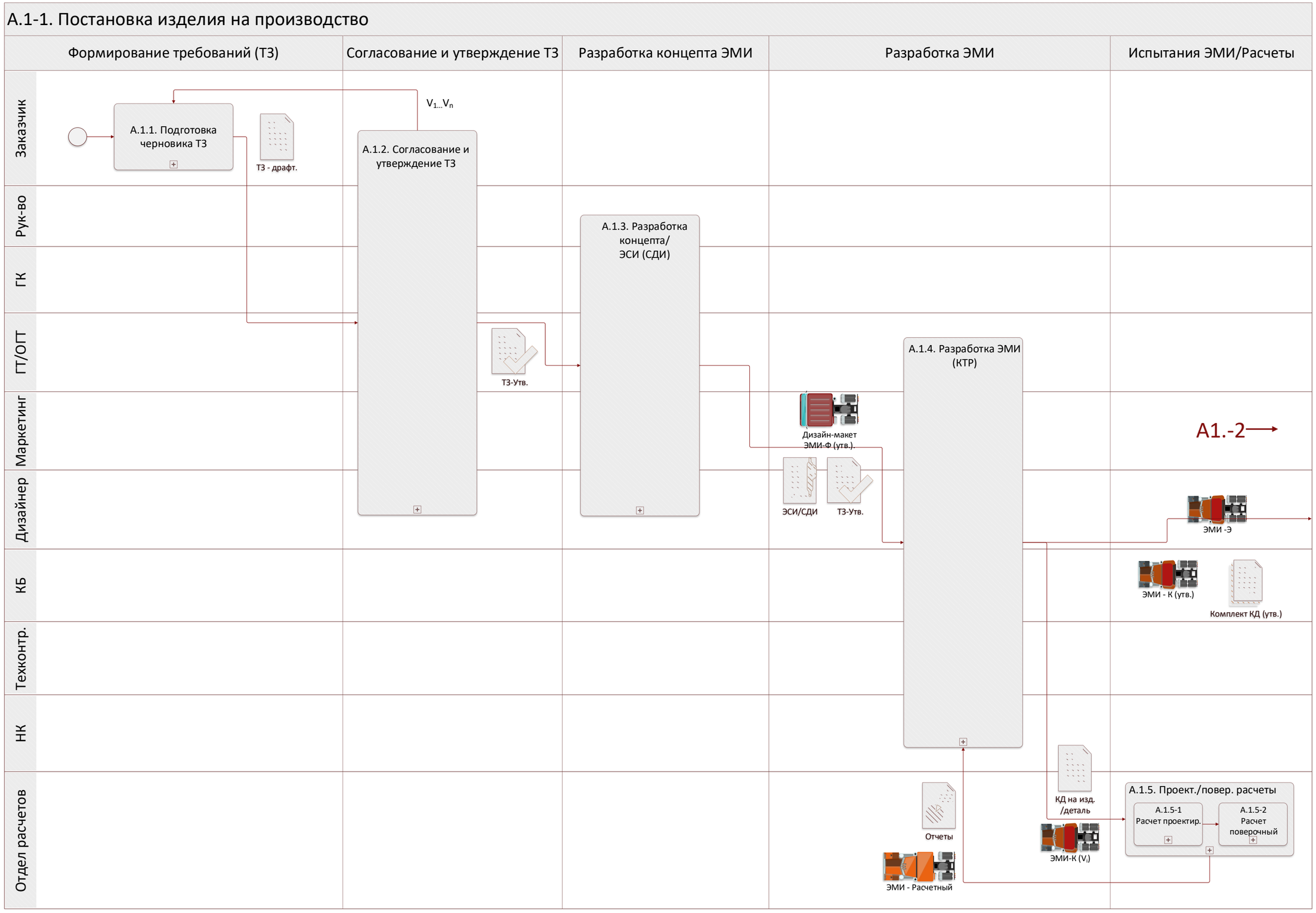


Рис. 2.11. Фрагмент 1 схемы А.1

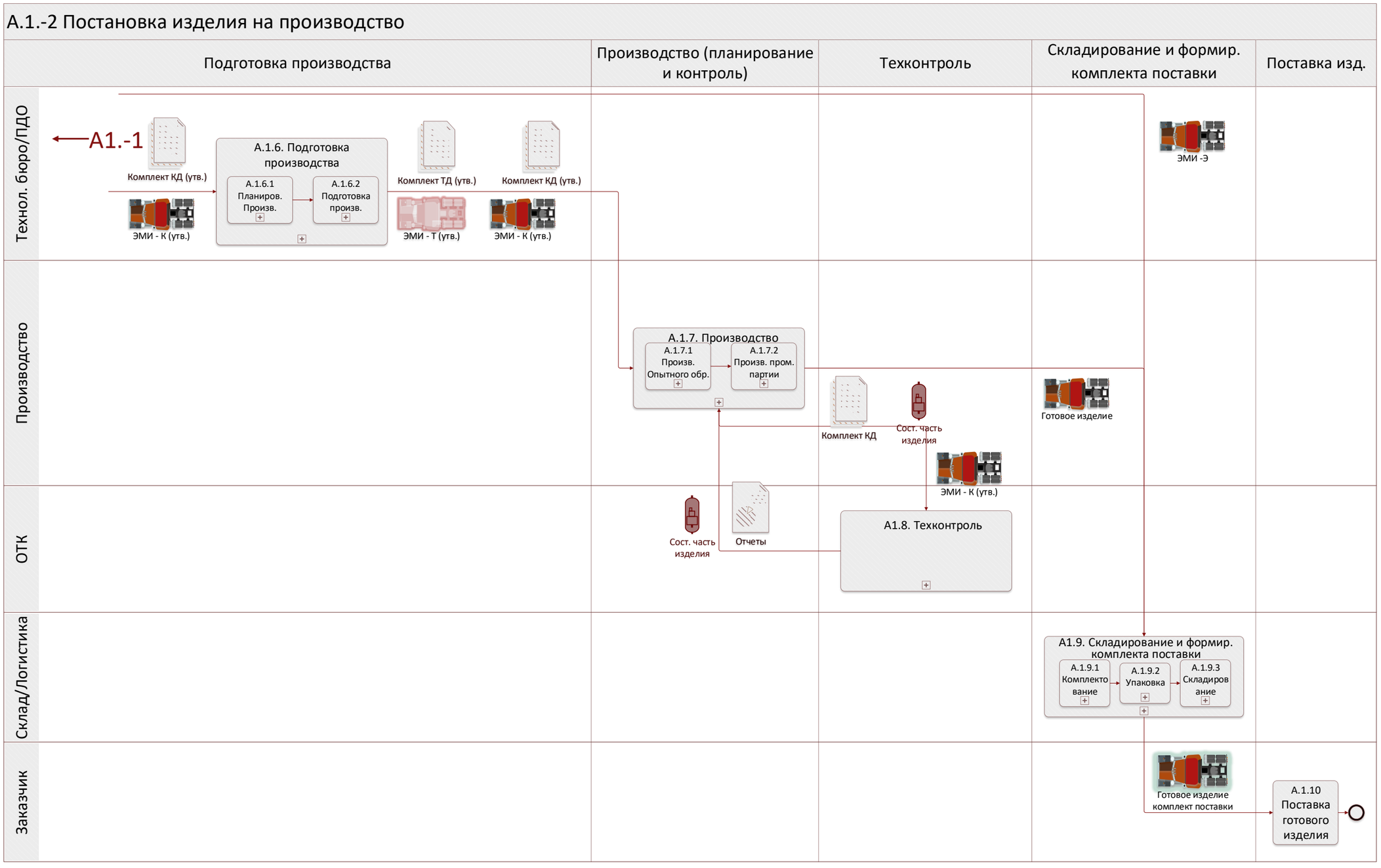


Рис. 2.12. Фрагмент 2 схемы А.1

Процесс «Согласование и утверждение ТЗ»

Показана итерация версий (n) документа в PDM-системе. Процесс состоит из двух этапов:

- разработка и согласование;
- утверждение.

Отражено (Рис. 2.13) распределение ролей участников процесса по структурным подразделениям Заказчика и Исполнителя проектно-конструкторских работ. Также представлены циклические итерации согласования с генерацией новых версий документа/документов.

В силу того, что доступ к документу обеспечен всем участникам процесса согласования, а также благодаря механизму контроля версионности сокращается время на передачу информации между участниками процесса и уменьшается вероятность ошибок, вызванных использованием устаревшей или некорректной информации.

Входные параметры для процесса предоставляет версия документа «Техническое задание» от Заказчика, выходным параметром является утвержденный документ ТЗ. Статус утверждения при этом устанавливается для соответствующего информационного объекта – технического задания в PDM-системе.

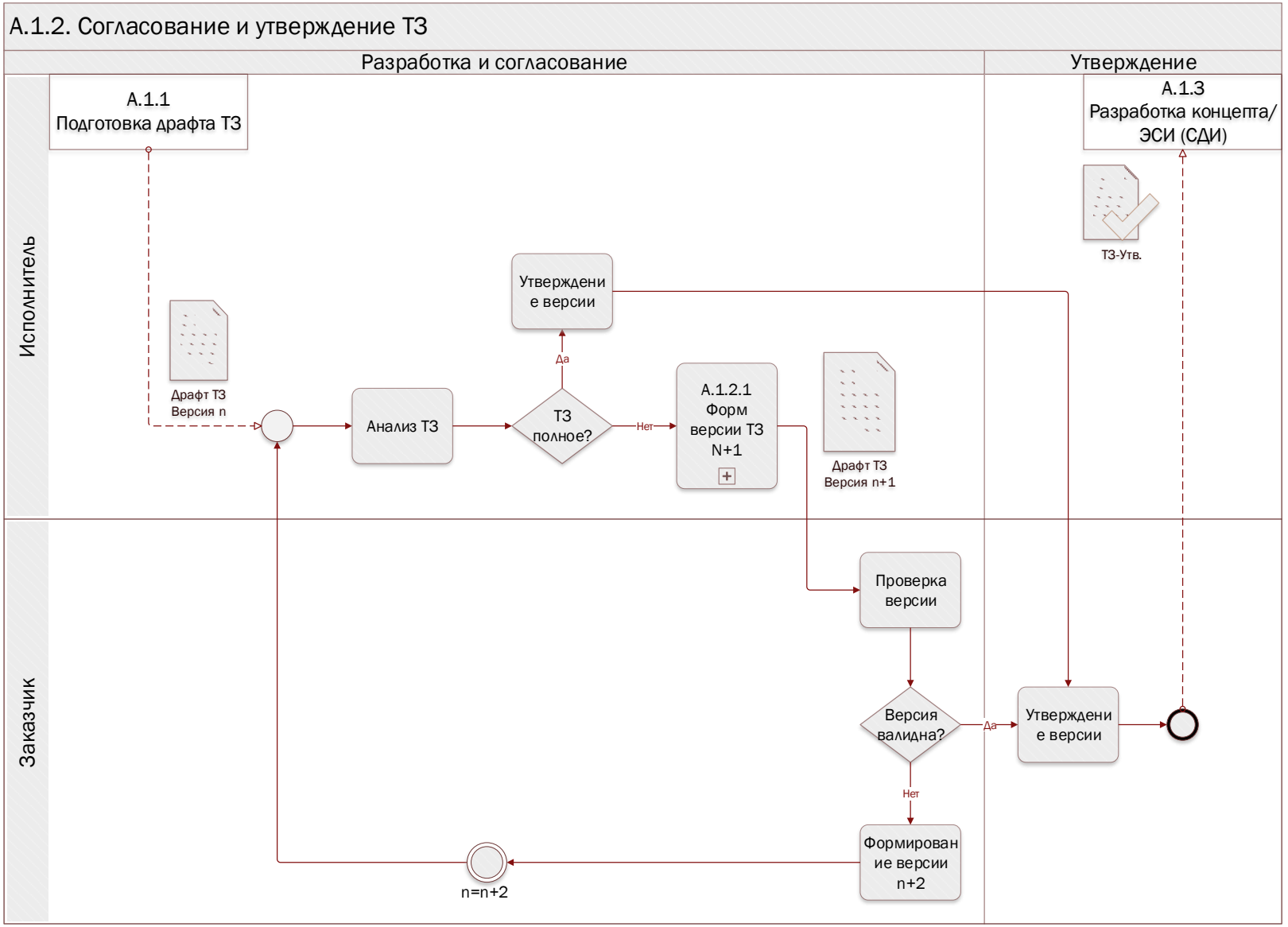


Рис. 2.13. Процесс «Согласование и утверждение ТЗ»

Бизнес-процесс «Формирование версии ТЗ на стороне Исполнителя»

Данный процесс является вложенным в процесс «Согласование и утверждение ТЗ» и повторяется некоторое количество раз, пока документ/документы ТЗ не будут утверждены.

Процесс состоит из следующих этапов:

- правка или утверждение ТЗ по частям в СП (структурных подразделениях) Исполнителя;
- сведение версии ТЗ (в один документ/комплект);
- валидация сведенного документа/утверждение финальной версии.

Показано (рис. 2.14-Рис. 2.16) распределение ролей участников процесса по структурным подразделениям Заказчика и Исполнителя проектно-конструкторских работ. Также представлены циклические итерации согласования с генерацией новых версий документа/документов.

В силу того, что доступ к документу обеспечен всем участникам процесса согласования, а также благодаря механизму контроля версионности сокращается время на передачу информации между участниками процесса и уменьшается вероятность ошибок, вызванных использованием устаревшей или некорректной информации.

Входные параметры для процесса предоставляет версия документа «Техническое задание» от Заказчика, выходным параметром является утвержденный документ ТЗ. Статус утверждения при этом устанавливается для соответствующего информационного объекта – технического задания в PDM-системе.

Показано распараллеливание процесса согласования версии ТЗ в структурных подразделениях Исполнителя. Особо важны этапы валидации и сведения версий ТЗ в единый документ, что предъявляет высокие требования к квалификации исполнителя этих этапов. Представлена итерация версий (n) документа в PDM-системе.

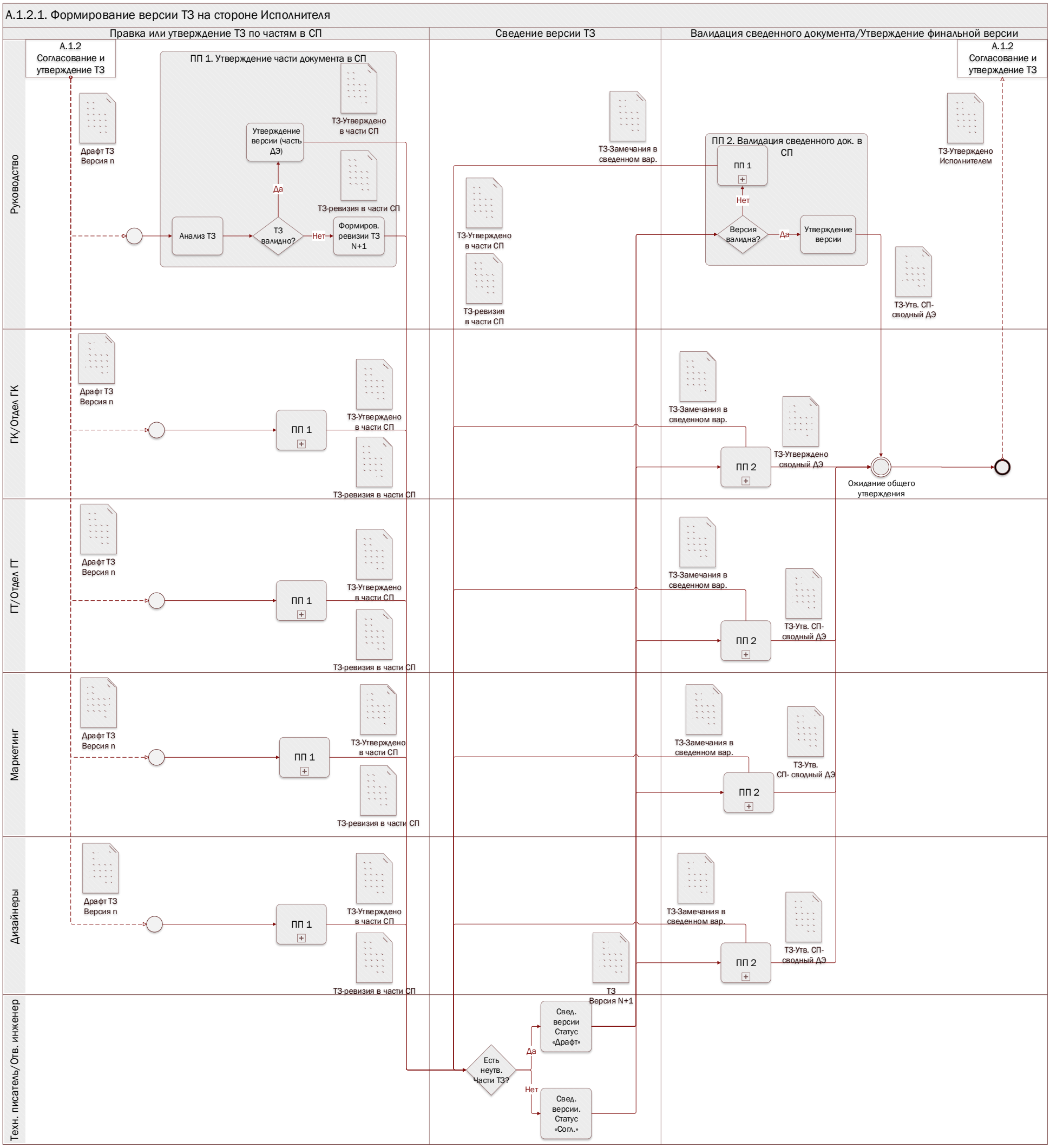


Рис. 2.14. Процесс «Формирование версии ТЗ на стороне Исполнителя»

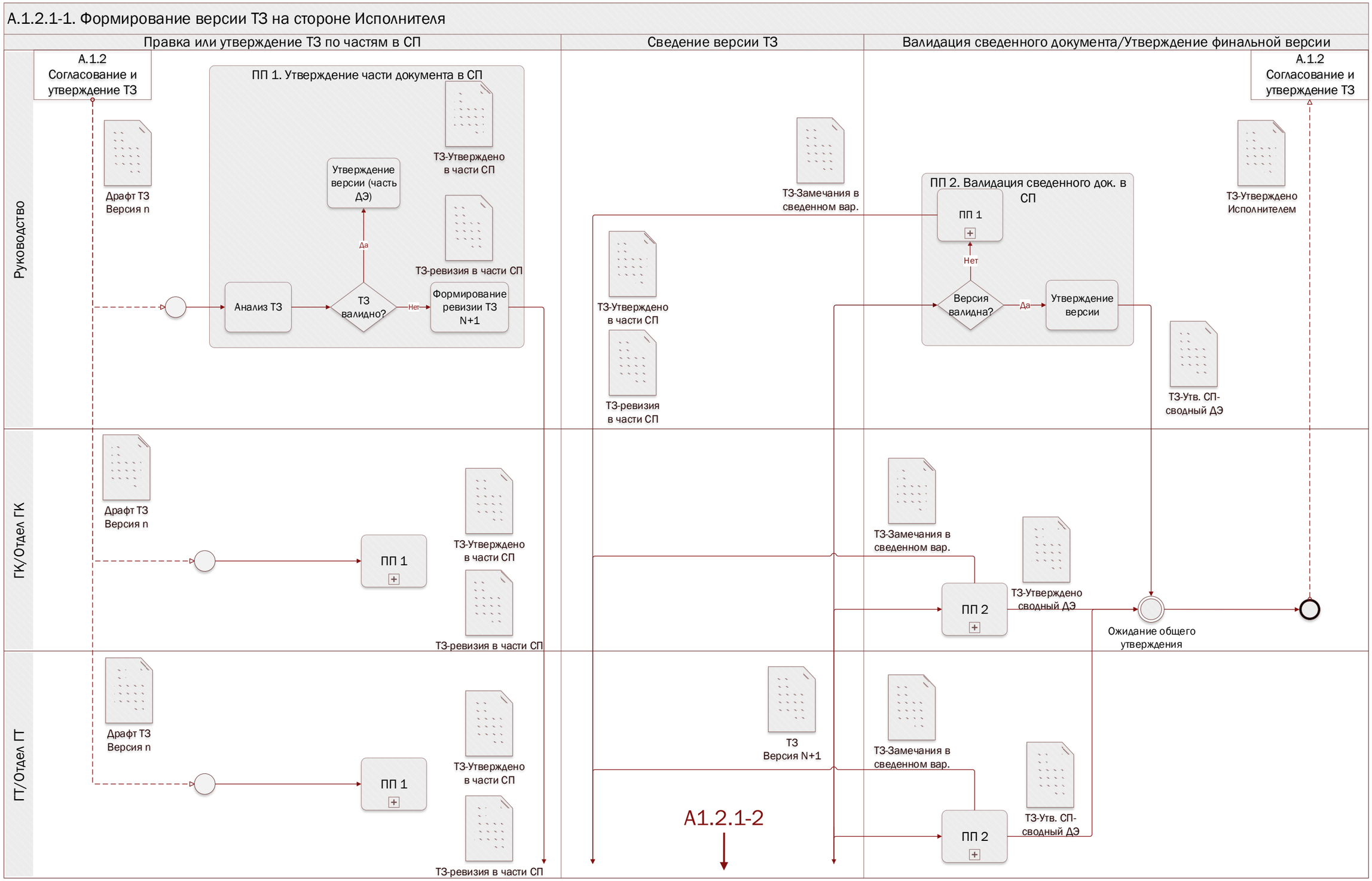


Рис. 2.15. Фрагмент 1 схемы А.1.2.1

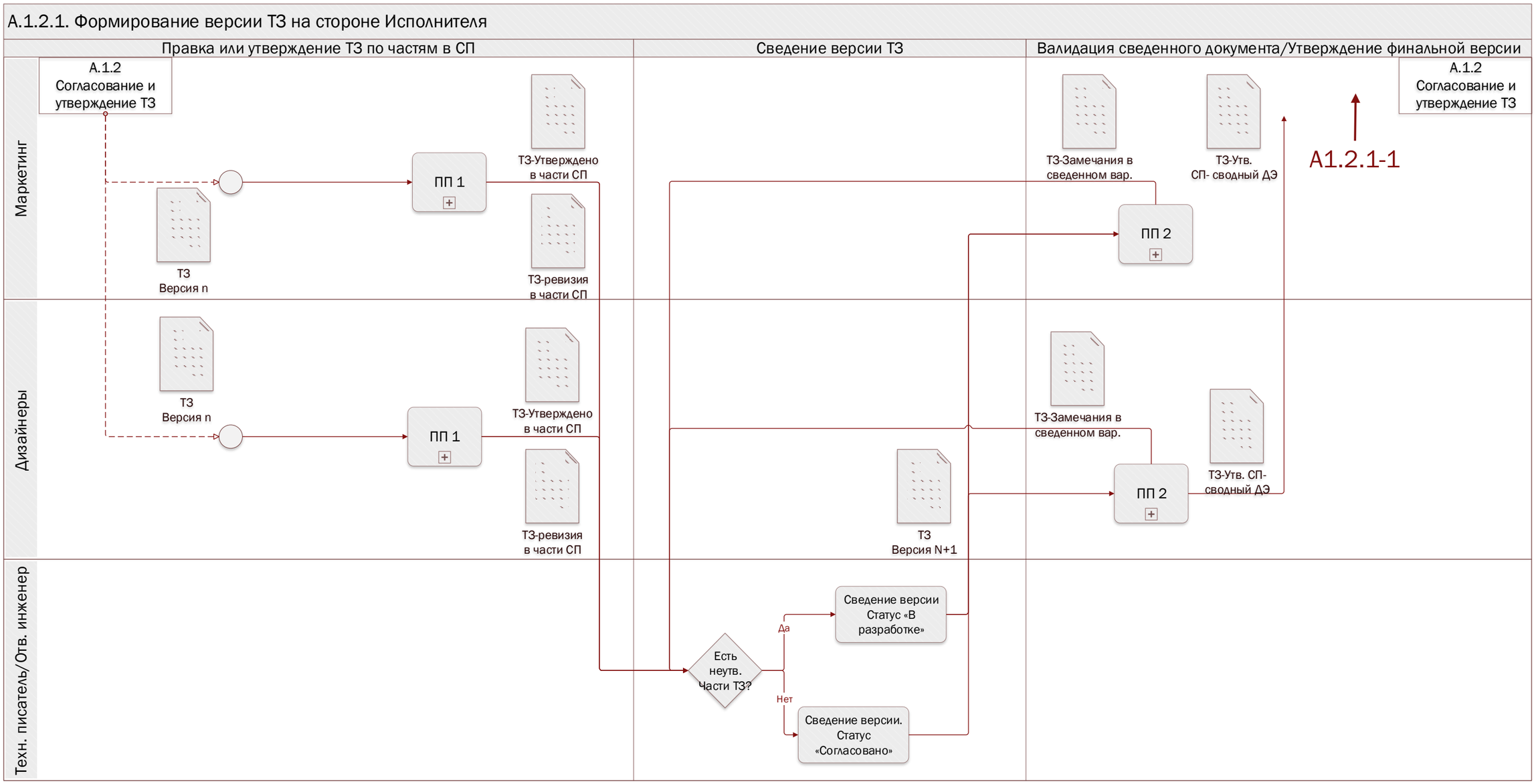


Рис. 2.16. Фрагмент 2 схемы А.1.2.1

Процесс «Разработка концепта ЭМИ/ЭСИ (Структуры деления изделия)»

Процесс состоит из следующих этапов:

- сбор и утверждение предварительных требований к электронному макету изделия (ЭМИ);
- генерация версии ЭМИ;
- валидация сведенного документа/утверждение финальной версии;
- согласование версии ЭМИ;
- утверждение ЭМИ;
- разработка предварительной электронной структуры изделия (структуры деления изделия).

Показано (рис. 2.17) распределение ролей участников процесса по структурным подразделениям Заказчика и Исполнителя проектно-конструкторских работ. Также представлены циклические итерации согласования с генерацией новых версий документа/документов и информационных моделей.

В силу того, что доступ к документу обеспечен всем участникам процесса согласования, а также благодаря механизму контроля версионности сокращается время на передачу информации между участниками процесса и уменьшается вероятность ошибок, вызванных использованием устаревшей или некорректной информации.

Входные параметры для процесса предоставляет утвержденная версия документа «Техническое задание» от Заказчика, выходным параметром является электронный макет изделия (**Функциональный ЭМИ**) стадии «Эскизный проект». Статус утверждения при этом устанавливается для соответствующих информационных объектов – ЭМИ и ЭСИ в PDM-системе.

Показано распараллеливание процесса согласования информационных объектов (ИО) в структурных подразделениях Исполнителя. Особо важны этапы валидации и сведения версий ИО в единый документ (модель), что предъявляет высокие требования к квалификации исполнителя этих этапов. Представлена итерация версий (n) документа в PDM-системе.

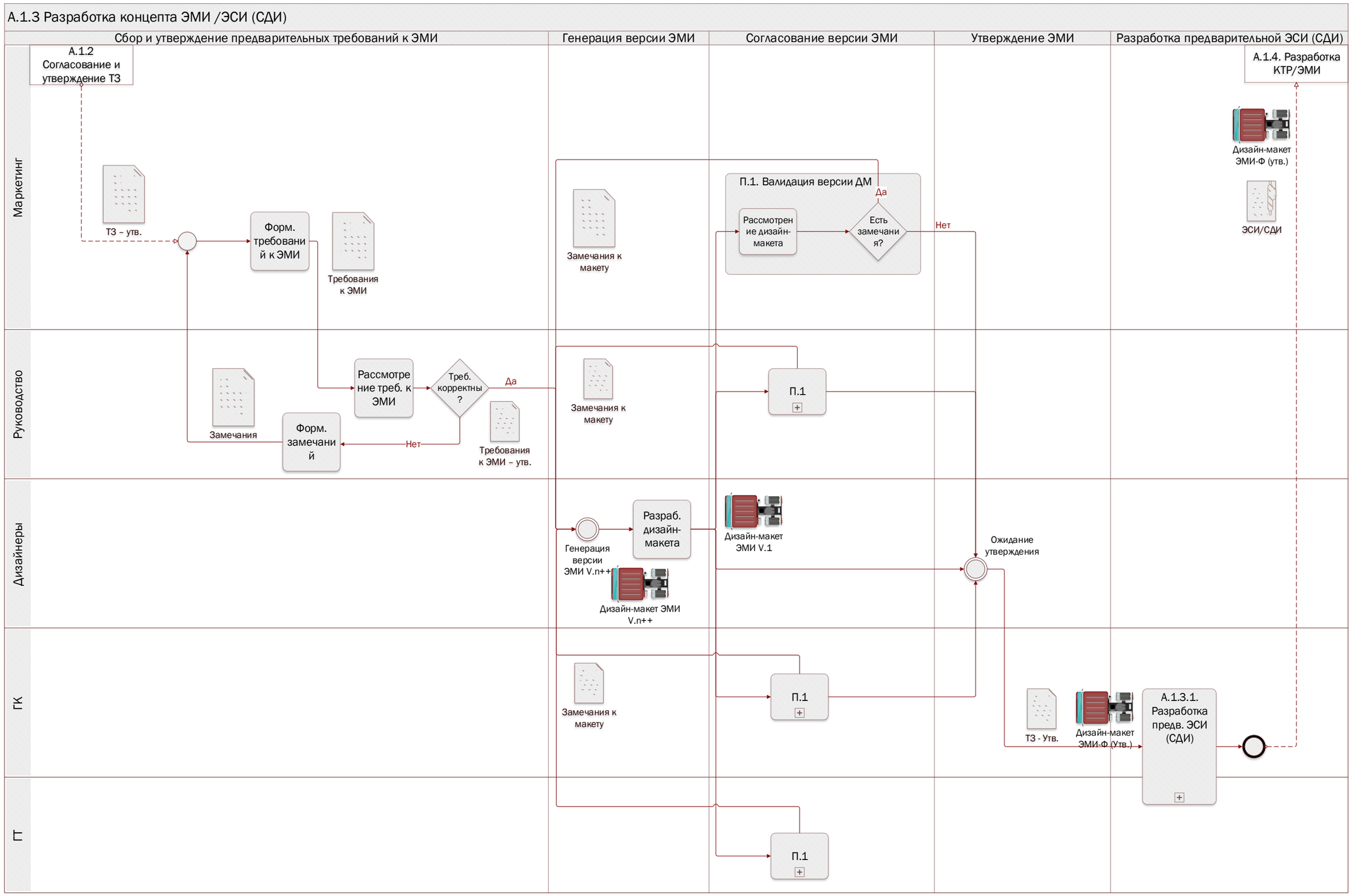


Рис. 2.17. Процесс «Разработка концепта ЭМИ /ЭСИ (СДИ)»

Процесс «Разработка предварительной ЭСИ (СДИ)»

Данный процесс является вложенным в процесс «Разработка концепта ЭМИ/ЭСИ (СДИ)».

Процесс состоит из следующих этапов:

- разработка ЭСИ;
- проверка и утверждение.

Отражено (рис. 2.23) распределение ролей участников процесса по структурным подразделениям Исполнителя проектно-конструкторских работ. Также представлены циклические итерации согласования с генерацией новых версий документа/документов и информационных моделей.

В силу того, что доступ к документу обеспечен всем участникам процесса согласования, а также благодаря механизму контроля версионности сокращается время на передачу информации между участниками процесса и уменьшается вероятность ошибок, вызванных использованием устаревшей или некорректной информации.

Входные параметры для процесса предоставляет утвержденная версия документа «Техническое задание», выходным параметром является информационный объект ЭСИ (СДИ). Статус утверждения при этом устанавливается для соответствующего информационного объекта – ЭСИ в PDM-системе.

Показано распараллеливание процесса согласования информационных объектов (ИО) в структурных подразделениях Исполнителя. Особо важны этапы валидации и сведения версий ИО в единый документ (модель), что предъявляет высокие требования к квалификации исполнителя этих этапов. Представлена итерация версий (n) документа в PDM-системе.

Рис. 2.18. Процесс «Разработка предварительной ЭСИ (СДИ)»

Процесс «Разработка КТР/ЭМИ»

Процесс состоит из следующих этапов:

- разработка плана и ТЗ (внутреннее ТЗ на ПКР);
- разработка ЭМИ/ЭСИ;
- генерация комплекта КТД/технологический контроль;
- нормоконтроль комплекта КТД;
- выпуск комплекта КТД/подлинников.

Отражено (рис. 2.19-Рис. 2.21) распределение ролей участников процесса по структурным подразделениям Исполнителя проектно-конструкторских работ. Также представлены циклические итерации согласования с генерацией новых версий документа/документов и информационных моделей.

В силу того, что доступ к документу обеспечен всем участникам процесса согласования, а также благодаря механизму контроля версионности сокращается время на передачу информации между участниками процесса и уменьшается вероятность ошибок, вызванных использованием устаревшей или некорректной информации.

Входными параметрами для процесса являются утвержденная информационная модель ЭМИ-Ф (стадия «Эскизный проект»), техническое задание от Заказчика (статус «Утверждено»), информационный объект ЭСИ (СДИ). Выходные параметры – комплект КД на часть изделия, деталь, изделие целиком, комплекс, а также информационная модель ЭМИ-Ф (стадия «Разработка»). Статус утверждения при этом устанавливается для соответствующих информационных объектов в PDM-системе.

Показано распараллеливание процесса согласования информационных объектов (ИО) в структурных подразделениях Исполнителя. Особо важны этапы валидации и сведения версий ИО в единый документ (модель), что предъявляет высокие требования к квалификации исполнителя этих этапов. Представлена итерация версий (n) документа в PDM-системе.

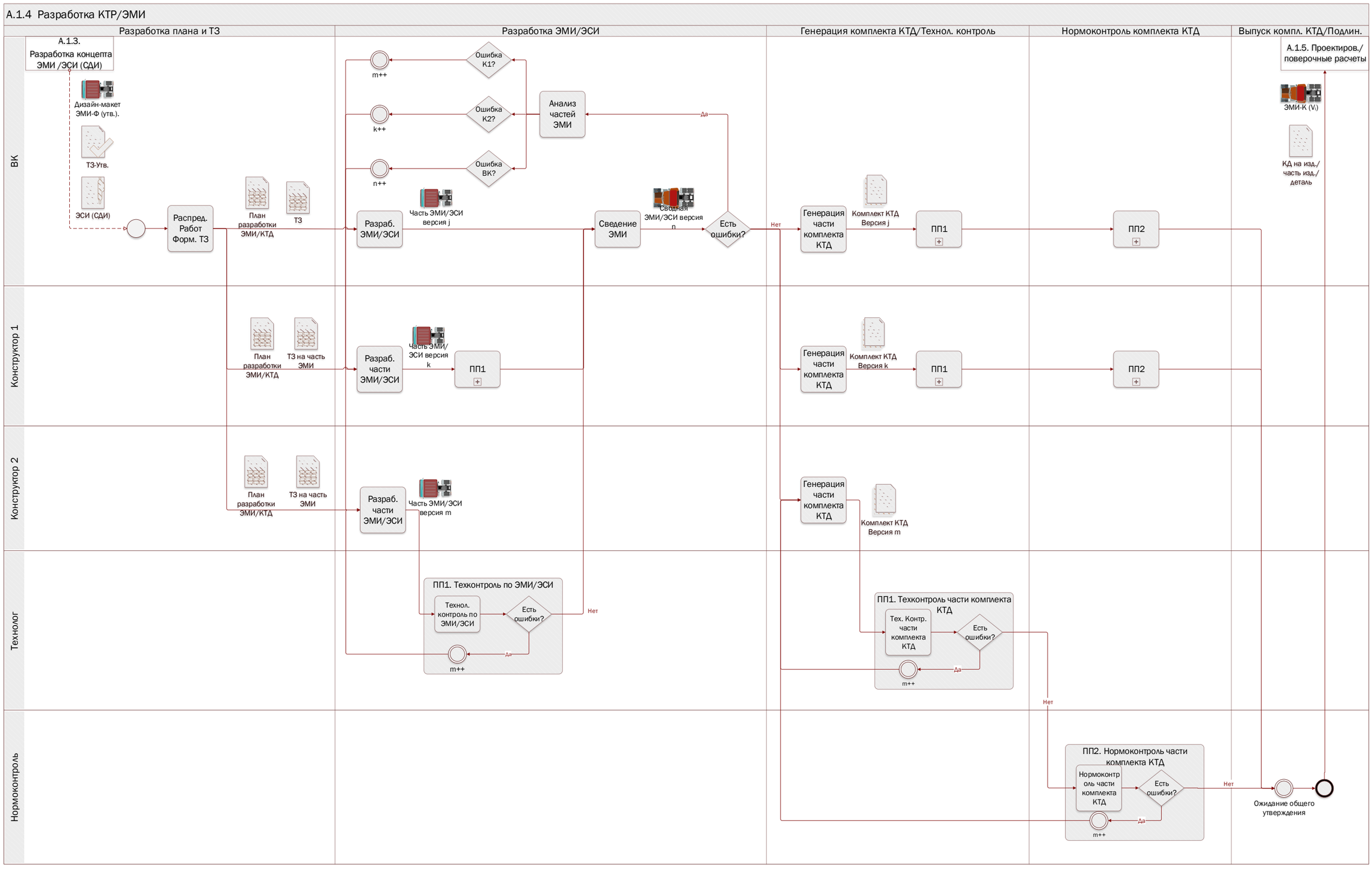


Рис. 2.19. Процесс «Разработка КТР/ЭМИ»

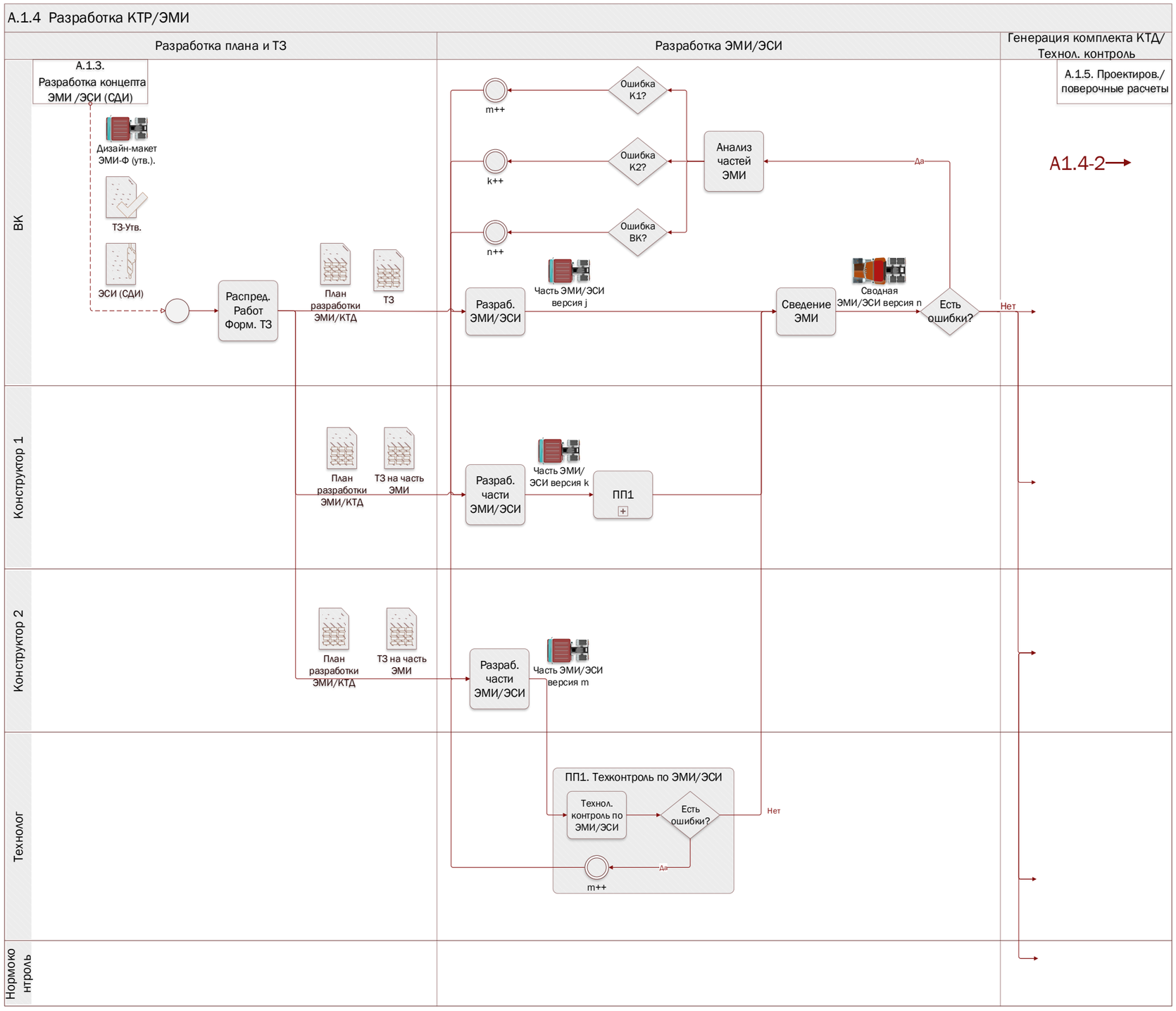


Рис. 2.20. Фрагмент 1 схемы А 1.4

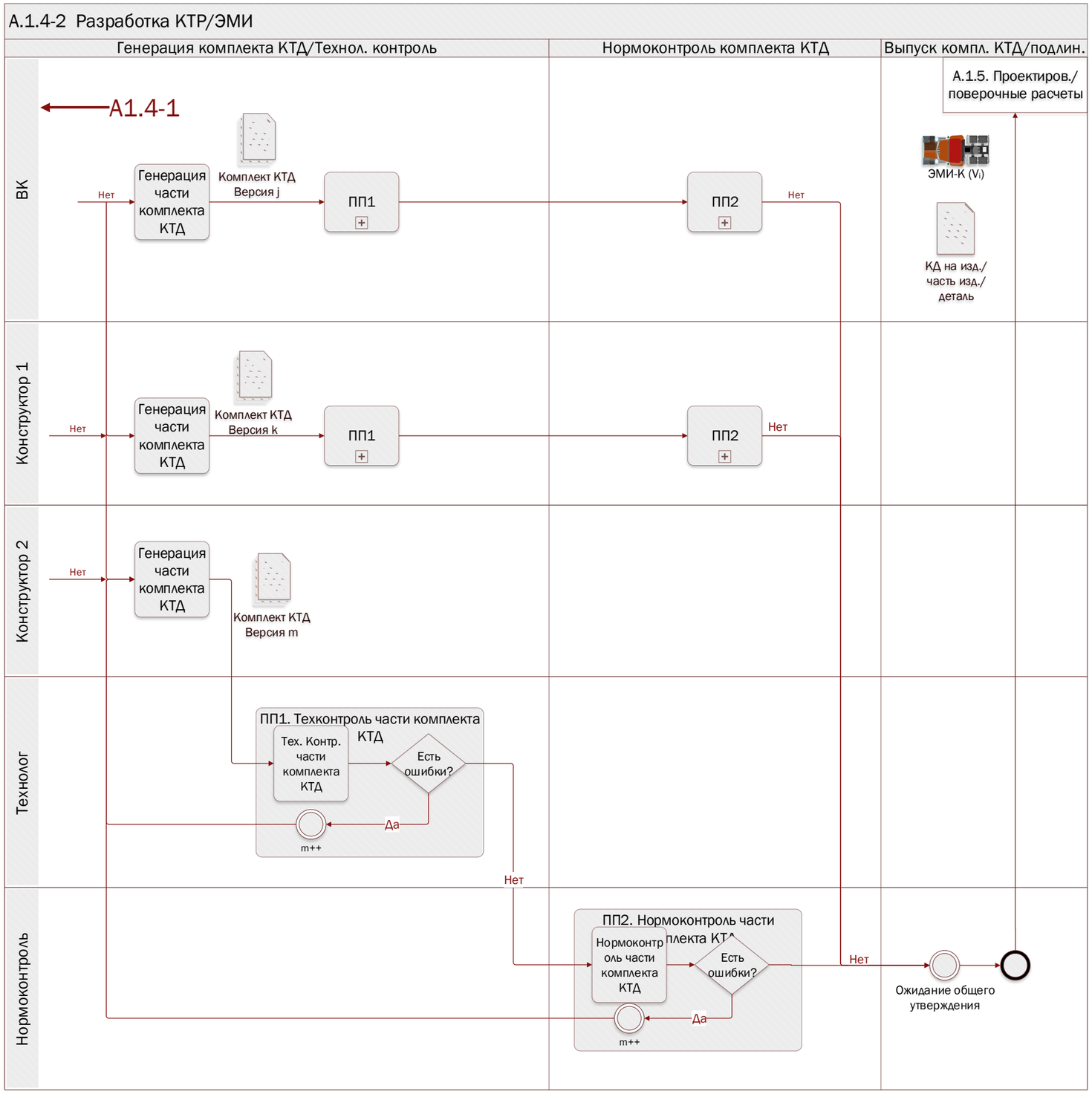


Рис. 2.21. Фрагмент 2 схемы А 1.4

2.2.3.1. Роль PDM-системы в организации процессов

Как было показано выше, PDM-система служит для организации **локальной сервисной шины** обмена данными между прикладными АС. Также можно говорить о том, что на базе PDM-системы организуется **единая информационная среда** (ЕИС) – опять же с учетом того, что эта среда носит локальный характер.

Основные возможности PDM-системы:

- поддержка версионности файлов;
- сравнение версий файлов;
- поиск документов, в том числе по сложным поисковым запросам;
- сохранение поисковых запросов в виде выборок;
- управление безопасностью хранимых данных на основе ролевой модели доступа;
- автоматическое присвоение наименований и обозначений документам в Системе;
- управление ЖЦ информационных объектов, хранящихся в Системе;
- инструменты настройки рабочих процессов (workflow);
- системная архитектура с поддержкой нескольких серверов данных (метаданных и файлового хранилища) и с возможностью репликации между серверами;
- возможность подписки на изменения данных в информационных объектах;
- автоматическое получение состава изделия по данным из САПР;
- генерация настраиваемых спецификаций изделий по данным из САПР;
- индикация состояния ЖЦ информационных объектов в Системе;
- возможность просмотра данных пользователей, не работающих в САПР;
- возможность формировать ссылочные зависимости между различными информационными объектами в хранилище;
- автоматическое копирование ссылочных документов из САПР и других АС с воссозданием ссылочной модели в хранилище PDM-систем;
- инструменты для копирования проектов с учетом ссылочных зависимостей между документами в проекте;
- возможность формирования настраиваемых отчетов по данным в хранилище;
- интеграция с почтовыми клиентами;
- возможность предварительного просмотра 2D- и 3D-документов;
- инструменты нанесения пометок на документы;
- интеграция в интерфейс САПР-систем;
- регистрация событий (при помощи log-файлов);
- пакетная печать документов;
- поддержка работы с Active Directory;
- встроенный распространяемый API (SDK);
- взаимодействие с внешними АС посредством XML SOAP.

2.2.3.2. Электронный макет изделия в процессе разработки КД и ТД

Согласно ГОСТ 58301-2018, ЭМИ – это совокупность информационных наборов (ИН) разных видов, в том числе компьютерных моделей (КМ) изделия (его составных частей и, при необходимости, процессов, непосредственно связанных с изделием) в соответствии с ГОСТ 57412-2017. ЭМИ разрабатывают и сопровождают в АС УДИ (PDM-системе) с применением прикладных АС, интегрированных с АС УДИ.

Схематично некий обобщенный ЭМИ можно представить в виде объединения множеств (1…n) обобщенных ИН и КМ (рис. 2.22).

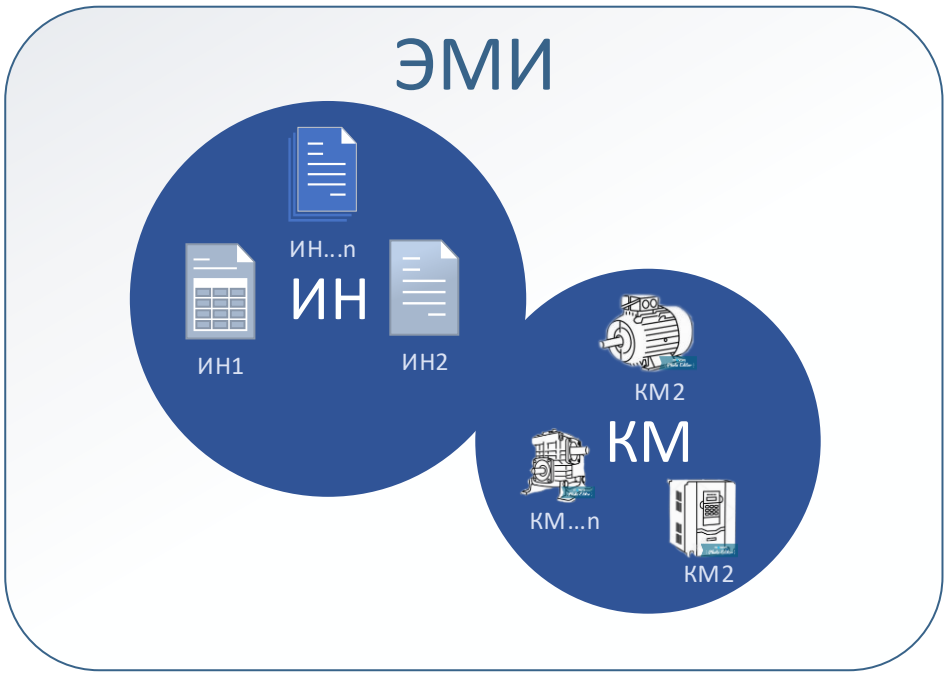


Рис. 2.22. Схема обобщенного ЭМИ

Набор компьютерных моделей, описывающих ЭМИ, может содержать КМ различных типов (ГОСТ 57412-2017). Например:

- **электронные геометрические модели**. Это могут быть 3D-модели, выполненные посредством САПР и сохраненные в PDM-систему;
- **структурные аналитические модели**. К таким моделям относится, например, ЭСИ, разработанный в САПР и сохраненный в PDM-систему. Следует заметить, что многие PDM-системы позволяют создавать и модифицировать ЭСИ непосредственно в самой PDM-системе;
- **конечно-элементные модели**. Например, модели сеток разбиения на конечные элементы.

Информационный набор (ГОСТ 58300-2018) представляет собой идентифицированную совокупность информационных объектов (ИО), содержащих сведения об изделии и отобранных с какой-либо целью или по какому-либо признаку (совокупности признаков). Само понятие информационного набора неотделимо от PDM-системы, так как ИН состоит из информационных объектов, а информационный объект (ГОСТ 58300-2018) является идентифицированной совокупностью данных в информационной системе.

Примерами ИН могут служить:

- **набор 2D-чертежей** составных частей изделия, полученных в САПР и сохраненных в PDM-системе;
- **текстовые документы**, описывающие изделие;
- **растровые изображения** изделия, полученные посредством рендеринга 3D-модели в прикладной АС.

ЭМИ является одним из возможных видов представления результатов проектно-конструкторских работ (или части результата) в электронной форме в соответствии с требованиями ГОСТ 58299-2018.

ЭМИ в общем случае содержит информацию, которая может описывать различные аспекты изделия с различных точек зрения. Например, часть информации, содержащейся в ЭМИ, может описывать аспекты поведения на различных этапах жизненного цикла продукции. С другой стороны, ЭМИ содержит информацию, которая характеризует изделие с точки зрения его изготовления и т.д. Это приводит к тому, что для одного и того же изделия в общем случае могут быть разработаны несколько ЭМИ различного назначения. В частности, ГОСТ 58301-2018 указывает следующие виды ЭМИ:

- конструкторский ЭМИ, ЭМИ-К;
- технологический ЭМИ, ЭМИ-Т;
- функциональный ЭМИ, ЭМИ-Ф;
- эксплуатационный ЭМИ, ЭМИ-Э.

В рамках КТПП для конкретного производства и конкретного заказчика могут быть получены ЭМИ и других видов. В этом случае состав и именования типов ЭМИ устанавливает разработчик ЭМИ. Хранение перечисленных выше типов ЭМИ осуществляется в PDM-системе.

В последующих разделах будет подробно рассмотрено создание компьютерных моделей, составляющих ЭМИ. Модели, в свою очередь, классифицируются по нескольким признакам. На рис. 2.23 показана часть классификации, принятая в ГОСТ 57412-2017: до электронных геометрических моделей (ЭГМИ), так как именно они являются основой информации, выходящей из САПР.

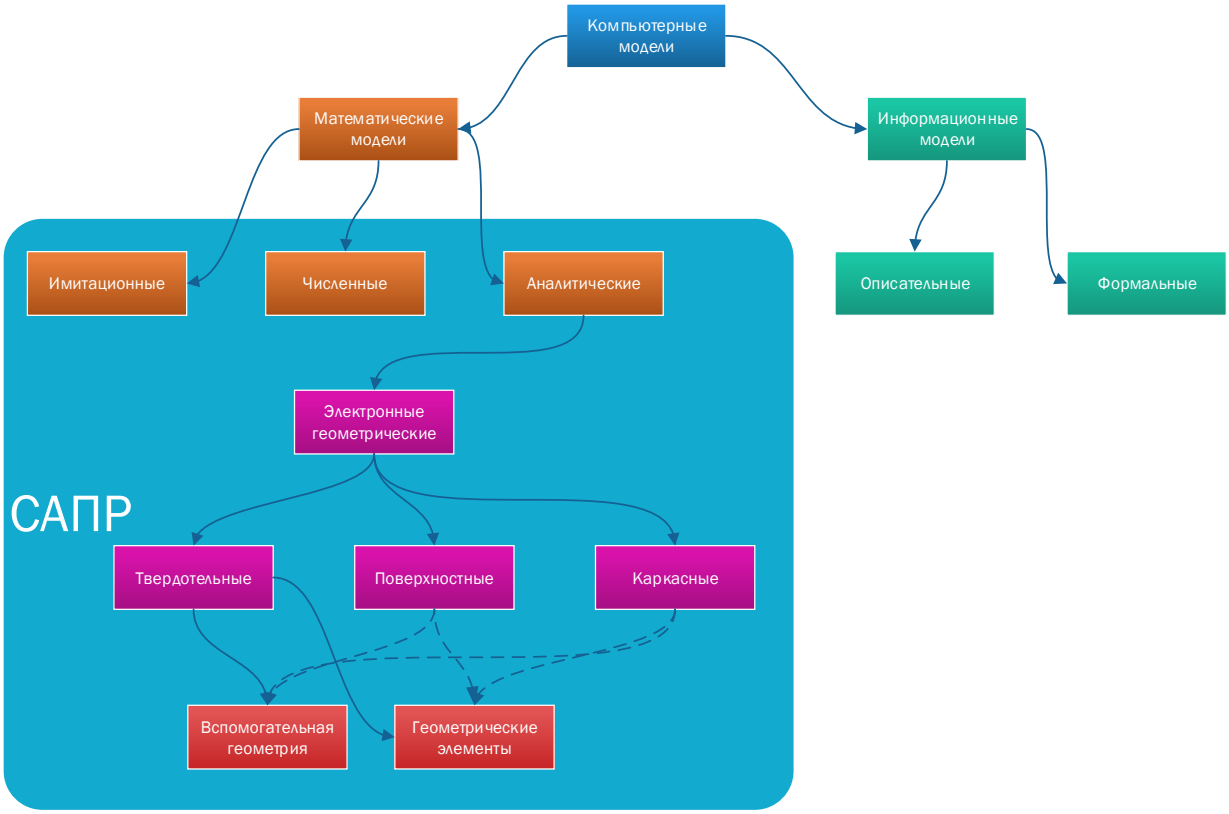


Рис. 2.23. Иерархия компьютерных моделей

2.2.3.3. Электронный макет изделия и цифровой двойник изделия

Анализируя как формальные определения, так и сами сущности понятий ЭМИ и цифрового двойника (ЦД), можно говорить о том, что ЭМИ различных видов (см. раздел 2.2.3.2) являются *неотъемлемыми составными частями* ЦД.

Эта теория находит подтверждение в трудах Центра НТИ СПбПУ за 2017 г. 11. На рис. 2.24 показано место ЭМИ различных видов как платформы для построения цифровых двойников.

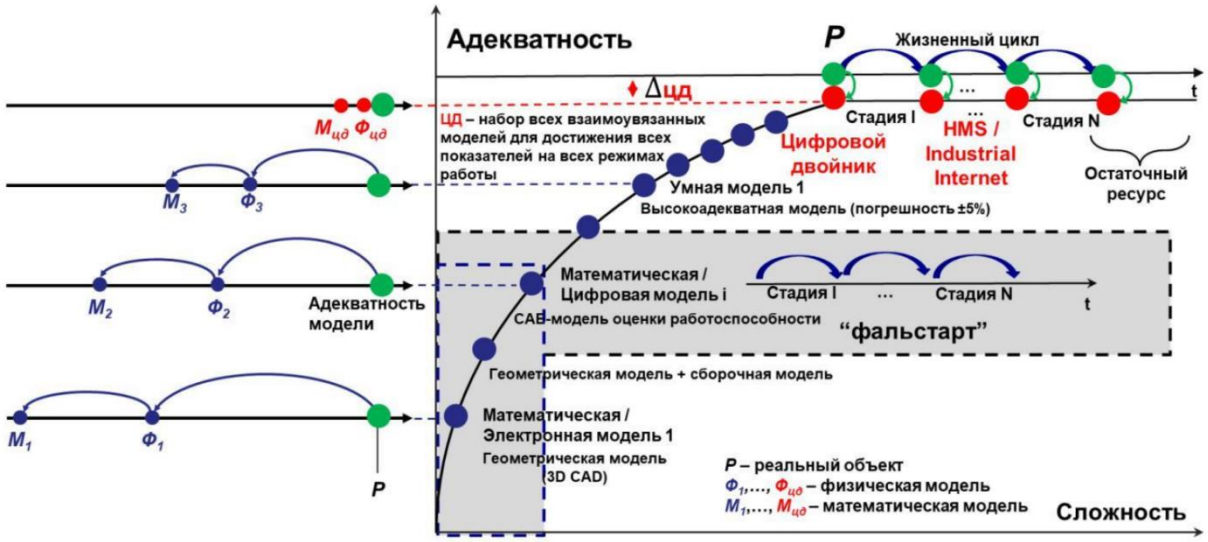


Рис. 2.24. Построение цифровых двойников (Источник: Центр НТИ СПбПУ)

Таким образом, можно говорить о том, что ЭМИ, загруженный в соответствующую *цифровую платформу* и снабженный расширенным набором данных, собранных на всех этапах ЖЦ изделия, поведение которого на всех возможных режимах работы подтверждено экспериментальными данными с высокой точностью, становится ЦД изделия.

2.2.3.4. Модельно-ориентированное проектирование

Модельно-ориентированное проектирование (МОП) – это создание аннотированной модели и связанных с ней элементов данных, определяющих изделие, которые могут эффективно использоваться без чертежа. Модель является источником утвержденных данных, обеспечивающим выполнение всех проектных мероприятий. Она используется участниками на последующих этапах, поставщиками и всеми структурами предприятия.

Современные наукоемкие изделия имеют настолько сложные модели, что воспринять всю информацию о них только по 2D-чертежам представляется очень сложной задачей. К примеру, линия разъема в пресс-форме сложного корпуса электронного прибора может быть задокументирована на нескольких листах формата А0. Тогда как 3D-модель, снабженная при необходимости плоскостями сечений и уровнями детализации, сократит этот процесс буквально до нескольких щелчков мышью в САПР или PDM-системе.

Размещение информации, необходимой для изготовления изделия, непосредственно в 3D-модели позволит решить следующие задачи:

- сокращение сроков формирования необходимой технологической документации, так как технологу не понадобится поднимать и изучать комплект 2D-документации;
- сокращение времени процедур технического контроля благодаря интеграции систем класса CAI (контрольно-измерительные системы) в процесс МОП;
- сокращение числа ошибок, уменьшение времени чтения чертежей инженерами с недостаточным опытом работы с 2D-документацией;

- сокращение времени на адаптацию при работе с мультинациональными проектами и соответствующей документацией, использующей различные стандарты оформления.

Модельно-ориентированное проектирование обещает оптимизацию разработки изделий, экономию времени и расходов для больших и малых компаний. Также процесс МОП полностью отвечает парадигме цифрового проектирования, обеспечивая ЭМИ дополнительной атрибутивной информацией и тем самым повышая его уровень до уровня «умного цифрового двойника».

Кроме того, модельно-ориентированное проектирование в полной мере соответствует тренду Индустрии 4.0 – сосредоточить основную часть изменений и затрат на стадии проектирования.

На рис. 2.25 показан вариант представления 3D-моделей в процессе МОП в САПР Autodesk Inventor.

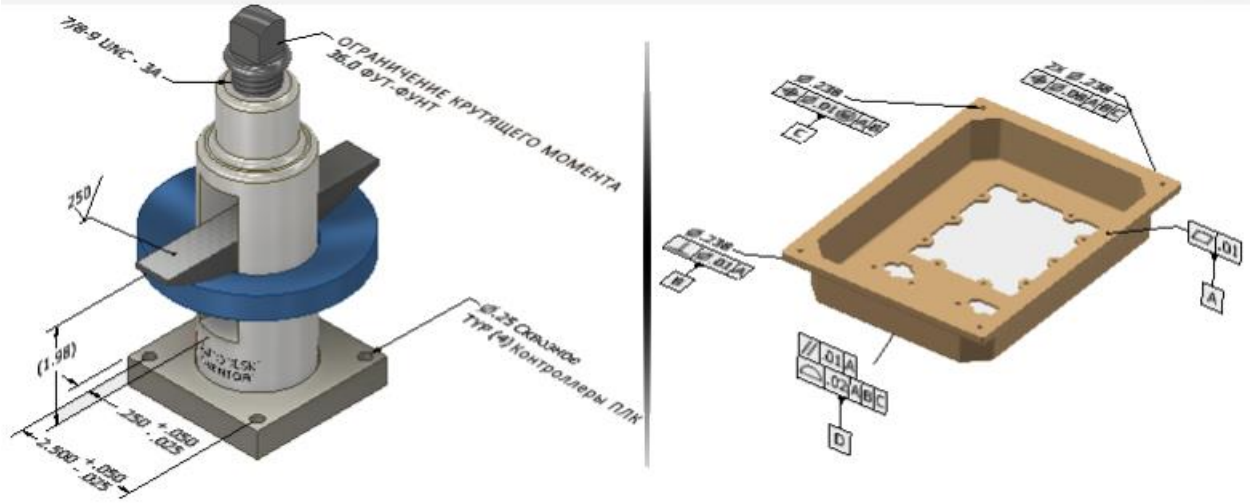


Рис. 2.25. 3D-модели изделия в процессе МОП в САПР

2.2.3.5. Разработка электронного макета изделия

Наличие электронного макета изделия (ЭМИ) позволяет более грамотно решать компоновочные задачи с учетом их возрастающей сложности. ЭМИ помогает добиться оптимальной геометрии деталей, провести расчеты. Дает возможность проанализировать работу сборки или детали еще на стадии формирования концепта, до завершения разработки. САПР же нацелен на автоматизированный выпуск конструкторской документации по существующей модели.

Появление двух стадий проекта (разработка ЭМИ и выпуск конструкторской документации) позволяет согласовать проект еще на первой стадии и подключить дополнительные кадровые ресурсы ко второй, что может существенно сократить сроки проектирования.

Необходимо отметить, что время, которое требуется на разработку ЭМИ и выпуск конструкторской документации, примерно на 20-40% меньше времени, необходимого при использовании 2D-технологий. В случае изменения топологии и размеров деталей скорость подготовки конструкторской документации увеличивается в несколько раз.

Также нужно подчеркнуть, что связанная с ЭМИ документация и спецификации обновляются автоматически, поэтому полностью исключен риск ошибок и несоответствий, связанных с человеческим фактором.

В Приложении А настоящего документа описаны современные технологии моделирования.

В **среде коллективной работы (СКР) над проектом** наличие ЭМИ позволяет более грамотно и эффективно решать задачи, связанные со стыковкой деталей и узлов, а также с их собираемостью.

2.2.3.5.1. Представление сборочных единиц как составных электронных документов в САПР

Документы в САПР связаны ссылками, в результате чего сборочная единица ссылается на детали, а документы чертежей – на сборочные единицы и на детали. Сборочная единица указывает системе, какие подсборки, детали и библиотечные компоненты в ней находятся, как они связаны друг с другом, и может сообщать дополнительную информацию – например, о необходимости сварки или последующей доработки деталей в контексте сборки. Документ чертежа ссылается на сборку либо на деталь и несет в себе информацию, необходимую для изготовления. Таким образом, изменения, происходящие с деталями, «видны» сборкам и документам чертежей – подобные связи можно считать наследованием, и без этого механизма трудно представить современную САПР. В компаниях, использующих САПР и PDM, состав изделия и связи между документами хранятся в системе документооборота.

При вставке деталей или библиотечных элементов в сборочную единицу происходит формирование состава изделия. Именно этот состав образует спецификацию, описывающую номенклатуру и количество изделий.

Структура изделия в САПР обычно совпадает со структурой и последовательностью, которые используются при сборке изделия на производстве. Это удобно и разработчикам – некая группировка деталей делает более компактным дерево в обозревателе моделей, и с ним проще работать. В системе есть возможность сгруппировать или разгруппировать детали (понизить или повысить уровень), поэтому отсутствует риск вставить деталь не в ту сборку.

В составе изделия может находиться вспомогательная геометрия, которая не должна учитываться в конструкторской документации. В этом случае в сборке она помечается как фантомная и в документе спецификации отсутствует. Также существует возможность добавления в спецификацию компонентов, на которые электронные модели не созданы (клеи, герметики и т.д.).

В случае применения разных деталей или сборок, имеющих одно обозначение, например, рукава высокого давления, представленные набором фитингов, и трассы одной длины – количества таких изделий суммируются в спецификации.

В ходе проектирования, при использовании окружающей геометрии, она указывается как фантомная, и в последующем может быть скрыта на соответствующих видах чертежа.

Присвоение обозначений деталям и сборкам обычно происходит после корректировки структуры в части вложенности.

Говоря о вариантах организации файлового состава на жестком диске, необходимо отметить, что файлы должны иметь оригинальные названия, и их нельзя создавать путем копирования с помощью проводника операционной системы. Других ограничений нет, но для лучшего порядка на диске рекомендуется создавать подпапки, которые совпадают с подсборками. При этом создавать папку ради трех-четырех документов нецелесообразно. В случае большого количества документов и участников проекта предпочтительно использовать PDM-систему, которая обеспечивает централизованное и безопасное хранение информации, отслеживает ее изменения, поддерживает ссылочную целостность. Обычно структуры САПР и PDM совпадают.

В системе САПР доступны многие стандарты крепежных элементов, подшипников, уплотнений, отводов, профилей и т.д. В момент вставки элементов в сборку они локализуются на диске как файлы детали, размещенные в определенном месте. Путь к стандартным деталям обычно настраивается, они в удобном для конструктора виде представляются в составе папки текущего проекта. Стандартные детали, конечно, попадают в соответствующий раздел спецификации сборки. В случае повторного использования элемента организуется ссылка на уже существующий файл.

Внешними источниками данных, помимо облаков точек и растровых изображений, обычно служат файлы формата Excel. В этих документах можно прописывать переменные, их значения, комментарии, вставлять изображения, способствующие лучшему пониманию, а также вводить координаты точек. Далее детали настраиваются таким образом, чтобы они ссылались на данные этих источников. В результате мы получаем систему, которая синхронизирована в части параметров посредством одного документа, которым управляет менеджер или заказчик, не работающий в САПР, но имеющий возможность создать новое изделие, задав соответствующие размеры.

2.2.3.5.2. Уровни детализации ЭМИ

Для конструктора-машиностроителя изменение уровня детализации – это инструмент облегчения модели, связанный с ее сложностью, количеством деталей, производительностью рабочей станции. Большое количество деталей перегружает жесткий диск и оперативную память, а грани деталей требуют пересчета с помощью видеокарты или процессора. Каждый раз, увеличивая сборку, разработчик будет сталкиваться с проблемой производительности рабочей станции.

В САПР есть механизмы автоматического удаления элементов с учетом размера, невидимых деталей, граней. Происходит соединение деталей друг с другом и превращение сборки в одну поверхностную деталь, которая является наследницей сборки, представляет собой одно тело или поверхность, имеет ту же массу и координаты центра масс. Переход от множества деталей к одной возможен в любой момент и на любом уровне сборки.

Помимо упрощения сборочной единицы, уровни детализации можно использовать для настройки видимости компонентов.

В САПР существует возможность создать целый ряд деталей на основе одной детали или сборки.

В этом случае формируется таблица, столбцы которой отображают используемые параметры, а строки – количество исполнений. Параметры в столбцах могут отвечать не только за численное значение того или иного размера, но и за подавление или включение элемента в дереве построения детали.

В случае вставки такой детали в сборку система уточнит, какое исполнение будет использовано в данном случае, и в папке проекта помимо табличной детали появится

файл с соответствующим исполнением. Далее можно либо выпускать документ чертежа на табличную деталь в целом, описывая параметры в таблице чертежа, либо выпустить чертежи на каждое используемое исполнение.

Так же, как и деталь, сборка может иметь табличное исполнение. Ее компоненты разработчик может добавлять или удалять с помощью конфигуратора. В случае, если сборка образована на основе табличной детали, их исполнения будут синхронизированы.

2.2.3.5.3. Интероперабельность 3D-модели

Бывают ситуации, когда конструктор использует узел, разработанный другой компанией. Естественно, в спецификации этот узел попадает в раздел покупных изделий. Платформы САПР в этом случае могут быть разными, и компания-разработчик покупного для вас изделия охраняет свою интеллектуальную собственность, передавая модели в форматах импорта/экспорта (*.x_b, *.x_t, *.sat, *.iges). Это дает возможность прочитать модель практически в любой САПР и передать потребителю только геометрию.

Если возникла необходимость доработки покупного изделия, это можно сделать, используя специальные технологии: например, изменить размер, передвинуть грани или удалить элемент.

Если формат сторонних САПР не поддерживается, существует возможность передачи данных через форматы импорта/экспорта:

- *.sat;
- *.jgs; *.ige; *.iges;
- *.stp;
- *.x_t;
- *.x_b.

Соответствующий формат подбирается в зависимости от специфики импортированной геометрии. При этом геометрия преобразуется в документ текущей САПР и может быть откорректирована с использованием инструментов преобразования. Аннотативная и атрибутивная информация в этом случае не передается.

2.2.3.5.4. Проверки ЭМИ

Наличие ЭМИ дает возможность запустить проверки и расчеты, основанные на методе конечных элементов. Это еще одно преимущество, которое сокращает сроки проектирования: отсутствует необходимость готовить математическую модель, отчасти она уже готова. Встроенные инструменты проверки позволяют произвести анализ на предмет коллизий и решить контактные задачи, выполнить динамический анализ.

Множества фрагментов проекта могут быть созданы с применением различных САПР, в том числе использующих строительные технологии, – например, линейки Revit. Для объединения их в пространстве и анализа взаимодействия необходимо использовать отдельное программное обеспечение.

До появления современных САПР со встроенными решателями существовала технология двойного расчета. Сначала производился проектировочный расчет, который был нацелен на определение геометрии исходя из условий работы и свойств материала. По сути, проектировщик находил требуемый диаметр вала или момент сопротивления сечения, зная силовые факторы, граничные условия в схеме и предел прочности материала. Эта технология основана на знании формул, связывающих одно с другим. Но что если система или сама форма детали сложна и необходимых формул не существует? В этом

случае на помощь приходит метод конечных элементов (МКЭ), которому нужны прежде всего геометрия, нагрузка, граничные условия и материал. Решив эту задачу через систему дифференциальных уравнений, решатель показывает, какие напряжения и перемещения в детали произошли. Исходя из этого, можно принимать этот метод как проверочный расчет в прежнем восприятии. И так как современные решатели оперируют прежде всего геометрией, проектировочный расчет здесь не используется. Исключением является бионический/генеративный дизайн, который по граничным условиям, свойствам материала и выбранной технологии производства предлагает решение в виде формы.

Встроенный в САПР решатель позволяет проводить статический линейный расчет и модальный анализ. Первый находит напряжения, перемещения и деформации, возникающие в материале, второй производит поиск собственных частот. Преимущество встроенного решателя в том, что при изменении геометрии обновляются граничные условия.

Обычно на детали в сборке конструктор накладывает зависимости, которые управляют их положением в пространстве или относительно базовой геометрии. Эти зависимости являются ограничителями степеней свободы; таким образом, в случае совмещения осей или точек возможно получение цилиндрических или сферических шарниров либо ползунов. Как результат, в системе САПР конструктор может сформировать механизм со своей кинематикой. Для оценки работы механизма существует инструмент динамического моделирования с возможностью приложения нагрузок в виде сил и моментов, трассировки траектории, определения скорости или ускорения точки и графическим выводом.

Для расчета на потерю устойчивости обычно используют более мощные инструменты анализа, которые также могут встраиваться в САПР. Результатом этого анализа являются формы потери устойчивости и соответствующие им коэффициенты запаса, которые представляют собой отношение критической нагрузки к рабочей. Потеря устойчивости – необходимый тип расчета в случае анализа работы длинных сжатых стержней или тонкостенных сжатых оболочек.

Метод конечных элементов использует дискретизацию исследуемой области и решает систему дифференциальных уравнений на основе простейших элементов. Элементы могут быть линейными, плоскостными или объемными. Таким образом, помимо погрешности вычислений, существует дискретизация функции, связанная с определением ее значений только в узловых точках. Все это сказывается на точности вычислений, которая зависит от степени разбиения на конечные элементы. Второй момент – это машинное время, необходимое для проведения расчетов, ведь с уменьшением размера элемента вдвое их количество (в случае объемного элемента) увеличивается в восемь раз, что сказывается на количестве дифференциальных уравнений в системе и приводит к восьмикратному увеличению времени расчета. Поэтому оптимально выполнять первый расчет со сравнительно грубой сеткой, определять концентраторы и всплески напряжений, а затем осуществлять повторный расчет, предварительно сгустив сетку в этих зонах. В этом случае можно получить достаточно точные результаты при сравнительно небольшом количестве конечных элементов. Процессы сгущения сетки не автоматизированы, размеры элементов настраиваются вручную.

Существует понятие сходимости сетки конечных элементов – это определяется настройками решателя, который сравнивает объемы исходного тела со множеством конечных элементов.

В случае динамического анализа, когда решатель оперирует величинами как функциями времени, оценивается скорость изменения этих функций. При уменьшении разницы

значений в соседних точках до определенного значения (анализ производной от функции) расчет останавливается, критерий сходимости выполнен.

Помимо статического, модального расчета, а также расчетов, связанных с потерей устойчивости, существует возможность расчета конструкции на ударные нагрузки, определение усталости материала, температурный анализ. Производится анализ реакции конструкции на вибрационные нагрузки. Статический анализ может быть нелинейным, в этом случае учитывается нелинейное поведение материала с образованием нового напряженно-деформированного состояния.

В специализированных расчетных системах возможен расчет потоков жидкостей и газов, а также их смесей. К расчетам можно отнести анализ заполняемости форм, прогнозирование образования коробления, холодных стыков и других дефектов при моделировании процессов, связанных с литьем пластмассы под давлением.

2.2.3.5.5. Разработка 2D электронной документации

Наличие трехмерной модели не отменяет существования чертежей. В случае их отсутствия электронная модель должна обладать аннотативной информацией, которая показывает, например, с каким квалитетом обработаны поверхности, каковы допустимые отклонения форм от базы, шероховатость и вид обработки. В случае выпуска 2D-документации конструктор вправе размещать эту информацию непосредственно на чертеже. При этом технолог на производстве руководствуется информацией, которая находится и в электронной модели, и в документации.

САПР должна обладать возможностью создавать чертежные виды на основе 3D-моделей, а также добавлять сечения, разрезы, местные взрывы, создавать увеличенные фрагменты или разрывать и обрезать их. Данная технология позволяет чертежам автоматически обновляться в случае изменения электронных моделей. В результате конструктору достаточно только один раз создать виды и проставить размеры на чертеже, а дальше следить за правильностью обновления, так как в случае потери геометрии при изменении детали или сборки дополнительные элементы на чертеже теряют своего «родителя» и требуют переопределения.

Как уже сказано, при добавлении деталей или подсборок в сборку формируется состав изделия. В соответствии с этим составом образуется спецификация – основной документ, по которому осуществляется сборка изделия. Графической частью этого документа является сборочный чертеж. На нем расставляются соответствующие номера позиций деталей и сборок. Эти номера закреплены за элементами в спецификации. Их можно сортировать (например, по обозначению), переназначать с учетом перехода в следующий раздел спецификации. При добавлении в состав изделия новых элементов номера в спецификации и на сборочном чертеже обновляются.

Данная технология позволяет исключить воздействие «человеческого фактора» в виде ошибок, связанных с неправильным количеством деталей, неверным номером позиции или полным отсутствием элемента в спецификации.

К разработке 2D электронной документации обычно приступают после прохождения проверок и согласования электронной модели изделия. На этом этапе модель может включать в себя аннотативную информацию, либо такая информация добавляется непосредственно при оформлении конструкторской документации. К выпуску чертежей могут подключиться сотрудники с разным уровнем подготовки, но в любом случае на данном этапе у компании есть возможность увеличить человеческие ресурсы, сократив тем самым сроки работы над проектом. Тем более что технология современных САПР в части наследования документов позволяет одновременно работать над изделием

целым командам специалистов – не мешая друг другу и при полной синхронизации действий.

2.2.3.5.6. Выпуск твердых копий конструкторско-технологической документации (КТД)

Наличие **электронных цифровых подписей** отменяет необходимость выпуска твердых копий конструкторско-технологической документации, тем более что на современном производстве при применении ЧПУ-технологий использование бумажных носителей не так актуально. Но все же в некоторых случаях бывает удобно использовать именно твердые копии – например при ручной обработке, сварке либо сборке изделий. В этом случае электронной модели недостаточно, и, используя инструменты САПР, необходимо выпустить конструкторскую документацию в соответствующих форматах. При внесении изменений в цифровую модель изделия следует изъять с производства неактуальные копии.

Изменения обычно не оформляются по правилам ЕСКД, и чертеж заново выпускается в соответствии с новой электронной моделью. В связи с этим целесообразно выпускать твердые копии непосредственно перед изготовлением деталей и сборочных единиц.

В современной САПР основная графика чертежей формируется в соответствии с электронной моделью изделия. Задачей конструктора является определение видов, разрезов, сечений. Простановка размеров и осевых линий может происходить в автоматическом режиме либо вручную. В последнем случае размеры и осевые линии также «цепляются» к исходной геометрии и следят за ее обновлениями. Спецификация образуется в соответствии с составом сборки, номера позиций в сборочном чертеже выносятся автоматически, есть возможность их простановки пользователем. Процессы автоматизации разработки чертежей значительно упрощают и ускоряют их выпуск. Аннотации с электронной модели (сварные швы, квалитеты, шероховатость поверхности и т.д.) выносятся на виды чертежа.

2.2.3.5.7. Формирование эксплуатационной документации

Модели, разработанные проектным отделом, могут использоваться как контент при формировании эксплуатационной документации. Также в специализированных программных комплексах можно формировать группы объектов по иным признакам, отличным от структуры проекта, полученной в ходе проектирования. Таким образом, эксплуатационная документация может представляться как в бумажном, так и в электронном виде. На базе разработанных электронных моделей создается интерактивное электронное техническое руководство (ИЭТР), которое позволяет оперативно решать сложные вопросы, связанные с эксплуатацией и ремонтом изделия. Примерами здесь могут служить иллюстрация последовательности сборки/разборки и ремонта, наименования и коды деталей, геометрические и физические параметры и т.д.

В САПР существуют инструменты создания схем сборки/разборки. Результатом их работы является интерактивная анимация сборки изделия, которая показывает последовательность перемещений деталей и узлов. Хранится схема в файле соответствующего формата, со ссылкой на электронную модель сборки. Средствами того же инструмента можно также анимировать камеру, которая перемещается вслед за формированием узла, не позволяет пользователю дезориентироваться в пространстве и фокусирует его внимание на необходимых элементах.

Еще одним преимуществом электронной модели изделия является возможность ее визуализации. Обычно современной видеокарты достаточно для визуализации сборки или детали в реальном времени, когда происходит их поворот в пространстве в рабочем

окне конструктора. При этом отображаются тени, текстуры материалов, возможно помещение изделия в одну из выбранных обстановок. Также существуют специальные инструменты фотореалистичной визуализации, которые оперируют источниками света, камерами. Происходит расчет трассировки света, камера имеет возможность моделировать глубину резкости и т.д.

Визуализация помогает подготовить материалы для оценки внешнего вида изделия еще на этапе концептуального проектирования, согласовать их с заказчиком, инвестором.

2.2.3.6. Подготовка производства

На Рис. 2.26 представлена комплексная схема общего цикла изготовления изделия в рамках современного промышленного производства.

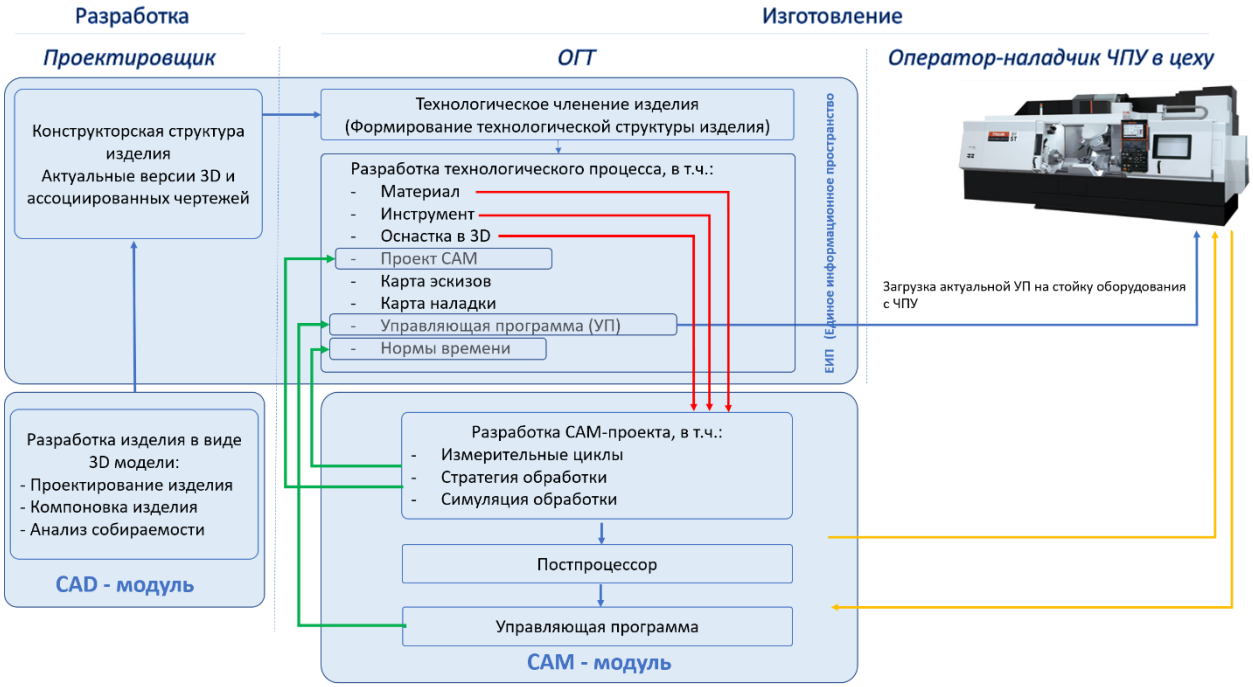


Рис. 2.26. Процесс подготовки производства

Исходя из приведенной структуры, можно выделить две самостоятельные области:

- процессы, связанные с разработкой изделия;
- процессы, непосредственно определяющие изготовление самого изделия.

Разработка изделия, создание цифровой модели, комплекта чертежей и т.д. находятся в зоне ответственности конструкторского отдела. Данные, полученные в результате работы этого отдела, используются в качестве базовой входной информации для подготовки производства изделия.

Сам процесс подготовки производства изделия в подавляющем большинстве случаев реализуется в рамках технологического отдела предприятия (отдела главного технолога).

На начальном этапе проработки технологий изготовления изделия происходит деление технологии на составляющие элементы:

- концептуально определяются технологии изготовления изделия (прямое изготовление методом механической обработки, получение изделия методом отливки, штамповки, аддитивных технологий и т.д.). Также на этом этапе

прорабатываются возможности применения так называемых гибридных технологий;

- в зависимости от выбранной технологии изготовления изделия принимаются решения о необходимости создания технологической оснастки (штамповая оснастка, пресс-формы, дополнительная оснастка для механической обработки и т.д.);
- определяется перечень оборудования, напрямую или опосредованно используемого в процессе изготовления изделия;
- в случае отсутствия на предприятии оборудования, необходимого для изготовления основного изделия или его составных элементов, определяется возможность реализации производства на контрактной основе.

На следующем этапе выполняется доскональная проработка технологии изготовления изделия (оснастки). Проводятся изыскания для выбора наиболее технологичного решения.

При необходимости создается и верифицируется цифровая модель технологической оснастки.

В зависимости от вида применяемой технологии и типа обрабатываемого материала формируется список необходимых инструментов и определяются оптимальные режимы обработки.

Вся ранее собранная информация в рамках проекта накапливается в PDM-системе и является исходной для создания CAM-проекта (рис. 2.27).

Рис. 2.27. Обмен информацией между КБ и ОГТ в PDM-системе в процессе подготовки производства

По сути, в рамках современного производства, оснащенного ЧПУ-оборудованием, CAM-система является основным инструментом технолога (технолога-программиста).

Задачи, решаемые современной CAM-системой

Современная CAM-система позволяет решать следующие задачи:

- подготовка УП для всего станочного парка ЧПУ-оборудования на предприятии;
- предоставление технологу максимально широкого перечня инструментов, позволяющих не только полностью раскрывать потенциал имеющегося оборудования, но и по возможности повышать производительность благодаря применению инновационных стратегий и методов обработки;
- обеспечение безопасности по отношению к используемому оборудованию;
- минимизация времени, затрачиваемого на создание управляющих программ (УП);

- обеспечение необходимого качества получаемого изделия.

Основные возможности современной CAM-системы

Основные возможности современной CAM-системы включают в себя:

- импорт цифровых моделей в любых доступных форматах без потери качества;
- генерацию гарантированно незарезающих управляющих программ;
- контроль столкновений агрегатов станка с деталью и наездов на концевые выключатели;
- средства, позволяющие выполнить проверку траекторий в рамках верификатора, интегрированного в оборудование ЧПУ;
- определение динамических характеристик станка для оптимизации вычисляемых траекторий (станочное «ДНК»);
- наличие стратегий адаптивной черновой обработки;
- возможность реализации черновых стратегий доработки как в 3-, так и в 5-осевом исполнении;
- возможность изменения ориентации инструмента для вычисленных траекторий в интерактивном режиме;
- генерацию управляющих программ по триангулярным и полигональным моделям;
- расчет машинного времени;
- наличие инструментов, позволяющих вручную редактировать вычисленные траектории с сохранением статуса безопасности;
- распознавание стандартных элементов форм в цифровой модели для автоматизации создания УП по изделиям с типовой геометрией (отверстия, пазы, бобышки, фаски и т.д.);
- возможность реализации аддитивных технологий обработки в рамках инновационного оборудования;
- поддержка интеграции CAM-системы с библиотеками производителей инструментов;
- наличие встроенного языка макропрограммирования, обеспечивающего реализацию функционала, выходящего за пределы базового инструментария;
- возможность снижения требований к квалификации технолога-программиста при подготовке многоосевых управляющих программ;
- возможность программирования роботизированных манипуляторов с количеством степеней свободы более пяти для механической обработки/контроля качества/нанесения покрытий;
- возможность взаимодействия с участниками процесса подготовки производства как через PDM-систему, так и с использованием облачных технологий.

Взаимосвязь между CAD/CAM-системами и оборудованием

Взаимосвязь между CAD/CAM-системами и оборудованием показана на рис. 2.28.

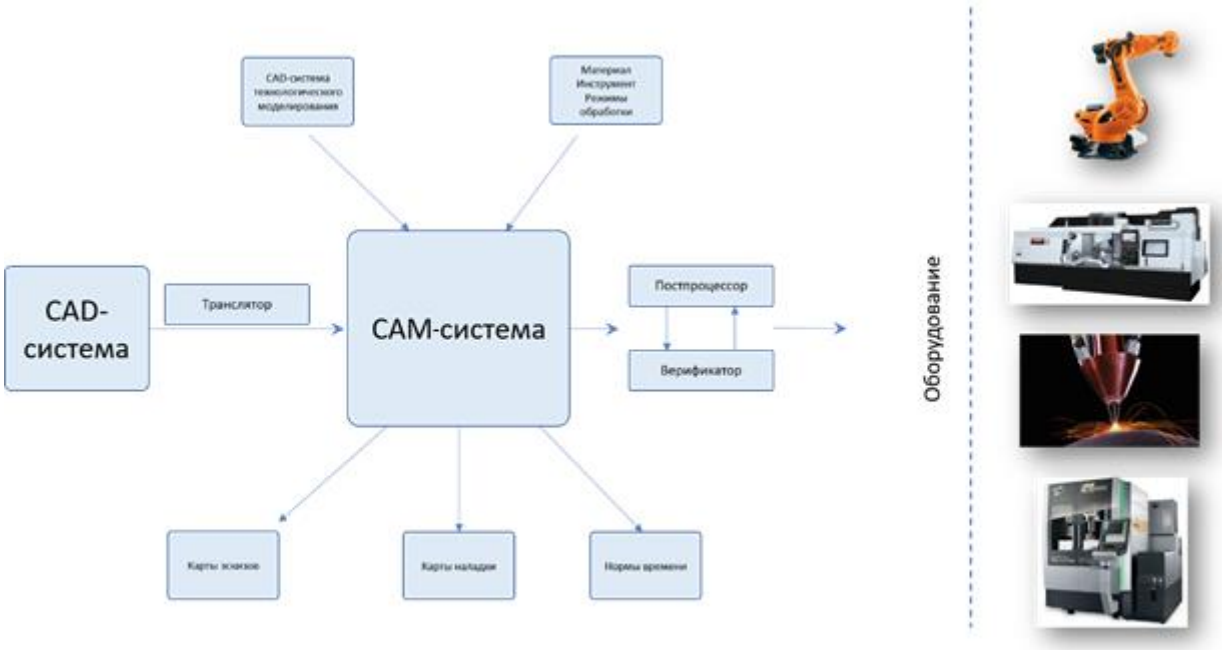


Рис. 2.28. Взаимосвязь между CAD/CAM-системами и оборудованием

Транслятор импорта цифровых моделей

Основные задачи транслятора импорта цифровых моделей:

- обеспечивает передачу цифровой модели в CAM-среду;
- обязан поддерживать импорт всех доступных 3D-форматов.

Производственные данные (Product Manufacturing Information)

Основные характеристики производственных данных (PMI):

- носителями PMI-данных могут быть как 3D-модель, так и чертеж;
- PMI-данные из 3D-моделей подлежат автоматизации;
- PMI-данные могут передаваться в CAM-систему в рамках ЕИП;
- на основании переданных PMI-данных принимаются решения о технологии обработки;
- реализация работы с PMI зависит от требований конкретного предприятия.

Постпроцессор

Является транслятором из языка CAM-системы в язык конкретного станка с ЧПУ.
Основные характеристики постпроцессора:

- пишется под конкретный станок с учетом его кинематической схемы, системы ЧПУ, а также индивидуальных кодов и циклов;
- не изменяет траекторию, созданную CAM-системой;
- поддерживает выбранные заказчиком циклы;
- является открытой системой, позволяющей вносить изменения;

- является открытой системой, позволяющей пользователю самостоятельно создавать новые постпроцессоры.

2.2.3.6.1. Аддитивное производство

Аддитивное производство (ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015; АП (аддитивный технологический процесс); additive manufacturing) – процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки).

Аддитивные технологии производства позволяют изготавливать любое изделие послойно на основе компьютерной 3D-модели. Из-за постепенности изготовления такой процесс создания объекта также называют «послойным изготовлением». Если при традиционном производстве вначале мы имеем заготовку, от которой затем отсекаем все лишнее либо деформируем ее, то в случае с аддитивными технологиями из ничего (а точнее из аморфного расходного материала) выстраивается новое изделие.
В зависимости от технологии объект может строиться снизу вверх или, наоборот, получать различные свойства.

В целом технологический процесс аддитивного производства описывается схемой на рис. 2.29.

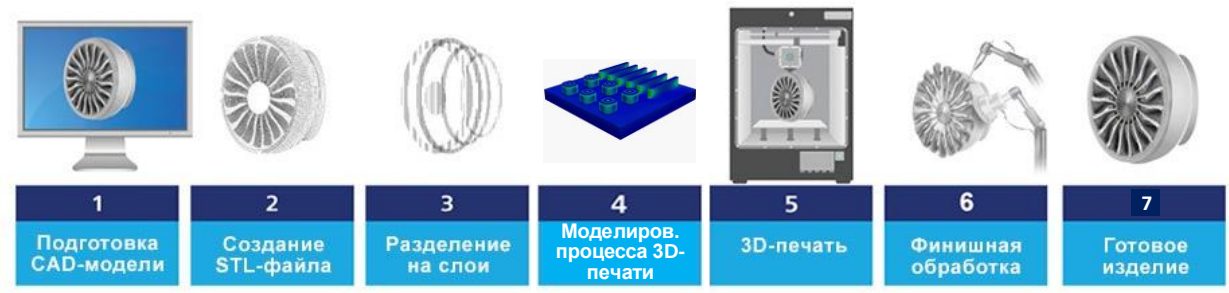


Рис. 2.29. Общий обзор традиционного потока данных от идеи продукта до фактической части (Источник: ЗАО «Группа компаний «Глобалтэк»)

Преимущества аддитивных технологий

- **Улучшенные свойства готовой продукции.** Благодаря послойному построению изделия обладают уникальным набором свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере, по своему механическому поведению, плотности, остаточному напряжению и другим свойствам в отдельных случаях превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки;
- **Большая экономия сырья.** Аддитивные технологии используют практически то количество материала, которое нужно для производства вашего изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80-85%;
- **Возможность изготовления изделий со сложной геометрией.** Оборудование для аддитивных технологий позволяет производить предметы, которые невозможно получить другим способом. Например, деталь внутри детали. Или очень сложные системы охлаждения на основе сетчатых конструкций (ни литьем, ни штамповкой их не изготовить);
- **Мобильность производства и ускорение обмена данными.** Больше никаких чертежей, замеров и громоздких образцов. В основе аддитивных технологий лежит

компьютерная модель будущего изделия, которую можно в считанные минуты передать на другой конец мира – и сразу начать производство.

Схематично различия традиционного и аддитивного производства показаны на рис. 2.30.

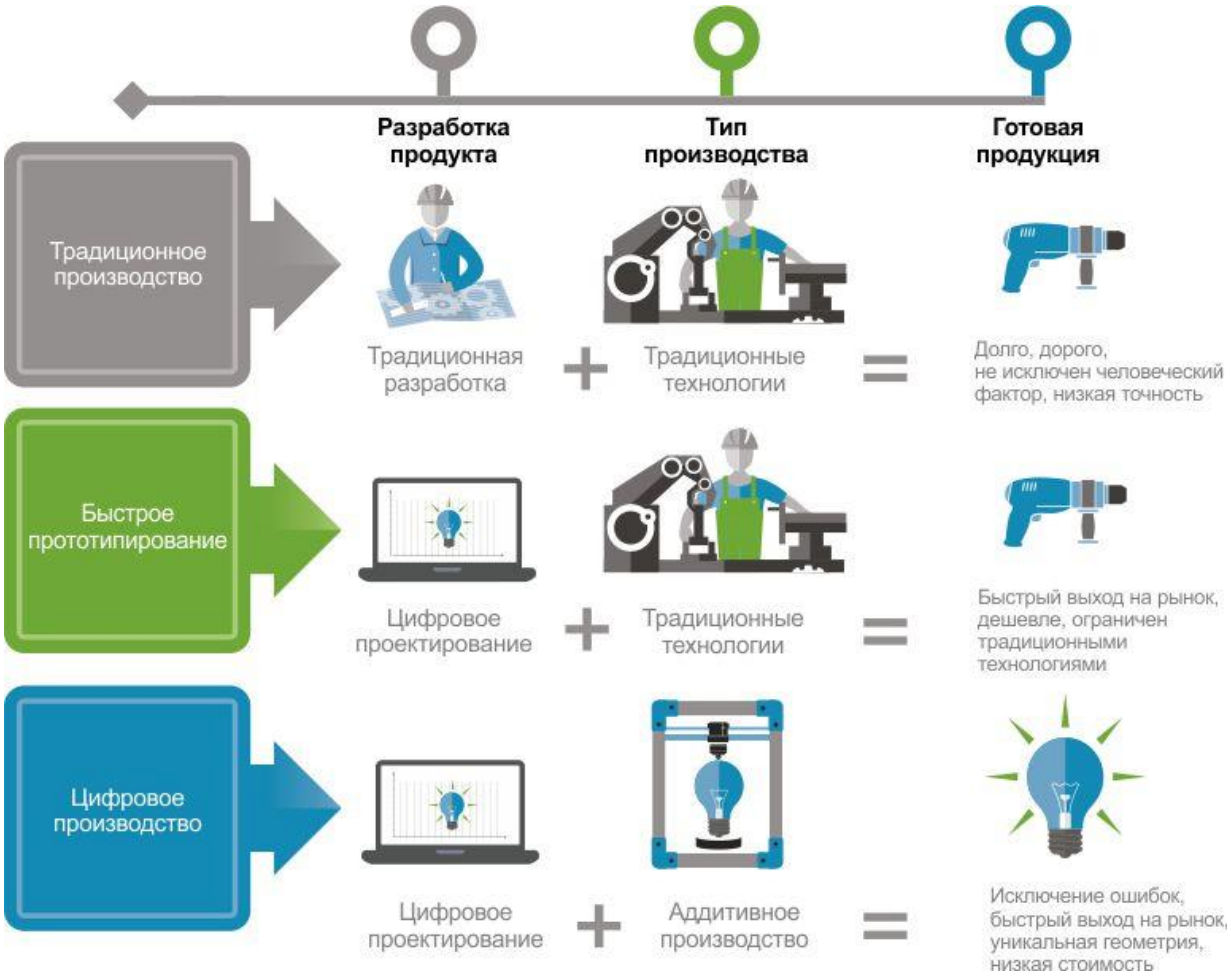


Рис. 2.30. Различия в традиционном и аддитивном производстве (Источник: ЗАО «Группа компаний «Глобалтэк»)

Аддитивные технологии предпочтительнее там, где требуется снизить массу изделий. Уменьшение массы – неизменная ключевая потребность аэрокосмической индустрии, вызываемая как затратами на топливо, так и объемом выброса двуокиси углерода. Та же проблема актуальна для автомобильной отрасли, в том числе для коммерческого транспорта. Наряду со снижением расхода топлива и экологичностью аддитивное производство имеет целый ряд других преимуществ. Так, оно значительно сокращает количество стадий изготовления, расходуется меньше материала. Все это происходит благодаря дизайну, который требует меньшего расхода материала, и самому процессу производства. По мере совершенствования технологий возможности аддитивного производства растут [3].

Подготовка аддитивного производства

Ниже приведены пояснения к основным этапам подготовки аддитивного производства.

Генеративный дизайн

Генеративный дизайн (или порождающее проектирование) – технология, позволяющая заранее устанавливать требования к изделию, такие как материал, размер, вес, прочность, методы производства. Затем, используя алгоритмы на основе искусственного

интеллекта и облачные вычисления, эта технология выдает множество вариантов конструкций, которые отвечают заданным критериям.

Исходя из этого, инженеры выбирают варианты, наиболее соответствующие указанным требованиям. Генеративный дизайн не только предлагает то, что первоначально может показаться «немыслимыми» вариантами, но и вооружает конструкторов данными, необходимыми для принятия обоснованных решений, отвечающих их задачам.

Внешне объекты, произведенные подобным образом, отличаются от обычных техногенных изделий. Они имеют выраженные черты, присущие, например, растениям, имитируют строение конечностей или костей. Именно поэтому такой способ проектирования часто называют бионическим дизайном (рис. 2.31).

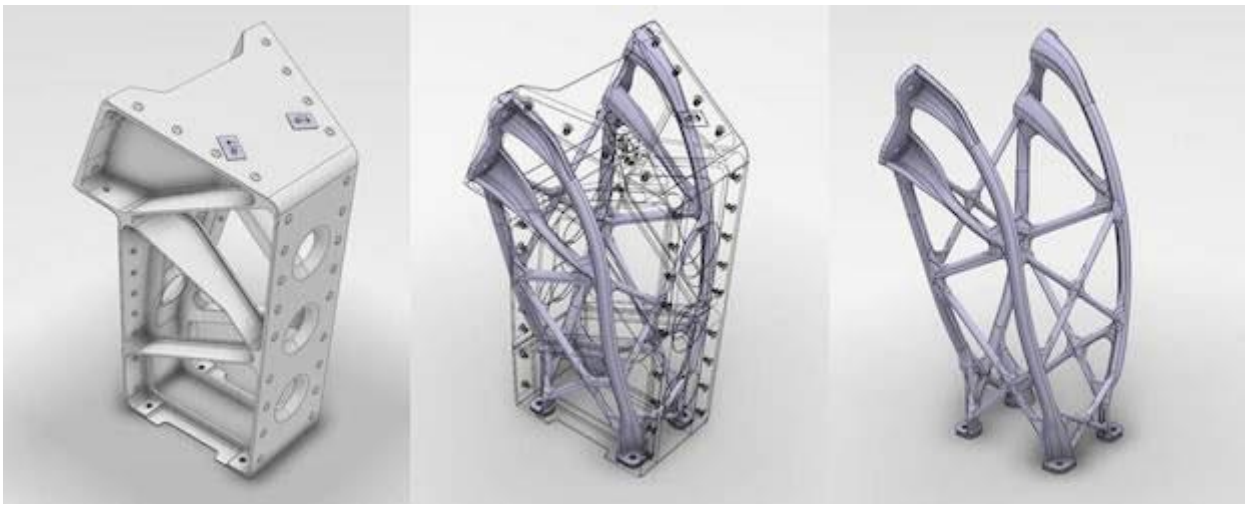


Рис. 2.31. Изделия, произведенные с помощью технологии генеративного дизайна (Источник: ЗАО «Группа компаний «Глобалтэк»)

Главная задача генеративного дизайна – снижение веса объекта при сохранении заданного минимального коэффициента запаса прочности. Именно поэтому такие решения чаще используют в сферах, где важно сэкономить каждый грамм: космические аппараты, авиастроение, инновационное машиностроение (рис. 2.32).

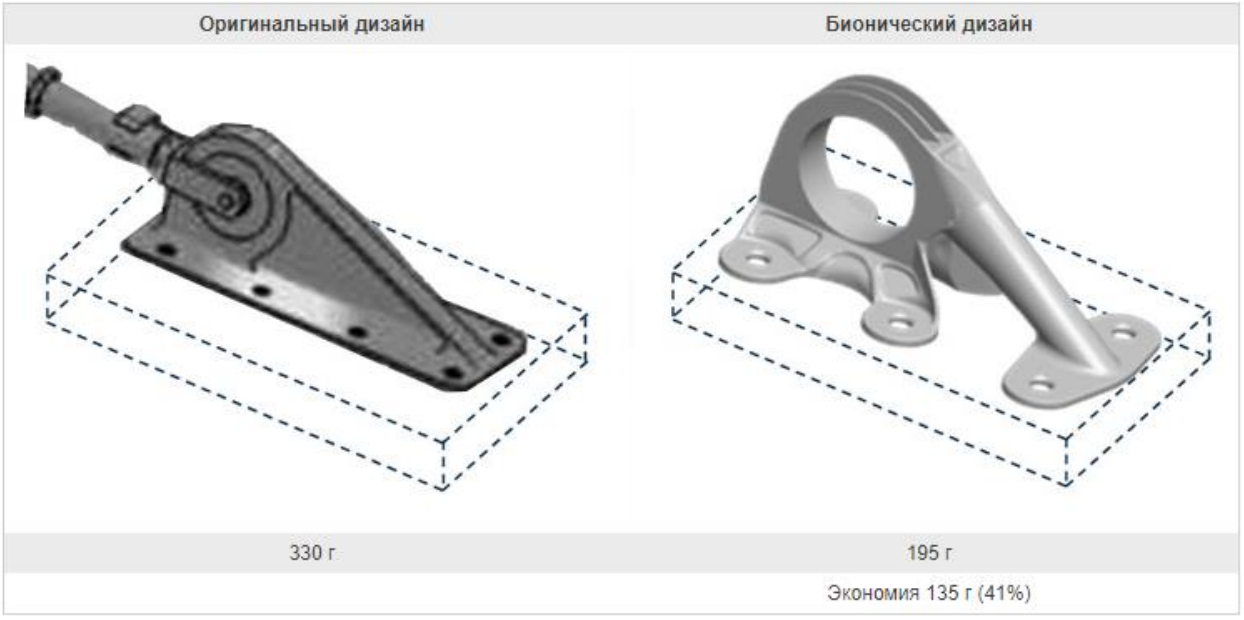


Рис. 2.32. Экономия материала (Источник: ЗАО «Группа компаний «Глобалтэк»)

Смежная задача – экономия дорогих материалов (сложные сплавы, редкие металлы). Бионический подход в проектировании позволяет некоторым компаниям тратить на 30-50% меньше материала, что положительно влияет на цену и прибыль.

Создание конструкций на основе генеративного проектирования в большинстве случаев возможно только с помощью **аддитивных технологий**. Дело в том, что традиционные методы производства не в состоянии реализовать проекты со сложной структурой нестандартных элементов, которую предлагает бионический дизайн.

С помощью технологии послойного синтеза можно изготовить элементы с любыми толщинами, искривлениями, полостями, сетчатой и ячеистой структурами. К тому же послойное построение придает бионическим объектам еще большую прочность и устойчивость к нагрузкам.

Генеративный дизайн и традиционная механообработка

В последнее время производители ПО для генеративного дизайна обратили внимание на традиционные производства, не оснащенные средствами аддитивных технологий. В частности, это такие методы механообработки и производства, как 2/2.5/3/5-осевая обработка, а также литье по выплавляемым моделям.

В результате ПО для генеративного дизайна позволяет не только создать конструкцию при помощи этой технологии, но и выбрать вариант изготовления конструкции, оптимизировав ее под выбранный метод производства (рис. 2.33).

Помимо самой возможности изготовления той или иной формы детали, важным является вопрос стоимости изготовления. К примеру, отливка показанной ниже конструкции обойдется в 970 руб. при условии, что технологическая оснастка полностью амортизирована. 3-осевая обработка потребует 6500 руб., в то время как 2.5-осевая – 1600 руб. 33.

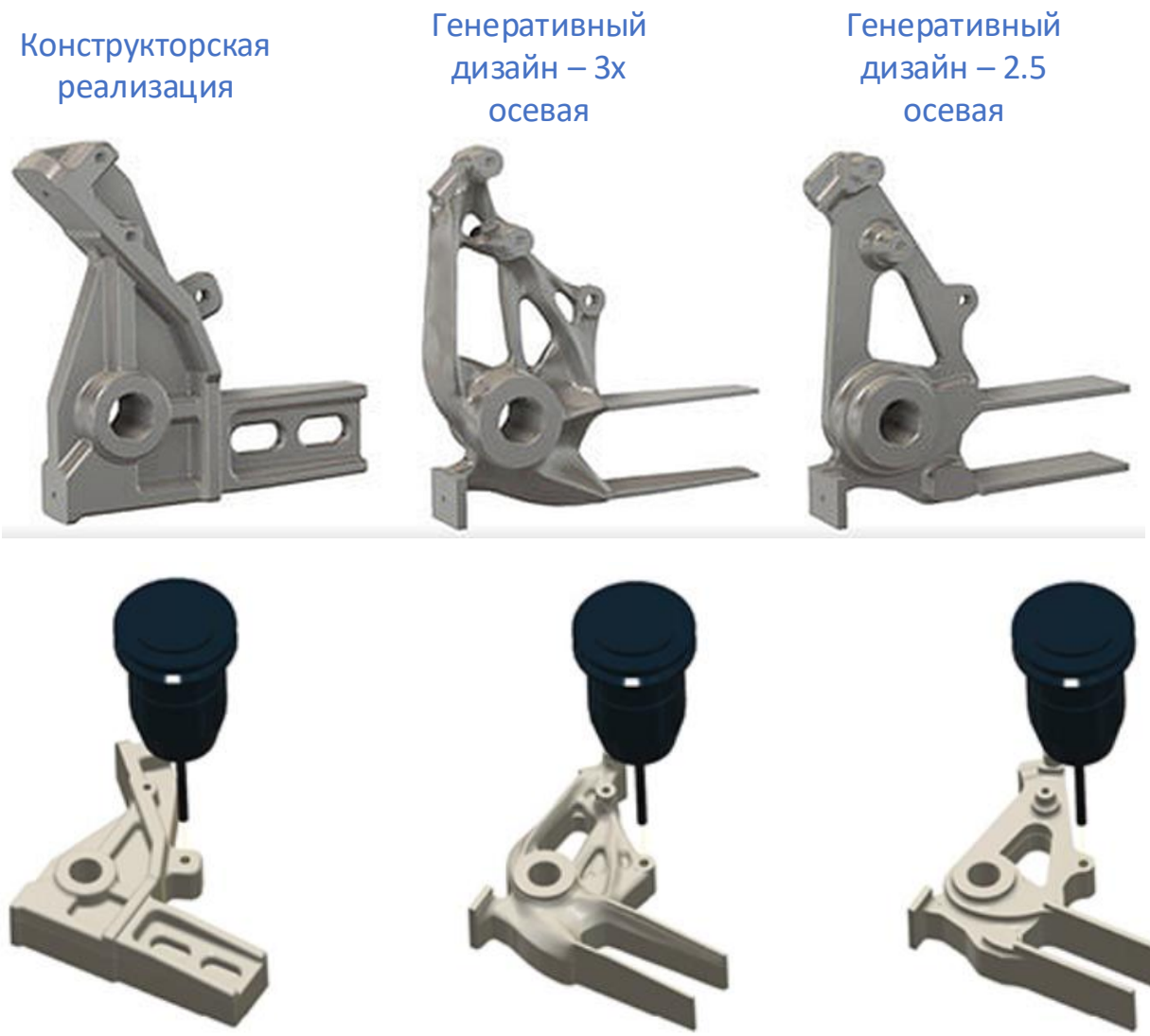


Рис. 2.33. Сравнение конструкции детали, выполненной при помощи разных методов конструирования

Кроме того, такой подход позволяет автоматизировать процесс выбора подходящего метода производства детали, исходя из ее конструктивных особенностей, что ранее являлось предметом экспертизы опытных конструкторов и/или технологов. Учитываются, например, такие особенности, как слишком тонкая стенка, отрицательный угол конуса и др. 31.

3D САПР-моделирование (объемное моделирование)

3D САПР-моделирование – процесс, наиболее часто используемый при проектировании для составления цифровой 3D-модели. Отправной точкой может быть образ изделия, который принимает форму и становится все более определенным непосредственно на экране компьютера, или ранее созданный образ объекта в виде эскизов, рисунков и т.д., которые служат основанием для построения трехмерной модели.

Обычно в машиностроении используют один из двух методов описания объема изделия или их комбинацию. Объект состоит либо из элементарных объемов (форм) – например, прямоугольного параллелепипеда, призмы, цилиндра, конуса, сферы и тороида, – которые генерируют реальный объект с помощью последовательности логических операций, либо из объема, описывающего окрестности граничных поверхностей и расположение материалов относительно этих поверхностей.

Традиционные методы проектирования не используют преимущества таких новых технологий, как аддитивное производство, а ведь они позволяют снять конструктивные ограничения и открывают новые возможности. Как правило, оптимальная конструкция детали предусматривает сложную, «органическую» геометрию, для создания которой требуется альтернативный подход. С помощью инструментов топологической оптимизации можно задавать расположение опор и распределение нагрузок по материалу для обеспечения оптимальной формы детали. Данный алгоритм также позволяет уменьшать вес конструкции, импортировать CAD-геометрию и выполнять поверочные расчеты оптимизированной конструкции. Повышается точность пространственного моделирования деталей из композиционных материалов, деталей, напечатанных на 3D-принтере, а также костей и тканей [21].

3D-оцифровка (обратный инжиниринг)

3D-оцифровка – это процесс, при котором геометрия поверхности физического объекта определяется с использованием соответствующего оборудования, программного обеспечения и записанного в цифровую модель облака точек. Использование 3D-оцифровки особенно эффективно, если модель имеет эмпирически разработанную свободную поверхность, так как она трудновоспроизводима с помощью прямого моделирования в 3D САПР.

Реконструкция поверхности

Реконструкция поверхности является средством обработки данных, полученных с помощью 3D-оцифровки. Начиная с массивов точек, создаются математически описанные кривые и поверхности. Генерируется поверхность объекта с достаточной топологической информацией. Эти данные могут затем храниться отдельно или интегрироваться в существующую объемную модель САПР. Реконструкция создает мост между 3D-оцифровкой и моделированием САПР.

Полигонизация/триангуляция

Применяется для создания объемной модели на основе фасеточных данных либо из массива точек после 3D-оцифровки или с использованием объемной модели после 3D-моделирования САПР. Поверхность объекта представляет собой множество крошечных плоских граней или полигонов, которые располагаются между точками. Число и размер граней определяют, насколько точно воспроизводится геометрия поверхности. Этот процесс создает набор данных в формате STL.

Процесс нарезки

Процесс нарезки является важным этапом предварительной подготовки во всех аддитивных производственных процессах. Он включает в себя нарезку фасетов (объем) модели на несколько последовательных слоев и записи информации, содержащейся в каждом слое. Если нарезанные данные контура больше не соединяются друг с другом в оси Z, последующее масштабирование невозможно. При использовании некоторых технологий этот процесс выполняется автоматически с помощью программного обеспечения, как только будут установлены необходимые параметры (например, толщина слоя). Другие системы требуют отдельного программного обеспечения для подготовки и хранения этих данных слоя.

Важность качества данных

Безупречное воспроизведение геометрии в наборе данных STL является необходимым условием качественного и бесперебойного процесса изготовления деталей с помощью существующих технологий производства. Особое внимание должно быть уделено следующему:

- все поверхности модели должны быть идеально состыкованы (идеально герметичная водонепроницаемая модель);
- все поверхности должны быть ориентированы таким образом, чтобы существовала возможность четко определить объемы;
- перед выполнением полигонизации/триангуляции модели все поверхности в идеале должны быть преобразованы в твердые формы.

Примеры изделий аддитивного производства

Примеры изделий аддитивного производства приведены на Рис. 2.34.

Рис. 2.34. Примеры изделий аддитивного производства (Источник: ЗАО «Группа компаний «Глобалтэк»)

Гибридные методы производства в аддитивном производстве

При всех многочисленных преимуществах аддитивного производства у него есть и недостатки. Прежде всего это малая точность и высокая шероховатость поверхностей.

Выходом из этой ситуации является применение гибридного подхода, когда **на одном и том же станке выполняются и послойный синтез (3D-печать), и механическая обработка резанием**. Объект создается по аддитивной технологии, после чего резанием изготавливаются мелкие элементы. Подобный подход также решает проблему допусков и точности, позволяя выполнять финишную обработку и последующие контрольные измерения готовой детали.

Функции как добавления, так и удаления материала с малым шагом обеспечивают возможность внесения изменений в конструкцию «на лету», без ее пересоздания с нуля. За счет этого этапы расчетов и испытаний проводятся гораздо быстрее и с гораздо более высокой точностью. Такой подход также упрощает задачи технического обслуживания и ремонта.

Технологии аддитивного производства совершили значительный рывок благодаря быстрому совершенствованию электронной вычислительной техники и программного обеспечения. Современный рынок аддитивного производства составляет порядка 7 млрд долларов 36, включая производство специального оборудования и оказание услуг в соотношении ориентировочно 1/1. Доля России среди стран, активно развивающих и применяющих технологии аддитивного производства, составляет примерно 1,2% (США – 39,1%, Япония – 12,2%, Германия – 8,0%, Китай – 7,7%), и показывает устойчивый рост.

Среди применений технологии аддитивного производства наиболее востребованным представляется производство функциональных изделий для авиакосмической отрасли, автомобиле- и машиностроения, ВПК, медицины в части протезирования, – то есть тех отраслей, где существует острая потребность в изготовлении высокоточных изделий и их прототипов в кратчайшие сроки.

Технология селективного лазерного плавления (СЛП, англ. SLM) является технологией послойного аддитивного производства с использованием лазера. На сегодня метод СЛП является наиболее быстро развивающейся технологией среди методов аддитивного производства. При этом остро стоит проблема производительности технологии, ограничивающая ее дальнейшее распространение для нужд современной индустрии. Высокая востребованность технологии обусловлена достижимым качеством изготовления конечного изделия: требуемыми шероховатостью, точностью исполнительных размеров ответственных элементов изделия, минимальной толщиной изготовления конструкторско-технологических элементов формы изделия, которые могут быть гарантированы малым радиусом лазерного пятна (до 20 мкм).

Применение технологий аддитивного производства в настоящее время во многом затруднено высокой себестоимостью производства, но по мере стандартизации оборудования, все большего использования модульных систем, расширения выпуска однотипной продукции, увеличения количества поставщиков оборудования для аддитивного производства себестоимость будет уменьшаться. Таким образом предприятия смогут предложить продукцию, учитывающую индивидуальные запросы потребителей.

Множество материалов по реализации процессов аддитивного производства на отечественных предприятиях вы сможете найти в электронном журнале «Аддитивные технологии». В этом журнале также приводятся практические и теоретические исследования в области аддитивных и гибридных технологий. Если у себя на предприятии вы собираетесь внедрять аддитивные производственные ячейки, вам будет полезен материал статьи «Девять шагов к созданию аддитивного центра на предприятии» 18.

2.3. Ключевые выводы и рекомендации по организации процессов цифрового проектирования

Ниже приведены ключевые выводы и рекомендации для руководителей производственных предприятий, ответственных за организацию процессов цифрового проектирования:

- В основе работы производственного предприятия нередко лежат процессы, ориентированные, прежде всего, на бумажный документооборот. Такой подход делает фактически невозможным повышение уровня цифровой зрелости

предприятия, что, в свою очередь, приводит к снижению конкурентоспособности предприятия на российском и глобальном рынках;

- Прежде всего следует определить, какие бизнес-процессы на предприятии должны поменяться согласно выделенным целям цифровизации. Эти процессы должны быть размещены в управляющей информационной системе (PDM/BPM/EDM/ERP) и выстроены вокруг цифрового двойника/электронного макета изделия;
- Любое рабочее место, исключенное из общей информационной шины предприятия, неминуемо является «узким местом» всего проекта повышения уровня эффективности. Использование CAD/CAE/CAM, PDM-систем способно обеспечить существенное продвижение для решения задач организации управления и работы с данными;
- Аддитивное производство и генеративный дизайн все больше входят в реальные проекты. Несмотря на то, что зачастую сложно сразу отказаться от классических способов проектирования и производства, необходимость оптимизации процессов диктует стремление всерьез присматриваться к новым технологиям, сравнивая экономические показатели и стратегические результаты от их опережающего применения.

В Главе 3 вы узнаете, как с помощью продуктов Autodesk реализовать проект повышения уровня цифровизации вашего предприятия, а также оптимизировать существующие производственные процессы.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕШЕНИЙ КОМПАНИИ AUTODESK

Компания Autodesk предлагает обширный портфель программного обеспечения для цифрового производства (D&M). Он охватывает полный жизненный цикл производства изделия, включая создание эскиза, прототипирование, разработку документации, инженерные расчеты, проведение цифровых испытаний, подготовку презентационных материалов, подготовку производства, организацию хранения и обмена информацией.

Использование решений из портфеля Autodesk позволит применять к организации работы подходы, приведенные в главе 1, а также новые процессы, которые были представлены в главе 2.

Далее мы более подробно рассмотрим, применение каких инструментов и на каких этапах обеспечивает максимальную эффективность. Комплексный подход при внедрении и использовании данных систем позволяет обеспечить переход к технологии создания цифрового двойника и его дальнейшему применению на всем жизненном цикле.

Решения Autodesk хорошо зарекомендовали себя как при использовании традиционных методов проектирования и производства, так и при переходе к использованию современных и перспективных технологий – таких, например, как аддитивное производство, генеративный дизайн.

Портфель решений Autodesk не создает замкнутую экосистему, а наоборот, благодаря применению технологии AnyCAD, позволяет использовать данные сторонних разработчиков.

3.1. Обзор портфеля решений Autodesk

Распределение решений по этапам жизненного цикла изделия показано на рис. 3.1.

Рис. 3.1. Распределение решений по этапам жизненного цикла изделия

Портфель программного обеспечения Autodesk для цифрового производства можно разделить на несколько функциональных блоков:

Блок «Промышленный дизайн» (стадия ЖЦП «Исследование и проектирование», этап КТПП «Разработка концепта ЭМИ/ЭСИ (СДИ)») включает в себя следующие программные продукты:

- 3ds Max – 3D-моделирование, анимация и визуализация;
- Alias – работа с поверхностями, в том числе класса А;
- Autodesk Rendering – быстрая высококачественная визуализация в облаке;
- Fusion 360 – новое поколение облачных 3D-программ для комплексных процессов разработки и промышленного производства изделий;
- VRED – 3D-визуализация и виртуальное прототипирование для автомобильных дизайнеров.

Блок «Цифровое проектирование» (стадия ЖЦП «Разработка», этап КТПП «Разработка ЭМИ (КТР)») включает в себя следующие программные продукты:

- AutoCAD – САПР для 2D- и 3D-проектирования;
- Inventor – 3D-САПР для машиностроительного проектирования;
- Fusion 360 – новое поколение облачных 3D-программ для комплексных процессов разработки и промышленного производства изделий;
- Navisworks Manage – ПО для проверки проектов с помощью 5D-анализа;
- Recap PRO – программное обеспечение и службы для лазерного и 3D-сканирования;
- Factory Design Utilities – концептуальное проектирование, планирование и проверка производственных помещений.

Блок «Анализ изделий и конструкций» (стадия ЖЦП «Разработка», этап КТПП «Разработка ЭМИ (КТР)») включает в себя следующие программные продукты**:**

- Autodesk CFD – инструмент для расчета потоков жидкостей и газов;
- Helius Pfa – мощный инструмент для анализа поведения композитных материалов;
- Inventor Nastran – встраиваемый в Inventor решатель, основанный на методе конечных элементов;
- Moldflow – симуляция литья из пластмасс под давлением;
- Robot Structural Analysis Professional – расчет конструкций.

Блок «Подготовка производства» (стадия ЖЦП «Изготовление (производство)», этап КТПП «Подготовка производства») включает в себя следующие программные продукты:

- Featurecam – программное обеспечение для программирования станков с ЧПУ;
- Hsmworks – организация высокоскоростной обработки, интегрируется с Solidworks;
- Inventor CAM – интегрированное решение для программирования различных видов обработки (от 2,5 до 5-осевой) для Inventor и Solidworks;
- Netfabb – комплекс для работы с аддитивными технологиями (проектирование и производство);
- Powermill – подготовка высокоскоростной и 5-осевой обработки;
- Inventor Nesting – ПО для раскроя деталей реальной формы в Inventor с целью оптимизации работы с плоскими заготовками;
- TruNest – ПО с расширенным функционалом подготовки производства по раскрою изделий из листовых материалов;
- TruComposites – надстройка для Inventor: эффективное проектирование процессов производства изделий из композитных материалов.

Блок «Анализ качества» (стадия ЖЦП «Изготовление (производство)») включает в себя программный продукт Power Inspect, предназначенный для проверки сложных поверхностей (относится к аппаратным средствам контроля).

Блок «Производство и эксплуатация изделия» (стадия ЖЦП «Эксплуатация») включает в себя прикладные решения на платформе Autodesk Forge для управления эксплуатацией изделия (см. раздел 3.6.1).

Блок «Управление инженерными данными» включает Autodesk Vault (PDM-система, управление инженерными данными).

Перечень продуктов достаточно широк, он позволяет обеспечить решение практически любой задачи, будь то проектирование, моделирование, расчет или подготовка к производству и контроль.

Портфель программного обеспечения Autodesk закрывает большой спектр задач, связанных с переходом на цифровое производство и использованием наиболее прогрессивных технологий создания цифровых двойников. А так как решения Autodesk охватывают не только машиностроительные задачи, но и смежные области (например, архитектурно-строительное направление), мы имеем возможность в единой информационной среде получить всю необходимую информацию по проекту. Портфель Autodesk по работам в процессе КТПП представлен в табл. 3-1.

Табл. 3-1. Портфель Autodesk по работам в процессе КТПП

Работы в процессе конструкторской и технологической подготовки производства	**Решения Autodesk**	**Краткое описание**
Эскизное и концептуальное проектирование		
Концептуальное проектирование	Inventor	Флагман машиностроительного проектирования в Autodesk, позволяет проектировать детали и узлы машин, механизмов с разной степенью детализации, от создания концепта до выпуска документации в производство.
Поверхностное моделирование. Дизайнерские задачи	Alias	Работа с поверхностями, в том числе класса А; затем поверхности передаются в САПР-системы для последующей работы.
Календарное планирование проекта	Navisworks	Консолидация САПР-данных из разных источников, осуществление связей геометрии с календарным графиком, диаграммами Ганта.
Трехмерное моделирование		
Детали	Inventor	Располагает максимальным набором инструментов для разработки деталей, поверхностного и твердотельного моделирования.
Сложные поверхностные модели	Inventor, Alias	
Генеративный дизайн (генерация топологии деталей, порождающее проектирование)	Fusion 360 (также входит в Netfabb Ultimate)	
Узлы и сборки изделий	Inventor	Позволяет создавать сборочные единицы на основе деталей.
Листовые детали	Inventor	Проектирование деталей из листового материала с использованием специализированных инструментов, существенно ускоряющих процесс создания деталей. Возможность выпуска документации на развертки.
Каркасные конструкции	Inventor	Инструмент «Генератор рам» позволяет быстро создавать каркасные сборки, основанные на скелетных заготовках.
Трубопроводные системы	Inventor	Разработка трубопроводных систем на основе шаблонов: рукава высокого давления, гибкие шланги, сварной/паяный трубопровод.

Прокладка электрических кабелей по 3D-модели	Inventor	Инструмент, позволяющий соединить кабельными системами электрические компоненты, уложить провода в жгуты, создать рабочую документацию.
Крепежные элементы	Inventor	Доступна библиотека крепежных и стандартных элементов; существует возможность использования специальных инструментов, создающих конструктивные элементы, крепежные пакеты фланцевого соединения.
Детали вала	Inventor	Моделирование тел вращения с добавлением конструктивных элементов, использование генератора вала.
Передачи	Inventor	Проектирование зубчатых передач с возможностью создания компонентов или добавления элементов в существующие детали.
Проектирование электротехнической составляющей изделий		
Принципиальные схемы	AutoCAD Electrical	Создание принципиальных электрических схем шкафов.
Электромеханические изделия	Inventor, AutoCAD Electrical	Прокладка кабельных систем в Autodesk Inventor в соответствии с принципиальными схемами, разработанными в AutoCAD Electrical.
Большие сборки		
Разработка больших сборок машиностроительных изделий	Inventor	Autodesk Inventor позволяет оперировать большим количеством деталей в сборке. Существуют уровни детализации, упрощающие представление сложных сборок.
Консолидация больших трехмерных проектов из разрозненных источников, анализ коллизий	Navisworks	Для случаев работы с экстремально большими сборками существуют технологии Navisworks, позволяющие соединять разделы проекта, в том числе созданные в разных САПР.
Внешние данные		
Векторизация сканированных бумажных документов	AutoCAD Raster Design	
Наработки в 2D/3D-САПР других производителей	AutoCAD, Inventor	
Данные трехмерного сканирования	Inventor, ReCap	Возможность использования в среде разработки данных трехмерного сканирования позволяет совместить реальное пространство с виртуальным.

Параллельная работа в условиях многовендорных решений по САПР	Inventor	Технология AnyCAD, позволяющая собрать фрагменты разных САПР в Inventor посредством ссылок. Это обеспечивает возможность автоматического обновления моделей в Inventor в случае продолжения работы над ними в сторонних САПР.
Инженерный анализ		
Экспресс-анализ: прочность, кинематика, пресс-формы для литья из пластмасс под давлением	Inventor Professional	В Inventor встроены решатели, способные работать со стержневыми, объемными элементами и оболочками. Также есть возможность проведения кинематических расчетов и симуляции литья пластмасс под давлением. Набор таких инструментов на рабочем столе конструктора позволяет оценить работоспособность деталей и узлов еще на стадии ранней разработки.
Кинематика	Inventor Nastran	
Прочность/деформации/устойчивость/ударные и др.	Inventor Nastran	Nastran in-CAD позволяет провести более глубокий анализ работы деталей. Существует возможность запуска нелинейных расчетов, расчета на потерю продольной устойчивости, ударные и вибрационные нагрузки, расчета напряжений, связанных с термической нагрузкой, оценки усталости материала и т.д.
Гидрогазодинамика	Autodesk CFD	Позволяет провести анализ потоков жидкостей и газов, а также их смесей, оценить скорости потока, давления, расход, распределение температуры. Оперирует CAD-моделями.
Литье пластмасс под давлением	Autodesk Moldflow	Моделирование литья пластмасс под давлением предоставляет производителям инструменты для конструирования, оптимизации и проверки пластмассовых деталей и литьевых пресс-форм, а также для анализа процессов, происходящих во время литья.
Конструкторская, проектная и иная документация		
Визуализация	Inventor, 3ds Max, VRED	Встроенные модули визуализации в Inventor позволяют получить высококачественные изображения будущего изделия. Для получения фотореалистичных изображений есть возможность передачи трехмерных моделей в 3ds Max.
Эксплуатационные и сборочные руководства	Inventor	В Inventor существует возможность создания анимации с последовательностью сборки/разборки.

2D-чертежи	Inventor, AutoCAD Mechanical	Разработка конструкторской документации в 2D на основе подготовленных моделей.
Управление инженерными данными и совместная работа		
Организация совместной работы проектных групп	Vault Professional	
Управление инженерными данными, жизненным циклом изделия и совместная работа	Vault Professional	
Подготовка производства		
Анализ допусков	Inventor Tolerance Analysis	
Оптимизация раскроя листовых деталей	Inventor Nesting	Позволяет группировать детали на листе-заготовке по материалу и толщине на основе сборочной единицы с учетом количества.
Проектирование пресс-форм для литья	Inventor Professional	
ЧПУ	См. ниже	
Фрезерная обработка	PowerMill, Inventor CAM, Fusion 360	
Токарная обработка	PowerMill	
Роботы	PowerMill	
Гибридная аддитивно-субтрактивная обработка	PowerMill	
Инструментальный контроль формы	PowerInspect	
Подготовка производства по раскрою изделий из листовых материалов	TruNest	
Проектирование процессов производства изделий из композитных материалов	TruComposites	
Аддитивное производство		
Экспресс-инструменты подготовки 3D-печати	Fusion 360	
Полный комплекс инструментов подготовки 3D-печати, оптимизации моделей под аддитивное производство и математического моделирования процессов 3D-печати из металлов	Netfabb	

3.1.1. Обзор ключевых продуктов машиностроительного портфеля

3.1.1.1. Autodesk Inventor

Autodesk Inventor обеспечивает инженеров функционалом профессионального уровня для трехмерного машиностроительного проектирования, инженерного анализа, создания конструкторской документации, визуализации и подготовки производства промышленных изделий.

С помощью Inventor инженеры и конструкторы могут консолидировать 2D, 3D и аналитические данные в едином электронном макете изделия, создавая виртуальное представление финального продукта. Это дает возможность исследовать форму, окружение и функционал продукта задолго до того, как будет построен первый физический образец. Autodesk Inventor позволяет пользователям разрабатывать, визуализировать и анализировать продукты в цифровом виде, помогая удешевить этап разработки и ускорить вывод на рынок изделий высокого уровня и безупречного качества.

Autodesk Inventor отлично адаптирован для применения как в небольших рабочих группах, так и на крупных предприятиях. Для этого в нем реализовано множество инструментов поддержки комфортной работы с большими сборками. Также в Inventor встроена технология **AnyCAD** для кроссплатформенной совместной работы в различных САПР, позволяющая напрямую, без конвертации использовать в сборках Inventor файлы из других САПР в их оригинальном формате. При этом сохраняется возможность параллельной работы Inventor и других САПР: «инородные» модели, вставляемые в сборку Inventor, будут автоматически отображать все вносимые в них изменения, без необходимости повторной вставки (технология AnyCAD более подробно представлена в разделе 3.5.1).

Autodesk Product Design and Manufacturing Collection – максимально функциональное решение, дополненное интегрированными в Inventor Professional инструментами инженерного анализа Nastran, средствами раскроя листовых деталей, ЧПУ-разработки, полным семейством продуктов на базе AutoCAD, а также рядом отдельных дополнительных продуктов для машиностроительного проектирования.

Примеры проектов, выполненных в Inventor, показаны на рис. 3.2 и рис. 3.3.

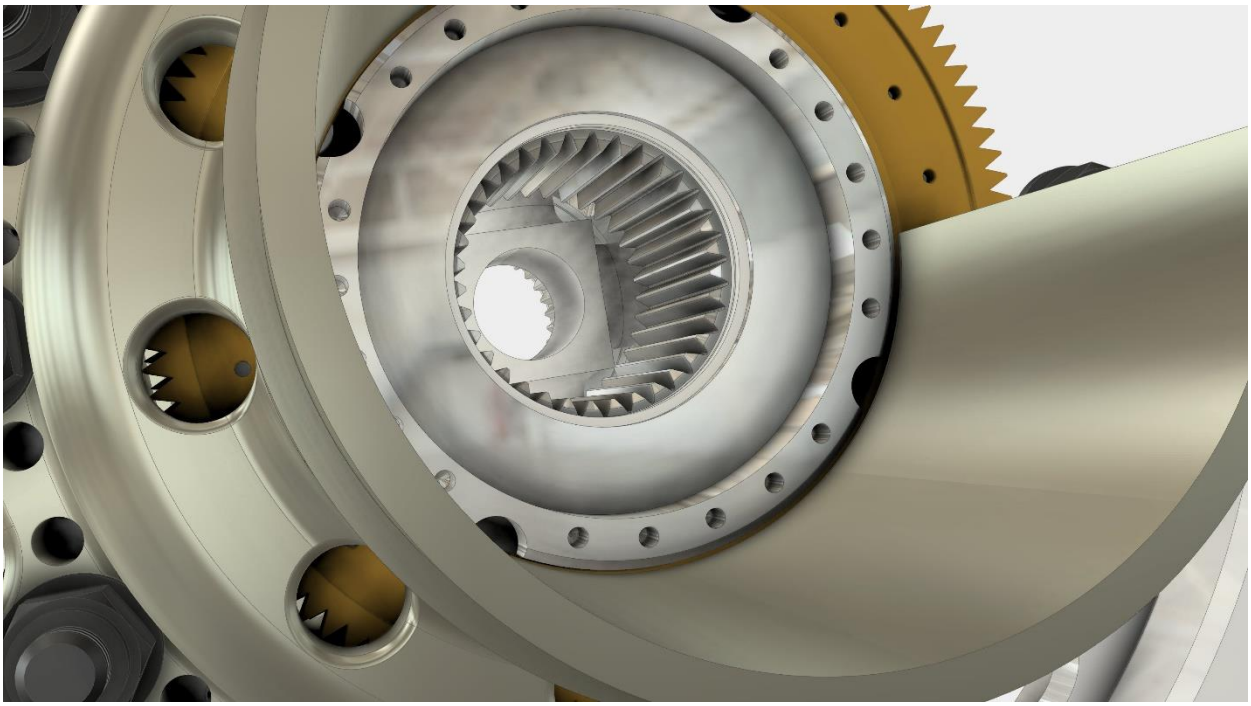


Рис. 3.2. Сборка дифференциала

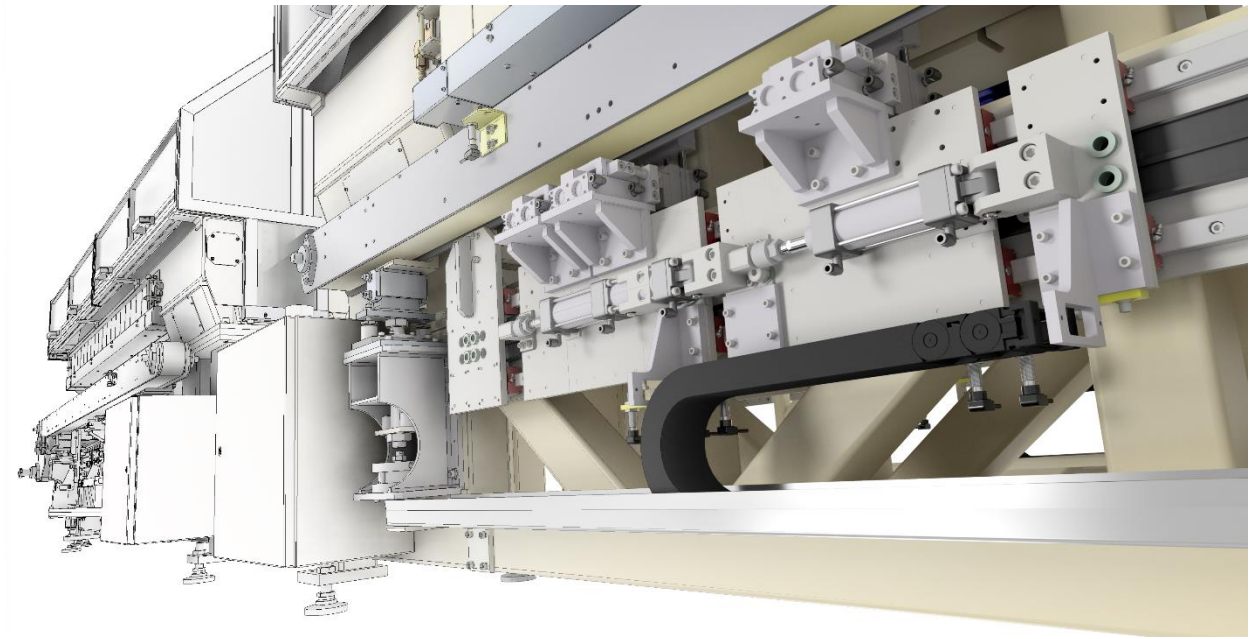


Рис. 3.3. Модель обрабатывающего центра

3.1.1.2. Autodesk Fusion 360

Комплекс Autodesk Fusion 360 представляет собой полноценный CAD/CAE/CAM-инструмент. Применяется в сфере промышленного дизайна и производства, где позволяет работать над практически любыми проектами. Гибкая среда, способная подстраиваться под потребности проектировщика.

Основные возможности

- **CAD.** Все начинается с моделей. Для этого во Fusion 360 собран полный набор видов моделирования: от поверхностного до твердотельного. Поддерживаются

сплайновое моделирование, работа с импортированными сеточными моделями и листовым металлом – и со временем этот список расширяется;

- **CAE.** Следующий этап – инженерный анализ будущего изделия. Позволяет посмотреть, как будет вести себя деталь под нагрузками и сможет ли она выдержать заданные перепады температур. Сегодня для полноценного исследования достаточно виртуальной среды;
- **CAM.** Подготовка модели для производства на станке с ЧПУ, где существует возможность даже 4- и 5-осевой обработки, или подготовка модели для изготовления на 3D-принтере. Также есть возможность подготовить чертежи, пусть это и не относится к CAM-составляющей;
- **Генеративный дизайн.** Эта продвинутая облачная технология позволяет определить для конструкции множество различных форм, сохраняя или даже увеличивая прочность и уменьшая массу. При этом она учитывает предпочтения по методу производства детали. Полученную модель легко отредактировать под свои нужды в среде моделирования. Все расчеты осуществляются на серверах компании, что позволяет продолжать полноценную работу над проектами во время использования этого модуля (подробности о технологии генеративного дизайна см. в разделе 3.2);
- **Хранение и взаимодействие.** Облачное хранилище Autodesk Fusion 360.

Примеры проектов, выполненных в Autodesk Fusion 360, показаны на рис. 3.4 и рис. 3.5.

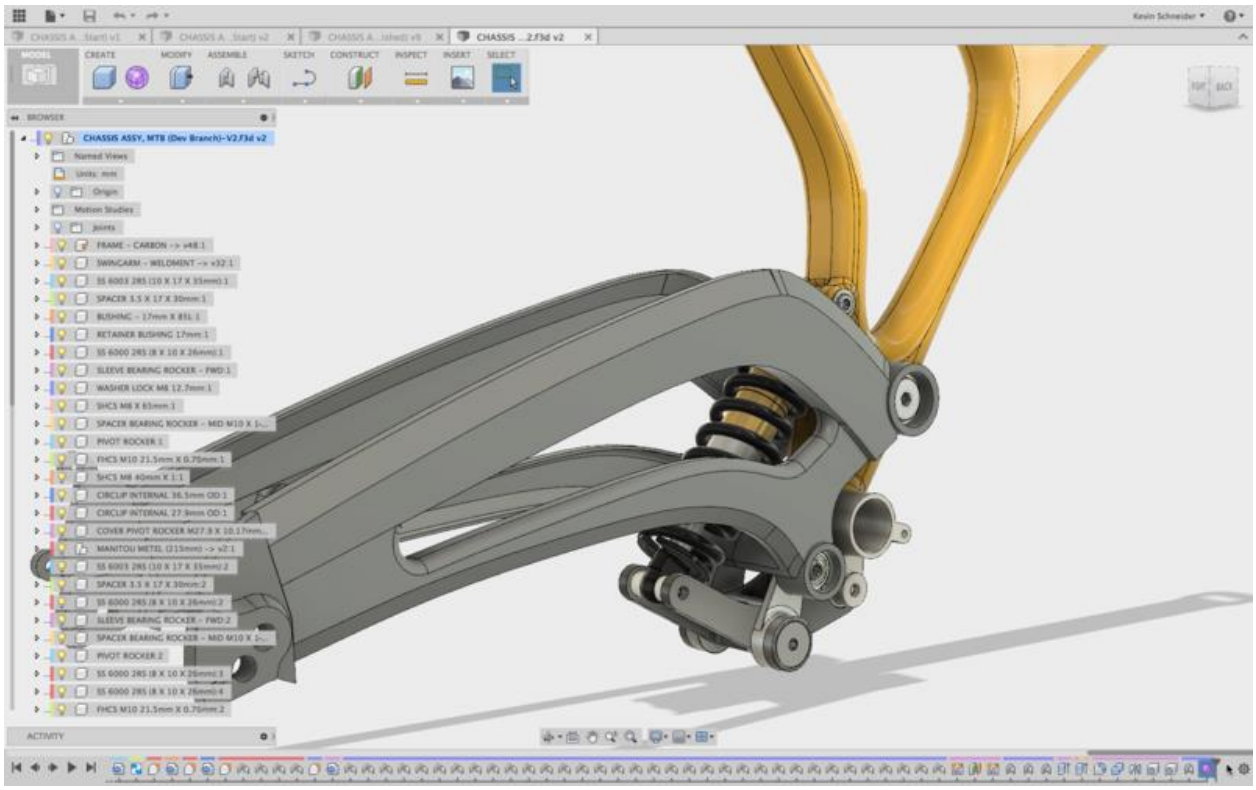


Рис. 3.4. Моделирование сборки в Autodesk Fusion 360

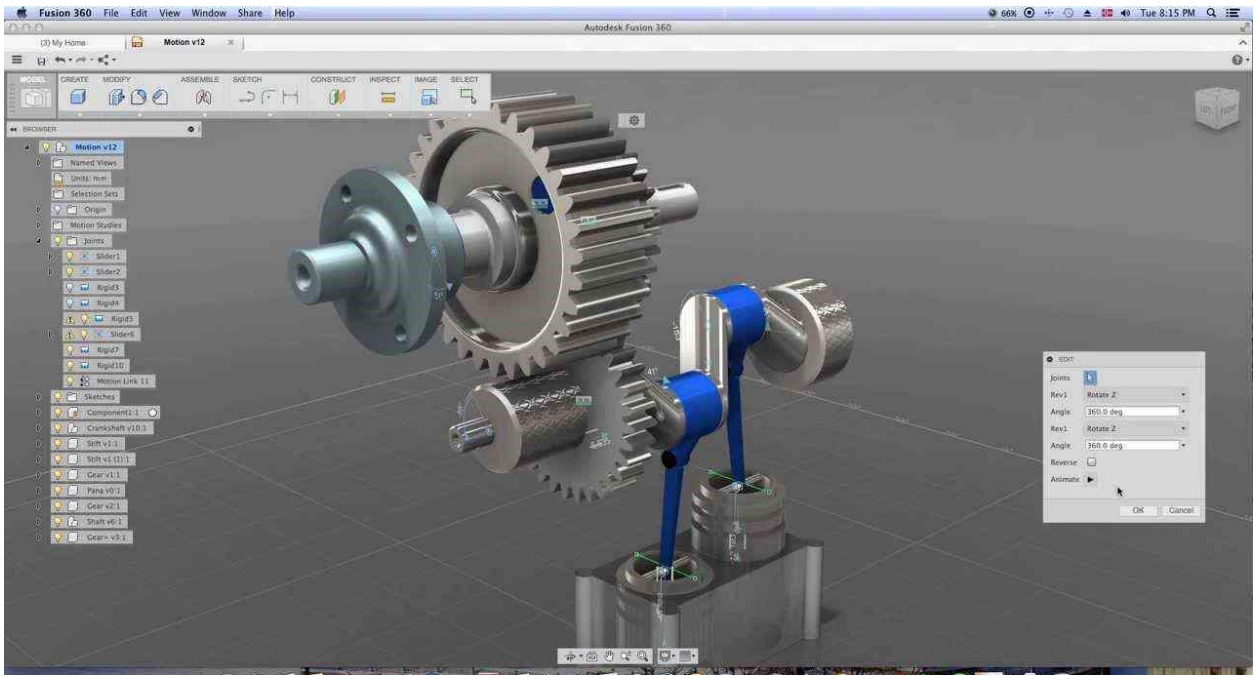


Рис. 3.5. Изучение кинематики во Fusion 360

Fusion 360 предлагает функционал твердотельного моделирования, работы с поверхностями (в том числе свободной формы) и сеточными моделями, создания реалистичных изображений, выполнения анимации и разнесения сборки, проведения инженерного анализа, работы с листовым материалом, выпуска чертежей и подготовки производства (рис. 3.4, рис. 3.5.

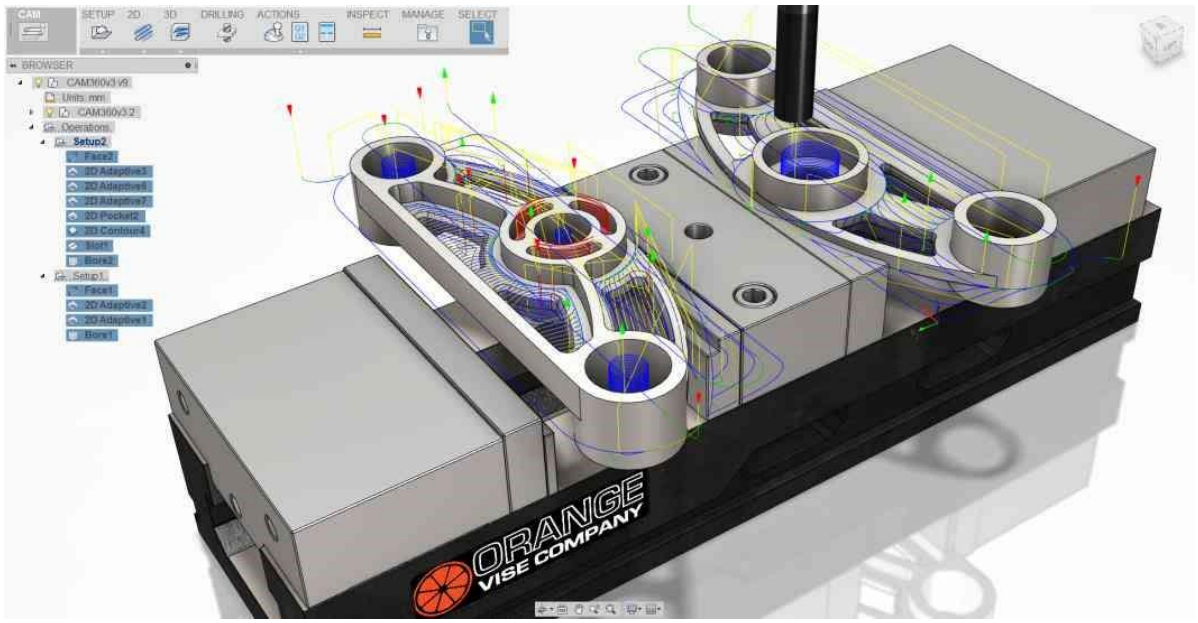


Рис. 3.6. Моделирование движения обрабатывающего инструмента

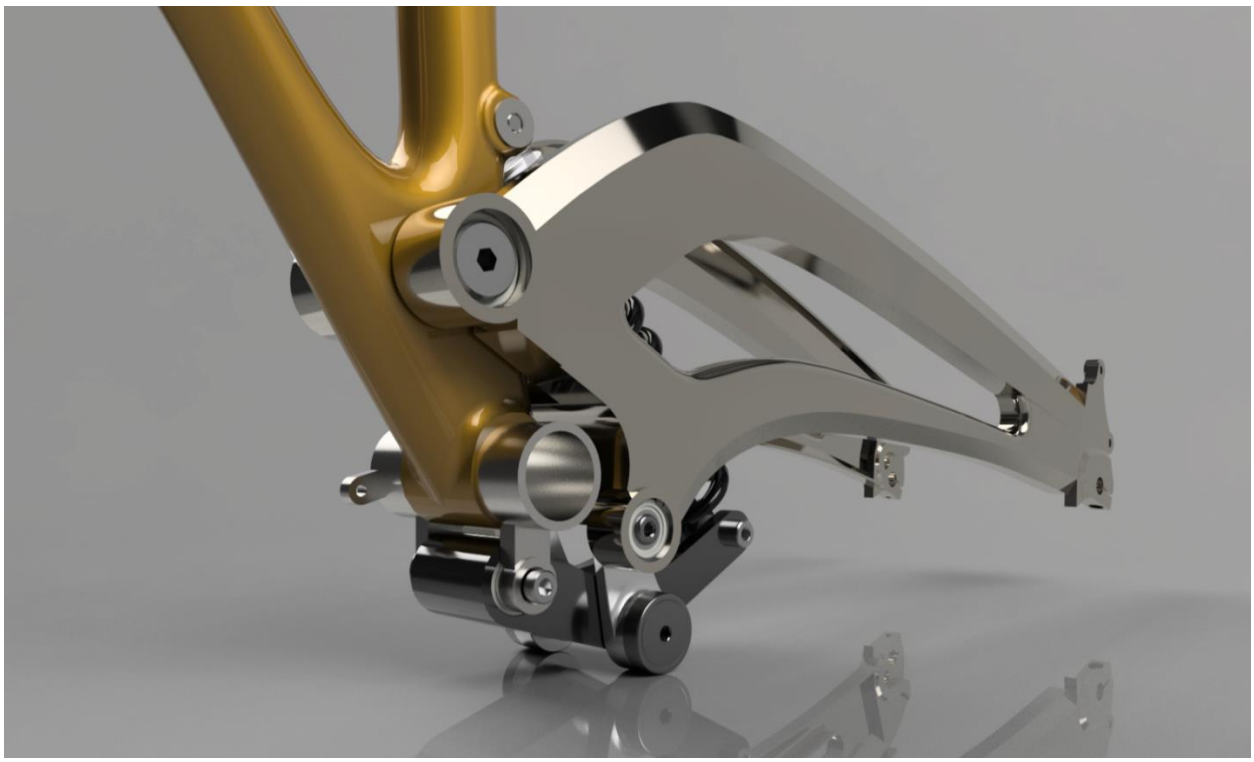


Рис. 3.7. Рендеринг в облаке Fusion 360 (Источник: Autodesk)

Отдельно нужно отметить возможности совместной работы, которые обеспечивает использование Autodesk Fusion:

- доступ к проектам из любой точки, где есть интернет;
- отслеживание версий и изменений;
- синхронный просмотр и обсуждение проектных данных;
- возможность оставлять комментарии к проекту в режиме реального времени;
- доступ с мобильных устройств.

3.1.1.3. Autodesk CFD

Autodesk CFD – это CAE-система, предназначенная для расчетов и моделирования потоков движения жидкостей и газов, а также процессов теплопередачи и тепломассообмена. Программа полностью соответствует российским национальным стандартам ГОСТ и СНИП, имеет все необходимые сертификаты соответствия.

В Autodesk CFD используются продвинутые механизмы непосредственного импорта трехмерной геометрии из различных САПР. Располагая трехмерной моделью, созданной в одной из распространенных CAD-систем, пользователь может открыть ее в Autodesk CFD и использовать как основу для построения расчетной модели (рис. 3.8, рис. 3.9).

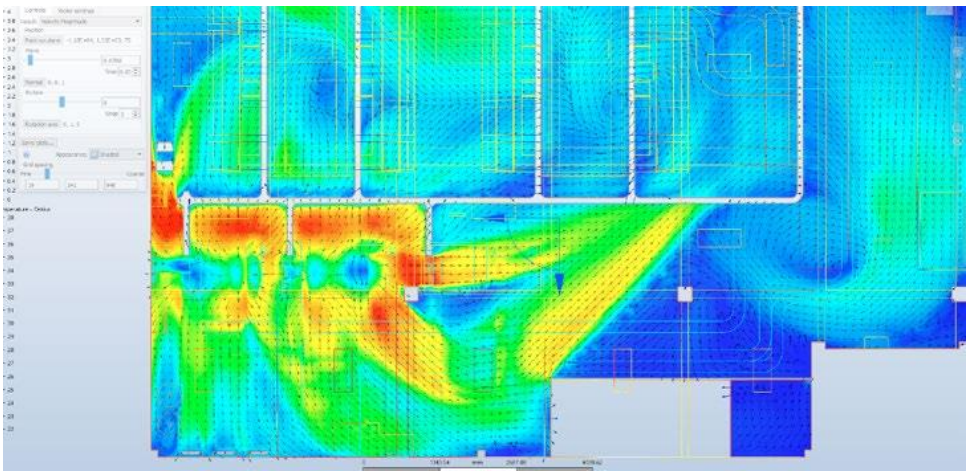


Рис. 3.8. Результаты расчета серверной в Autodesk CFD. Распределение скоростей воздуха под фальшполом
(Источник: ООО «СТЭП ЛОДЖИК»)

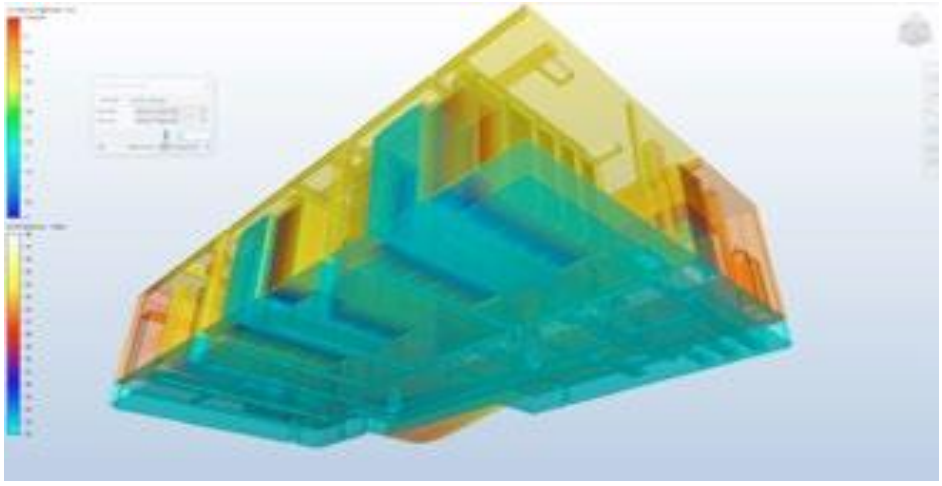


Рис. 3.9. Расчетная модель серверной в Autodesk CFD
(Источник: ООО «СТЭП ЛОДЖИК»)

3.1.1.4. Autodesk Alias

Программный комплекс Autodesk Alias представляет собой эффективный инструмент для моделирования на промышленном уровне – от отдельных поверхностей до общего дизайна транспортных средств. Функциональный набор позволяет создавать техническую документацию, визуализировать любые проекты, выполнять обратное проектирование.

Концептуальное проектирование и моделирование

- **Alias Concept** – создание эскизов, быстрое концептуальное моделирование и визуализация;
- **Alias SpeedForm** – быстрое преобразование 2D-эскизов и кривых в проектные 3D-концепции.

Проектирование и дизайн

- **Alias Surface** – доведенные до совершенства концептуальные модели потребительских товаров и автомобилей преобразуются в поверхности класса А;
- **Alias AutoStudio** – концептуальное моделирование, анализ, моделирование технических поверхностей и визуализация автомобилей.

Для потребителей

- **Alias Design** – разработка и демонстрация 3D-дизайна изделий: от базовых концепций до окончательных поверхностей.

Образцы проектов, разработанных с помощью программного комплекса Autodesk Alias, представлены на рис. 3.10-рис. 3.17.

Рис. 3.10. Гибкие средства моделирования изделий (Источник: компания «ПОИНТ»)

Рис. 3.11. 3D-инструменты скульптора (Источник: компания «ПОИНТ»)

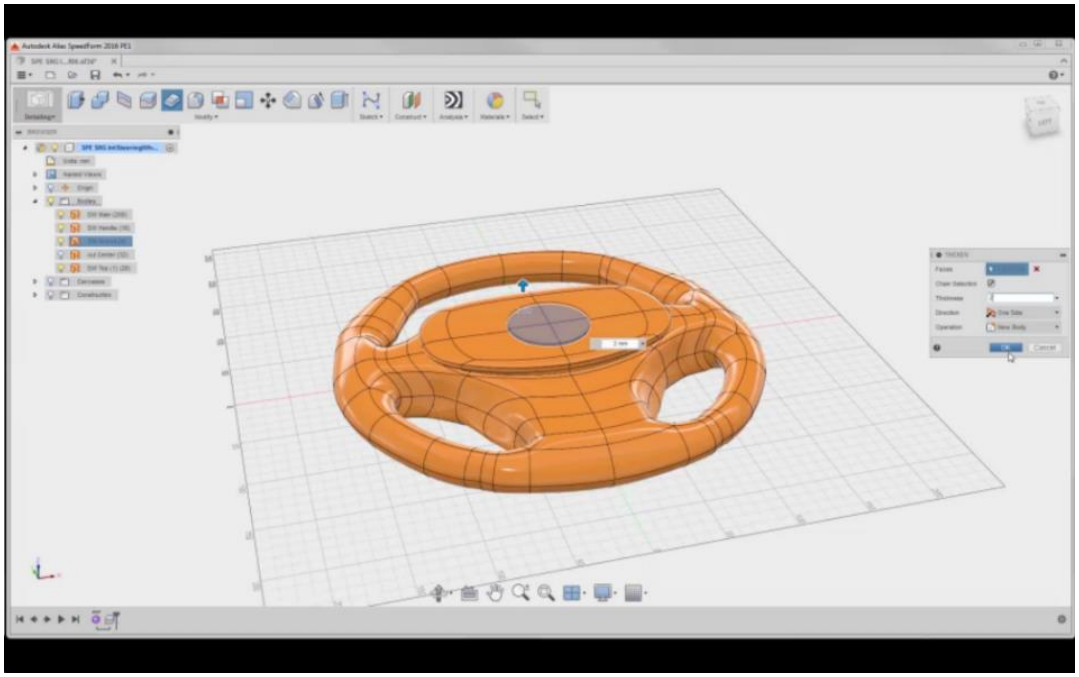


Рис. 3.12. Динамическое моделирование форм (Источник: компания «ПОИНТ»)

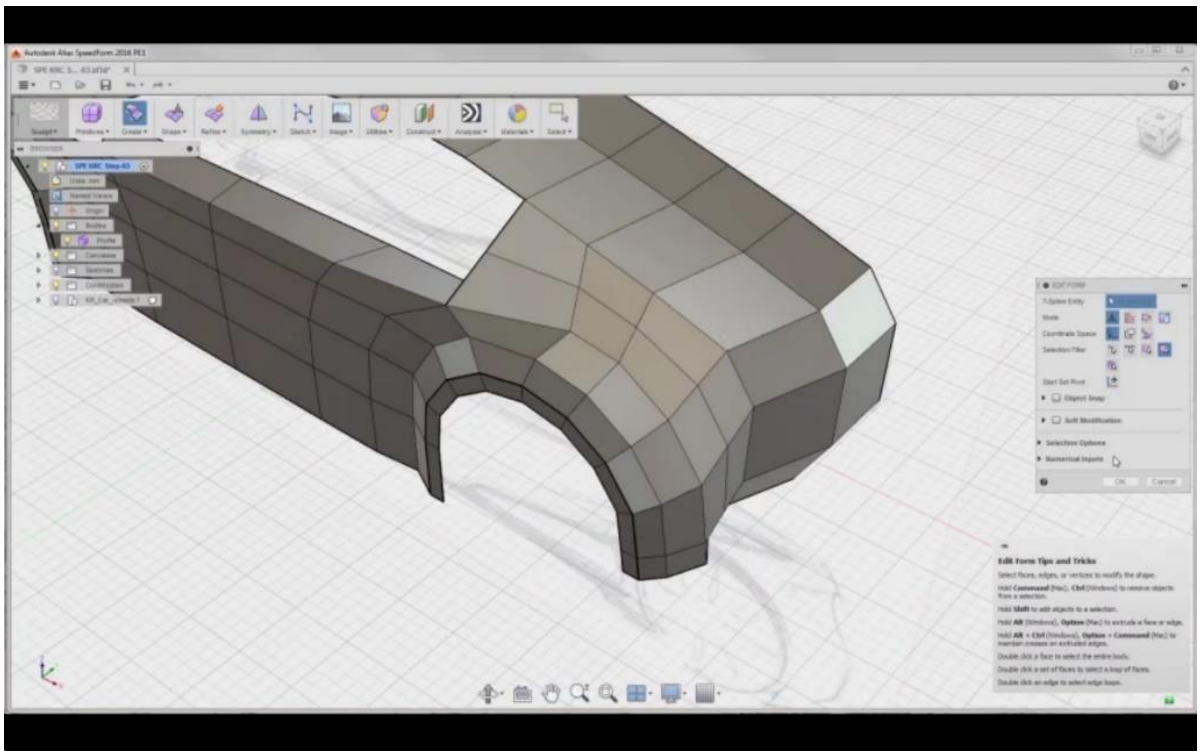


Рис. 3.13. Быстрое концептуальное моделирование (Источник: компания «ПОИНТ»)

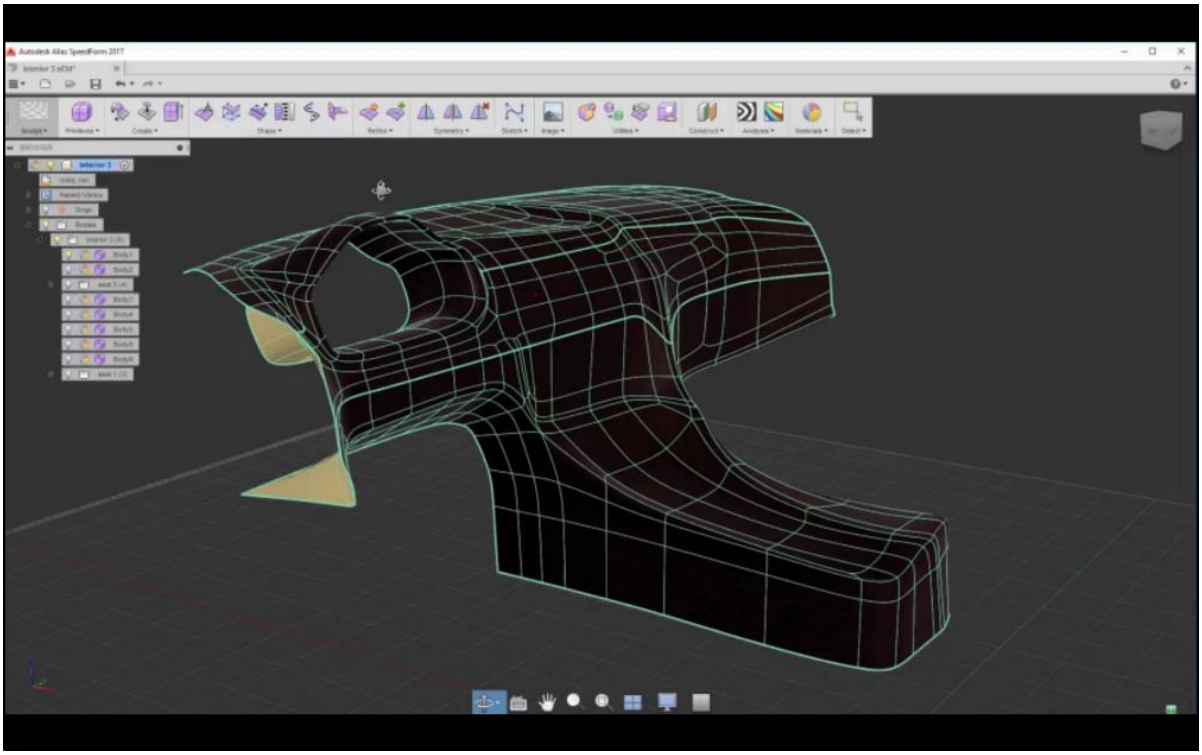


Рис. 3.14. Упрощенное управление вспомогательной геометрией (Источник: компания «ПОИНТ»)

Рис. 3.15. Управление материалами (Источник: компания «ПОИНТ»)

Рис. 3.16. Визуализация проекта в высочайшем качестве (Источник: компания «ПОИНТ»)

Рис. 3.17. Моделирование поверхностей класса А
(Источник: компания «ПОИНТ»)

3.1.1.5. Autodesk VRED

Программа Autodesk VRED разработана для специалистов по промышленному дизайну. В зависимости от версии она востребована при моделировании автомобилей (от оформительских идей до концептуальных моделей) или при создании 3D-презентаций.

Мощные инструменты визуализации

VRED – полноценное решение для подготовки и создания высококачественных изображений трехмерных моделей (рис. 3.18). В арсенале пользователей программы есть все необходимые средства, включая инструменты работы с освещением, оптикой, текстурами, внешним окружением и многое другое.

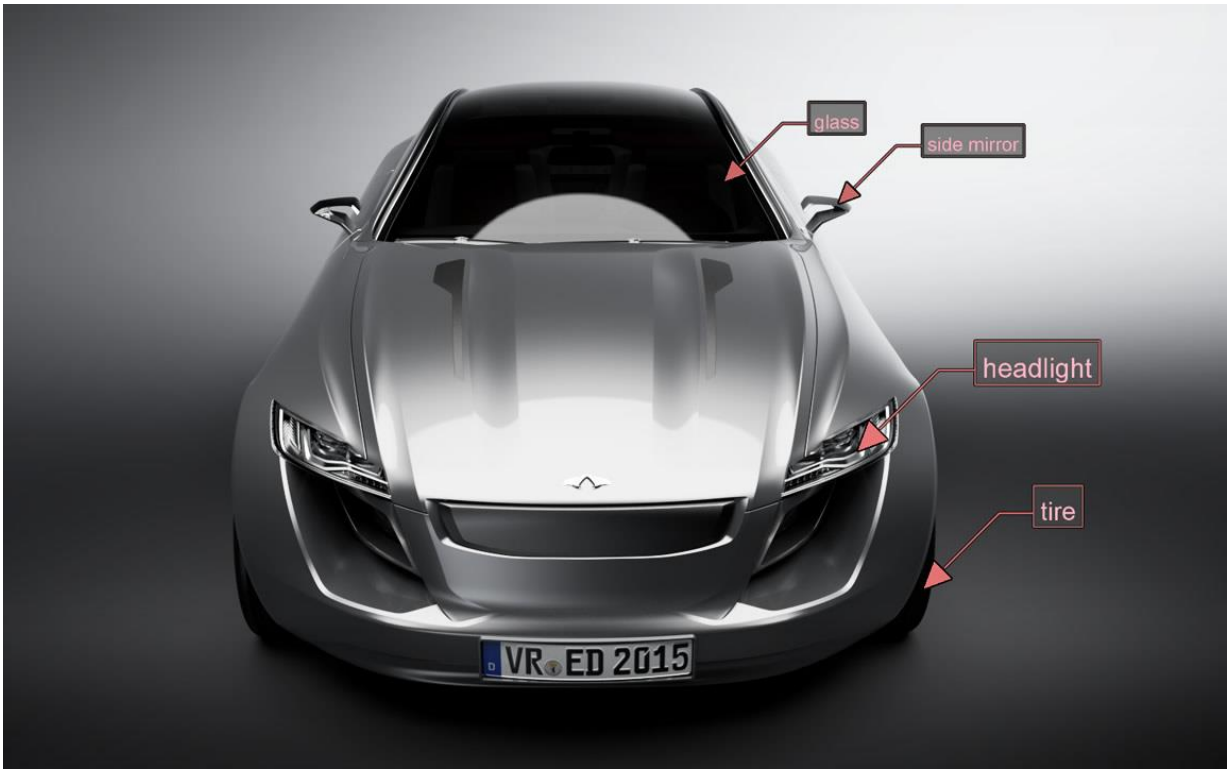


Рис. 3.18. Визуализация в VRED (Источник: компания «ПОИНТ»)

Различные методы рендеринга

Пользователи пакета VRED могут оптимизировать свою работу, используя разные методы рендеринга моделей, выбирая требуемый уровень детализации и время, затрачиваемое на расчет итоговых изображений. Отличительной особенностью программы является то, что она позволяет работать с моделью даже во время проведения рендеринга.

Библиотека материалов

В стандартную поставку VRED входит обширная библиотека материалов, что избавляет пользователей от необходимости создавать собственные библиотеки и позволяет заниматься непосредственно работой, а не настройкой программного обеспечения. Библиотека полностью открыта, доступна для редактирования и добавления новых материалов.

Встроенные инструменты изменения геометрии

VRED обладает всеми необходимыми инструментами для корректировки трехмерных моделей – как поверхностных, так и сеточных. С их помощью можно выполнять операции заливки отверстий, перемещать грани, обращать нормали поверхностей и многое другое.

Расчет оптических систем

Качественный расчет оптических эффектов – отличительная особенность VRED. Мощное расчетное ядро способно создавать достоверные реалистичные изображения светотехники автомобилей, точно визуализировать оптические приборы и системы (рис. 3.19).

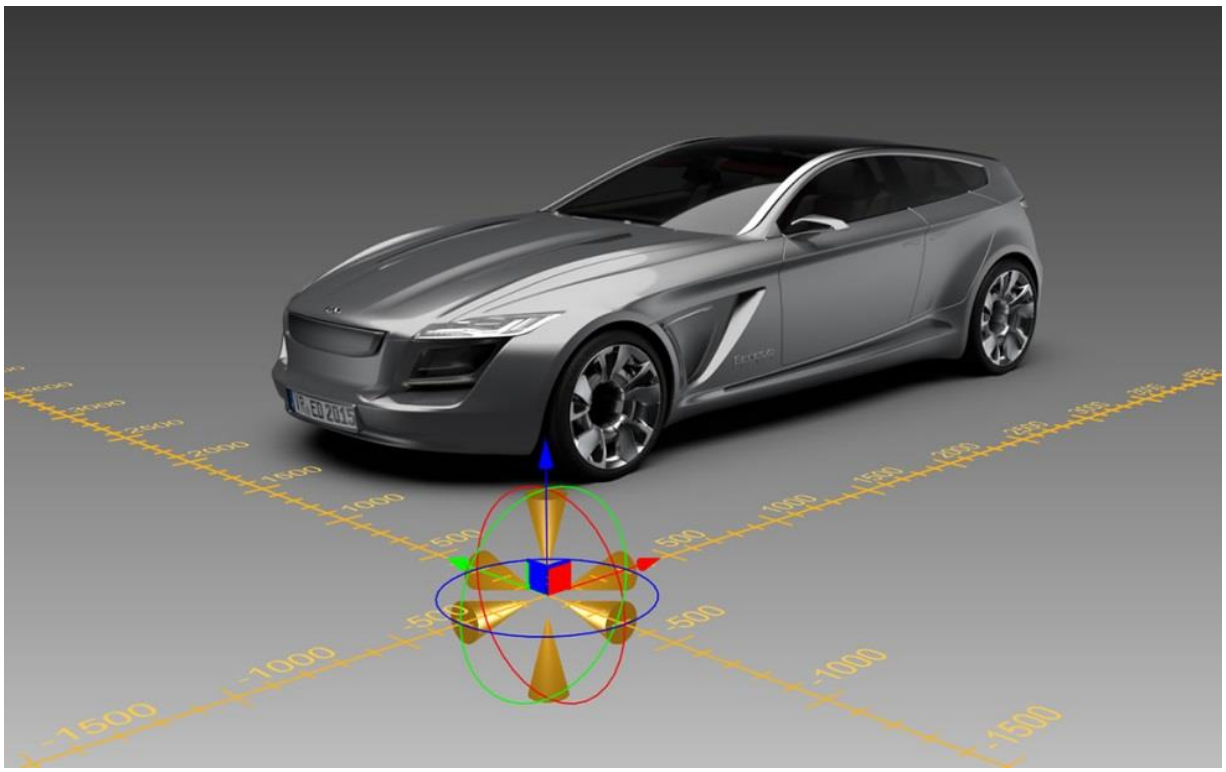


Рис. 3.19. Пример интерфейса расчета оптической системы (Источник: компания «ПОИНТ»)

Средства анализа геометрии

Комплекс VRED содержит в себе все необходимые инструменты для анализа трехмерной геометрии, позволяющие оценить кривизну поверхностей, гладкость, непрерывность и прочие параметры.

Измерения, сетки и линейки

Полноценный набор средств изменения размеров и пропорций трехмерных моделей.

Различные варианты представления проектов

Средства представления продуктов в нескольких вариантах, включая различные цвета, текстуры и окружение.

Импорт моделей из Autodesk Alias

Пользователям предоставлена возможность прямого импорта моделей из пакета Autodesk Alias, что позволяет уменьшить количество ошибок и сократить время разработки.

Простой и продуманный интерфейс

VRED позволяет легко и быстро освоить продукт, сократив время на обучение и адаптацию специалистов в области визуализации проекта (рис. 3.20).

Рис. 3.20. Интерфейс пакета VRED (Источник: компания «ПОИНТ»)

Управление поведением моделей

В программе очень легко управлять поведением трехмерных моделей с помощью инструментов автоматического или интерактивного перемещения объектов, их геометрической модификации и смены визуальных параметров (рис. 3.21).

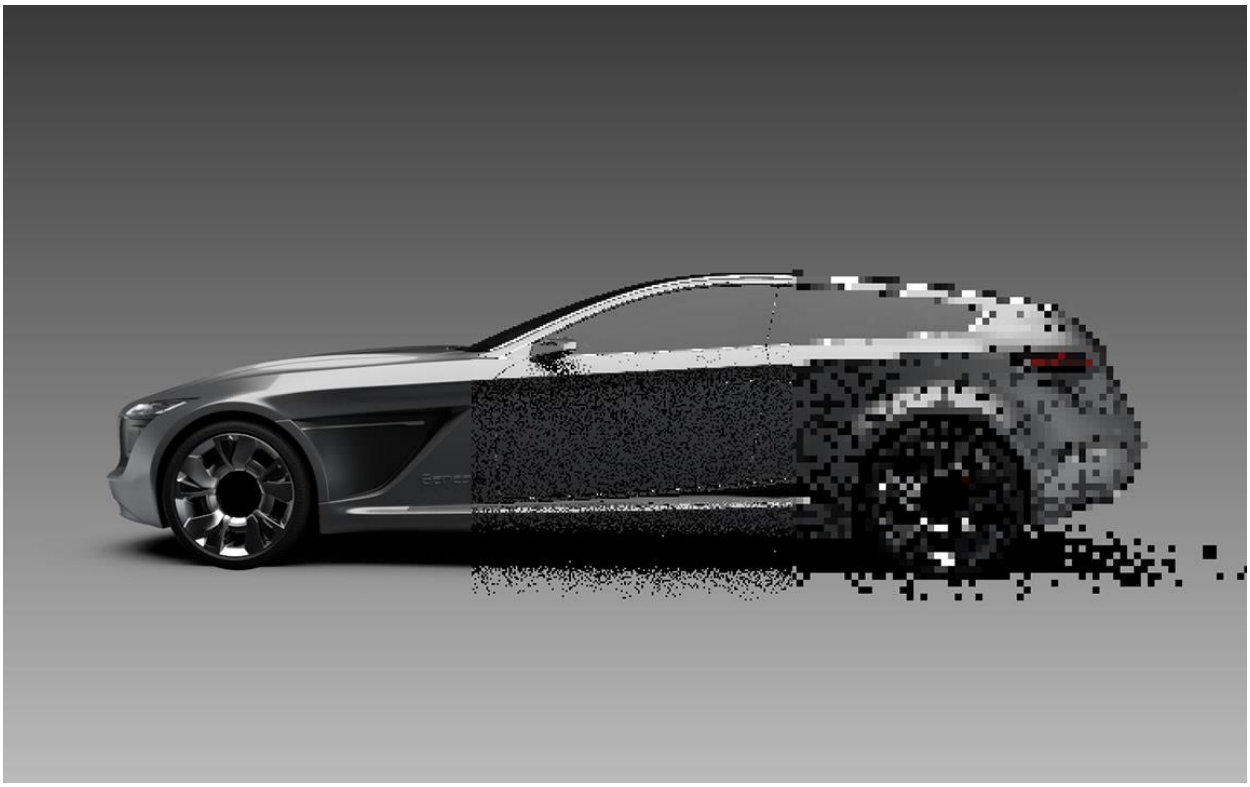


Рис. 3.21. Управление поведением модели в VRED (Источник: компания «ПОИНТ»)

Работа с внешними средами

VRED обладает встроенной полнофункциональной библиотекой внешних окружений. Кроме того, пользователи могут создавать собственные среды и предустановленные сцены.

Настройка и управление камерами

В Autodesk VRED очень удобно реализована работа с камерами. С помощью простых инструментов пользователь может легко настраивать параметры камер, создавать и редактировать траектории движения, обрабатывать и учитывать коллизии и многое другое.

Аннотации для трехмерных моделей

Для совместной работы над проектами и проведения презентаций заказчикам реализованы инструменты нанесения аннотаций на трехмерные модели.

Поддержка VR-устройств Oculus Rift

VRED поддерживает работу с устройствами виртуальной реальности Oculus Rift. Кроме того, используя приложение VRED app, вы можете использовать свой смартфон или планшет как удобное средство управления демонстрациями проекта.

3.2. Генеративный дизайн в Fusion 360

В настоящее время функции генеративного дизайна (рис. 3.22) доступны в таких продуктах Autodesk, как Netfabb Ultimate и Fusion 360.

С точки зрения пользователя принцип работы этой технологии проектирования Autodesk достаточно прост. Конструктор задает объем, в котором системе разрешено производить поиск решения, указывает неприкосновенные для изменения зоны, препятствия, которые необходимо огибать, крепежные и рабочие участки детали, а также условия функционирования детали – закрепления и действующие на деталь нагрузки. Далее задача отправляется на решение – в облако Autodesk. Пока облако ищет возможные варианты, конструктор и его компьютер полностью свободны и могут заниматься другими творческими задачами. Как только система закончит поиск решений, она уведомит об этом пользователя и предоставит ему для просмотра все найденные варианты геометрии детали. От конструктора потребуется лишь выбрать наиболее подходящие – по массе, прочности, допустимым деформациям, технологичности и другим критериям. Далее останется только, при необходимости, доработать деталь в САПР и/или ЧПУ-решениях Autodesk, проанализировать ее в расчетных программах Autodesk и подготовить к производству.

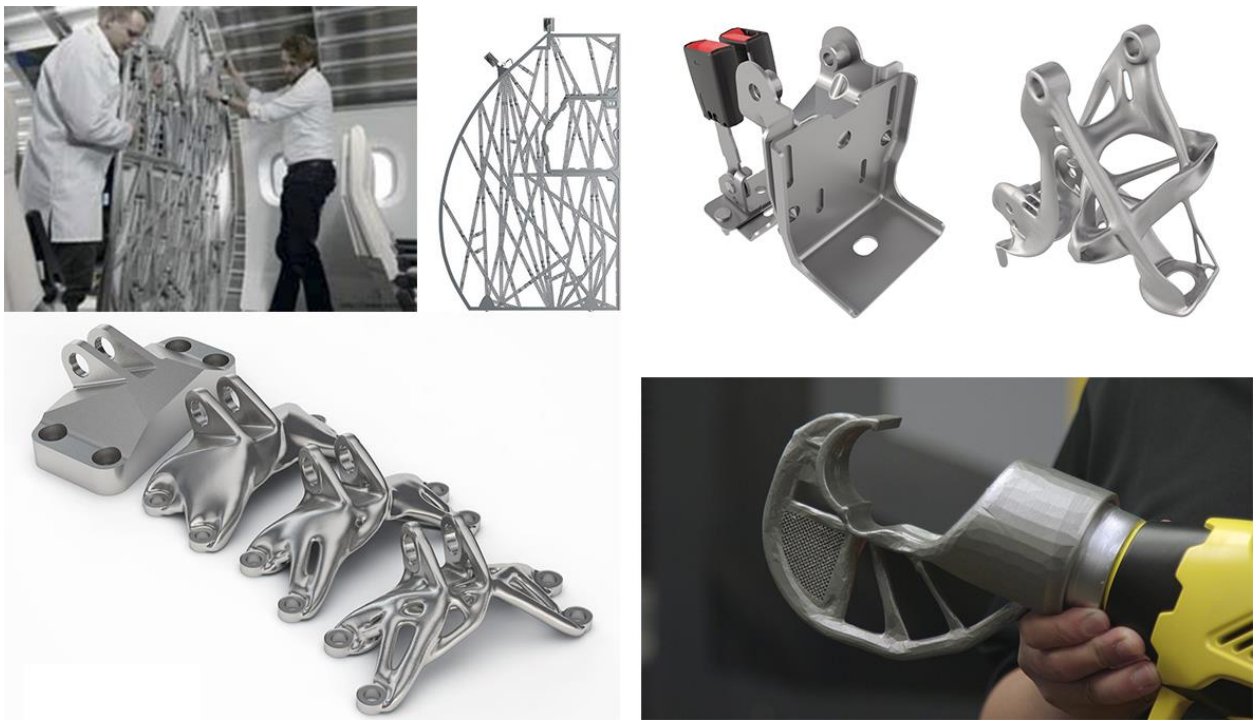


Рис. 3.22. Примеры моделей изделий, полученных при помощи технологии генеративного дизайна

По сравнению с деталями, которые изготавливаются при помощи средств «традиционного» 3D-моделирования, масса деталей может быть уменьшена до 10 раз – при условии сохранения тех же значений запаса прочности, износостойкости и иных ограничений (рис. 3.23, рис. 3.24).

Рис. 3.23. Оптимизация формы кронштейна при помощи генеративного дизайна

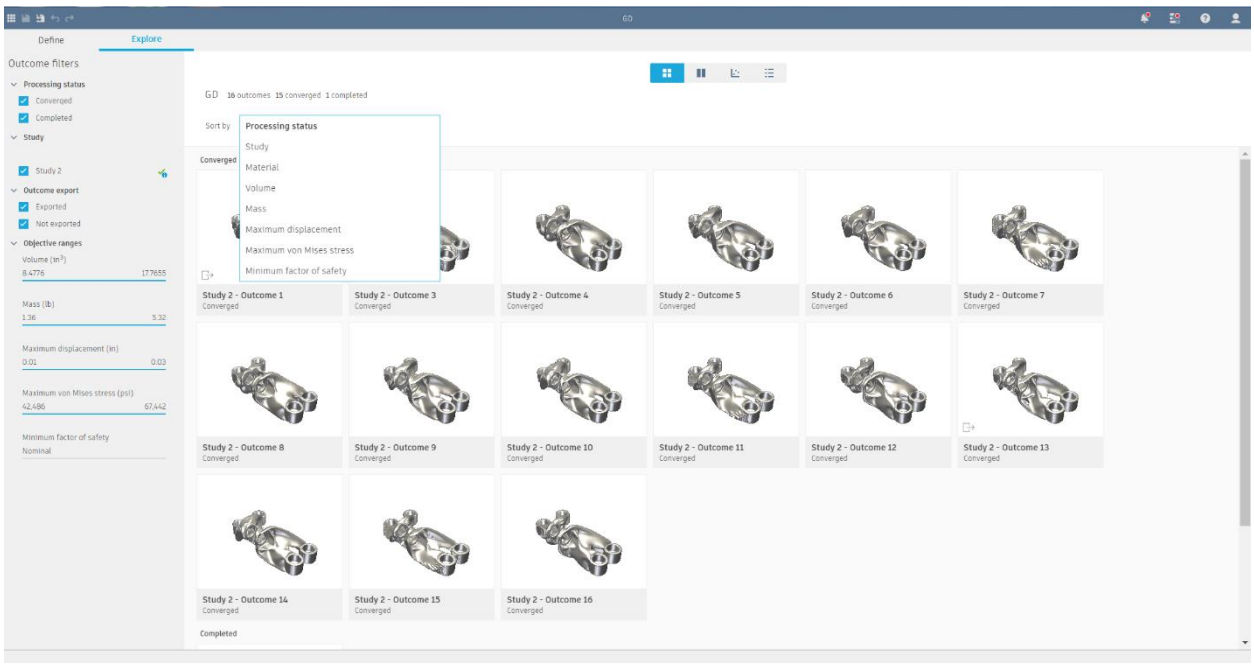


Рис. 3.24. Варианты исполнения изделия, выданные технологией генеративного дизайна во Fusion 360

Авиационный гигант Airbus и производитель программного обеспечения для проектирования Autodesk совместно реализуют уникальный проект по снижению веса отдельных элементов гражданских самолетов. В частности, партнеры модернизировали дизайн одного из элементов салона лайнера Airbus A320 – перегородку между пассажирским салоном и отсеком бортпроводников (Рис. 3.25).

Это обычная на первый взгляд стенка внутри самолета; к ней крепятся откидные сидения, которыми пользуются члены экипажа во время полета. Однако этот элемент конструкции должен быть очень прочным, что делает его вес при производстве традиционными методами высоким.

Airbus и Autodesk совместно разработали новую структуру для перегородки. В ее основе своеобразная сеть из металлических частей, геометрия которых рассчитана в специальном программном продукте Autodesk с учетом прочностных требований к конструкции. Конструкция была изготовлена по частям с помощью технологии селективного лазерного плавления порошков. Материал – сплав Scalmalloy.

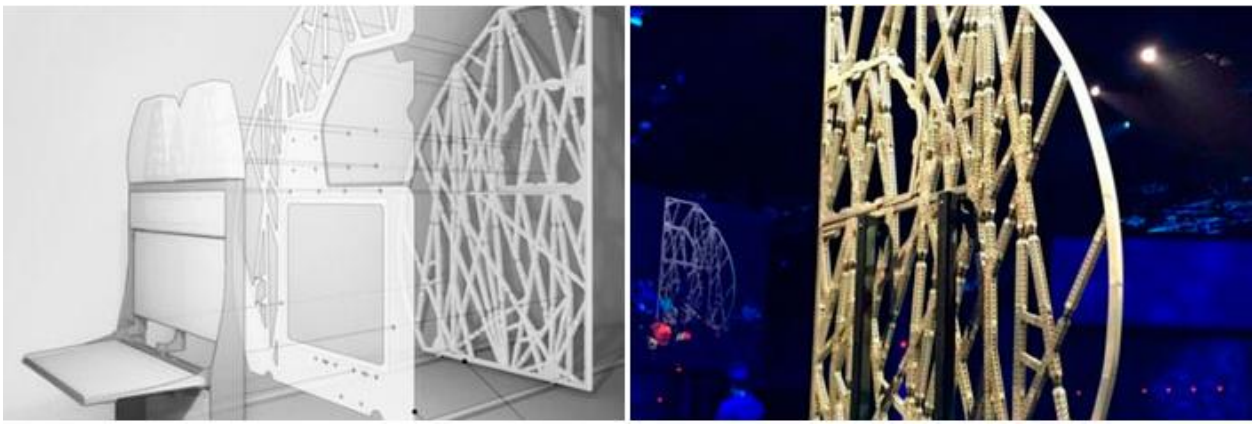


Рис. 3.25. Проект Airbus на технологиях Autodesk

Volkswagen с помощью облачной платформы Autodesk Fusion 360 создал концепт электрокара Volkswagen на базе классического микроавтобуса 1962 года выпуска (рис.

3.26). Пока разработчикам удалось уменьшить вес колес на 18%, а также снизить эффект трения на шины. Также в компании отметили, что искусственный интеллект позволит ускорить создание проекта автомобиля: вместо первоначально запланированных полутора лет потребуется лишь несколько месяцев. Использование генеративного дизайна упростит работу инженеров и сократит объемы рутинной работы.

Рис. 3.26. Концепт электрокара Volkswagen на базе классического микроавтобуса 1962 года выпуска

Лаборатория реактивных двигателей NASA и инженеры компании Autodesk показали посадочный модуль, спроектированный для исследования спутников Сатурна и Юпитера (рис. 3.27, 3.28).

Команда разработала аппарат с помощью технологии генеративного дизайна. Сначала были заданы ограничения: например, программа искусственного интеллекта могла работать только с определенными материалами и только в соответствии с ожидаемыми условиями окружающей среды. Затем программа вывела проект, соответствующий этим ограничениям.

После почти шести недель работы инженеры остановились на паукоподобном дизайне, который затем и сконструировали для изготовления при помощи технологии послойного синтеза. Создан модуль в основном из алюминия, его длина – 2,3 м, а высота – почти метр 8.

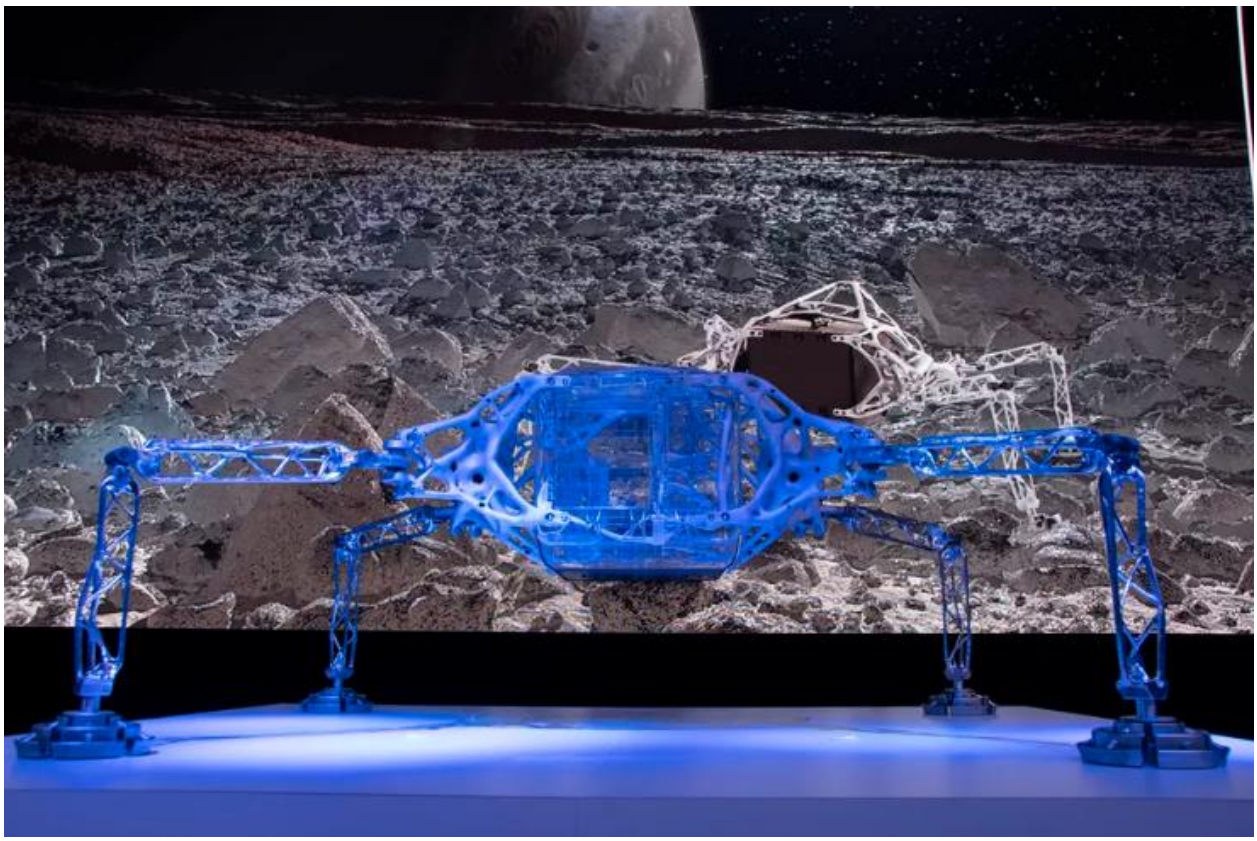


Рис. 3.27. Посадочный модуль

Рис. 3.28. Шасси посадочного модуля в процессе изготовления

Сотрудники голландской компании MX3D закончили производство несущей основы моста (рис. 3.27, который планируется установить в Амстердаме. При изготовлении моста использовались ПО Autodesk и технология WAAM – наплавление металлического прутка промышленным роботом-манипулятором 12, 32.

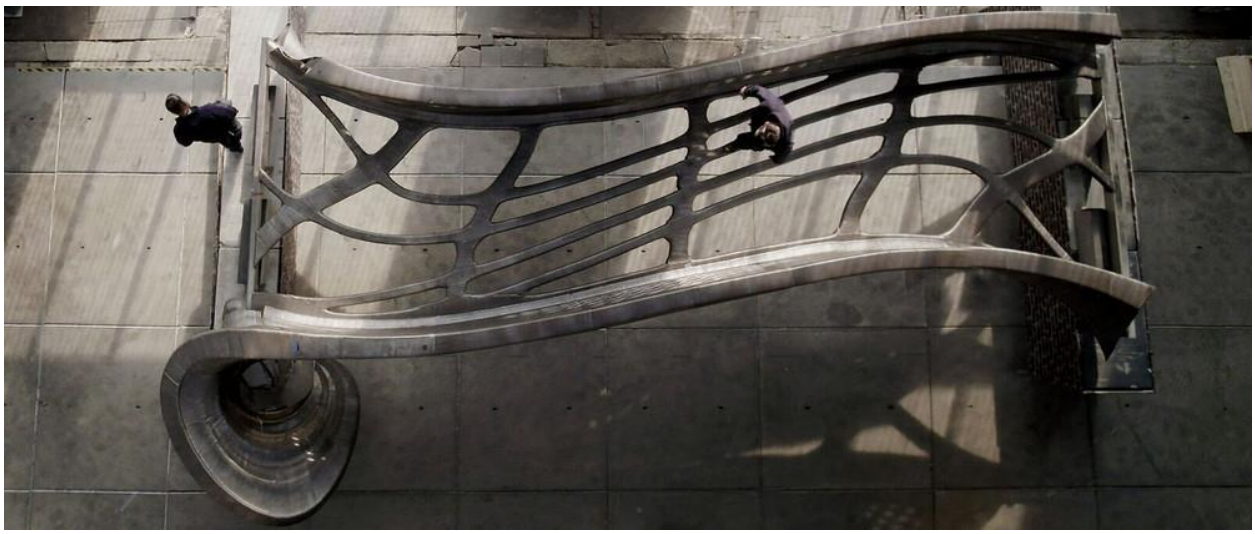


Рис. 3.29. Несущая основа моста

Поддержка традиционных методов субтрактивной обработки во Fusion 360

Как уже было сказано в разделе, посвященном подготовке производства (2.2.3.6), сильной стороной ПО для генеративного дизайна служит возможность адаптировать конструкцию изделия под возможности традиционных субтрактивных методов обработки. В частности, новейшие версии Fusion 360 поддерживают методы многоосевой механообработки (2/2.5/3/5-осевая обработка и их комбинации), что показано на Рис. 3.30-Рис. 3.32.

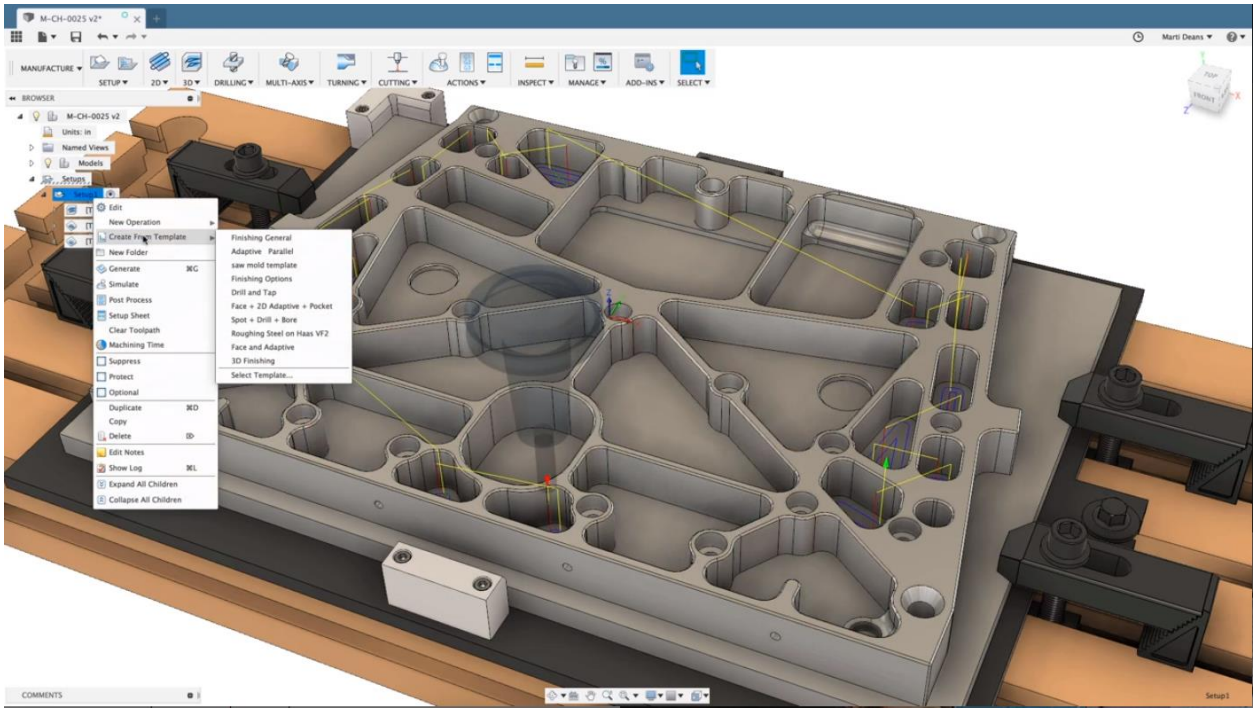


Рис. 3.30. Поддержка 2,5- и 3-осевой обработки во Fusion 360

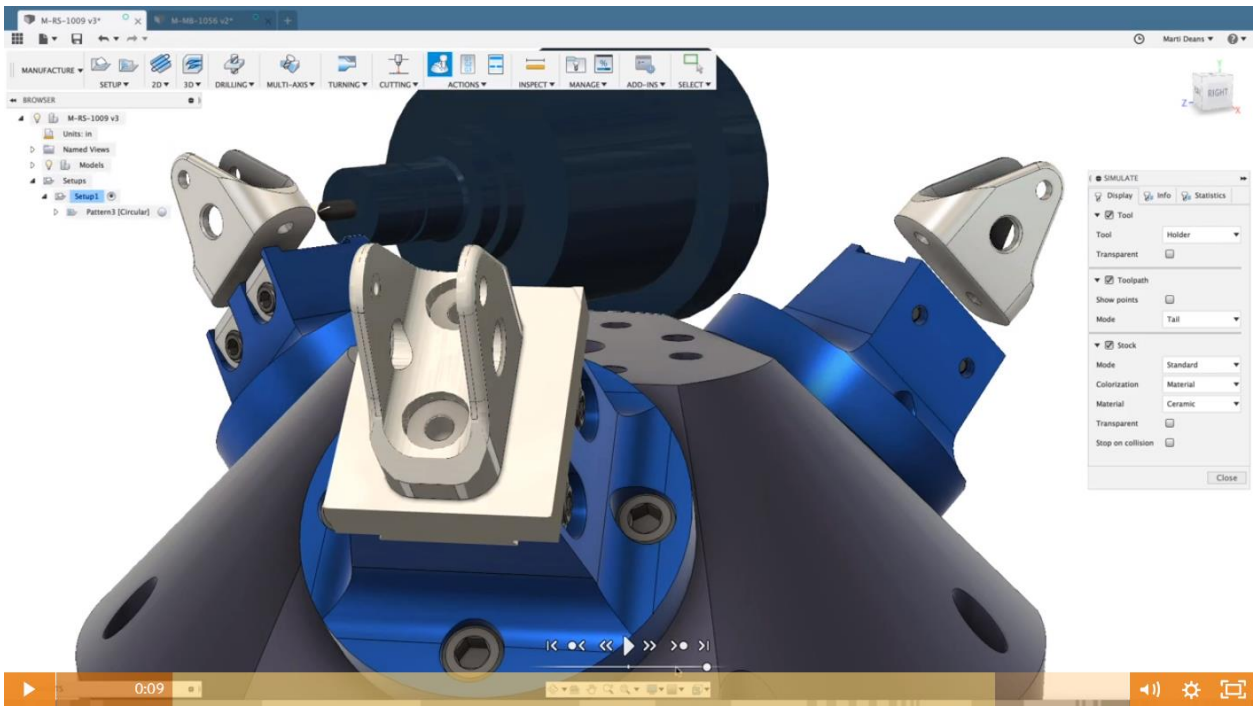


Рис. 3.31. Поддержка 3+2-осевой обработки во Fusion 360

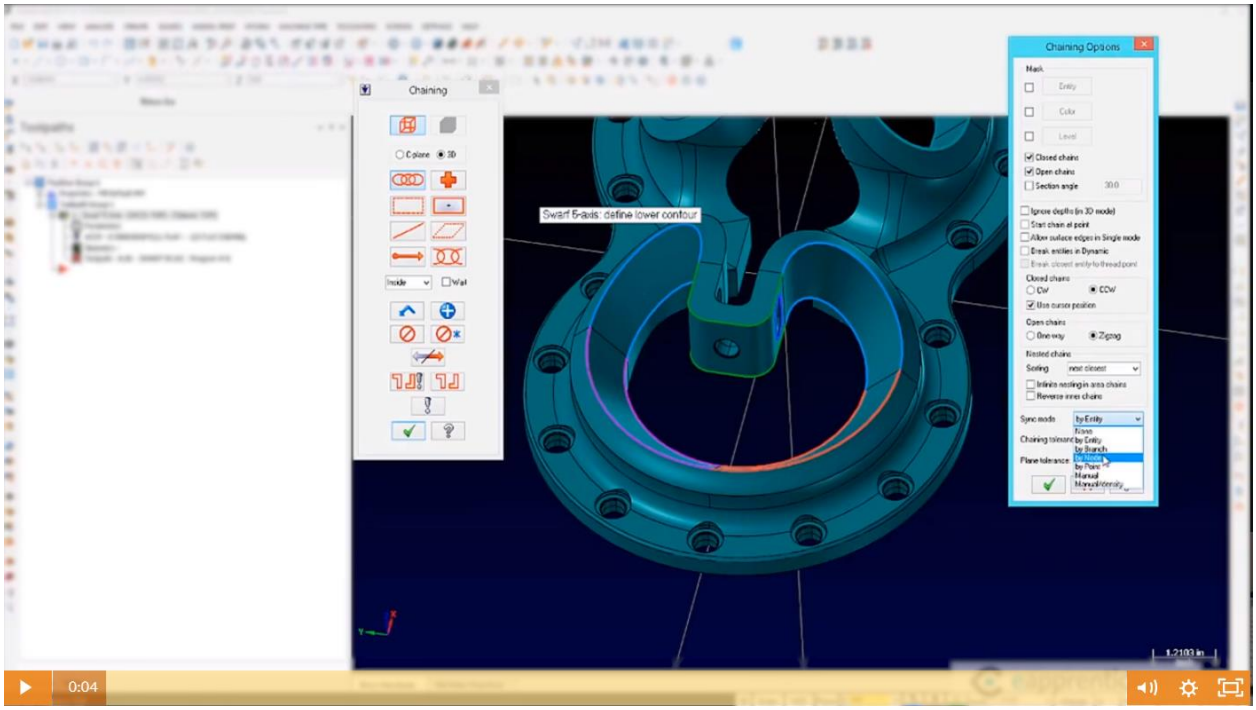


Рис. 3.32. Поддержка 5-осевой обработки во Fusion 360

3.3. PDM-система Vault как связующее звено блоков цифрового инжиниринга и средство организации среды коллективной разработки

Во второй главе уже было сказано, насколько важную роль в выстраивании правильной технологии проектирования и производства при переходе к технологиям Индустрии 4.0 играет современная система инженерного документооборота. Практика показывает, что создавать информационно насыщенные изделия невозможно, используя потенциал одной только файловой системы. Для правильной организации процессов нужен

инструмент, позволяющий организовать выдачу и контроль заданий, внесение изменений в документацию, контроль доступа, инструменты аналитики и отчетов. Таким инструментом в портфеле Autodesk является Autodesk Vault.

Система управления проектами и инженерными данными Autodesk Vault предназначена для организации и автоматизации проектных работ на предприятиях. Она способна обеспечить бесперебойную работу над проектом неограниченного числа пользователей, в том числе территориально удаленных друг от друга. Средства описания и контроля разработки и согласования документов, инструменты задания последовательности работ, автоматическое отслеживание изменений в документах – все это гарантирует единство и сохранность проектных данных, способствует ускорению и повышению прозрачности рабочих процессов.

Применение Autodesk Vault заметно сокращает риск появления ошибок, повышает эффективность работы проектировщиков. Процесс управления прост и логичен – понятный интерфейс позволяет легко ориентироваться в программном обеспечении, а единая база данных предоставляет доступ ко всем деталям.

Программа предлагает следующий набор функций:

- единая среда хранения любых проектных данных;
- удобная совместная работа сотрудников любых отделов;
- высокая безопасность ведения проектов и отслеживание всей истории изменений;
- интеграция с другими продуктами Autodesk для проектирования и визуализации;
- простой и понятный электронный документооборот;
- одновременная работа нескольких специалистов над единым проектом;
- встроенная поддержка выгрузки результатов в форматы Microsoft Office (таблицы, презентации);
- масштабируемая система, позволяющая объединять удаленные проектные группы.

Расширенные сведения об Autodesk Vault и дополнительная информация о работе в системе находятся в разделах справочной информации Autodesk Vault 2020.

Примеры проектов, управляемых с использованием системы Autodesk Vault, представлены на рис. 3.33-рис. 3.39.

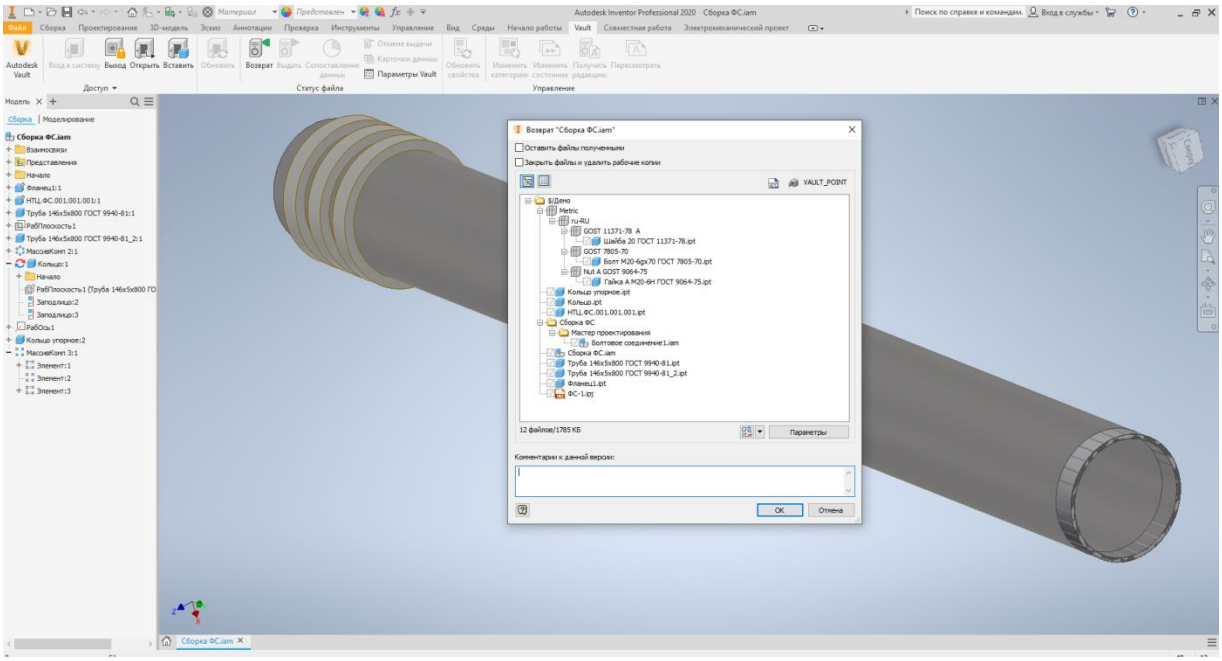


Рис. 3.33. Работа в интегрированном режиме с Autodesk Inventor (сохранение сборки)

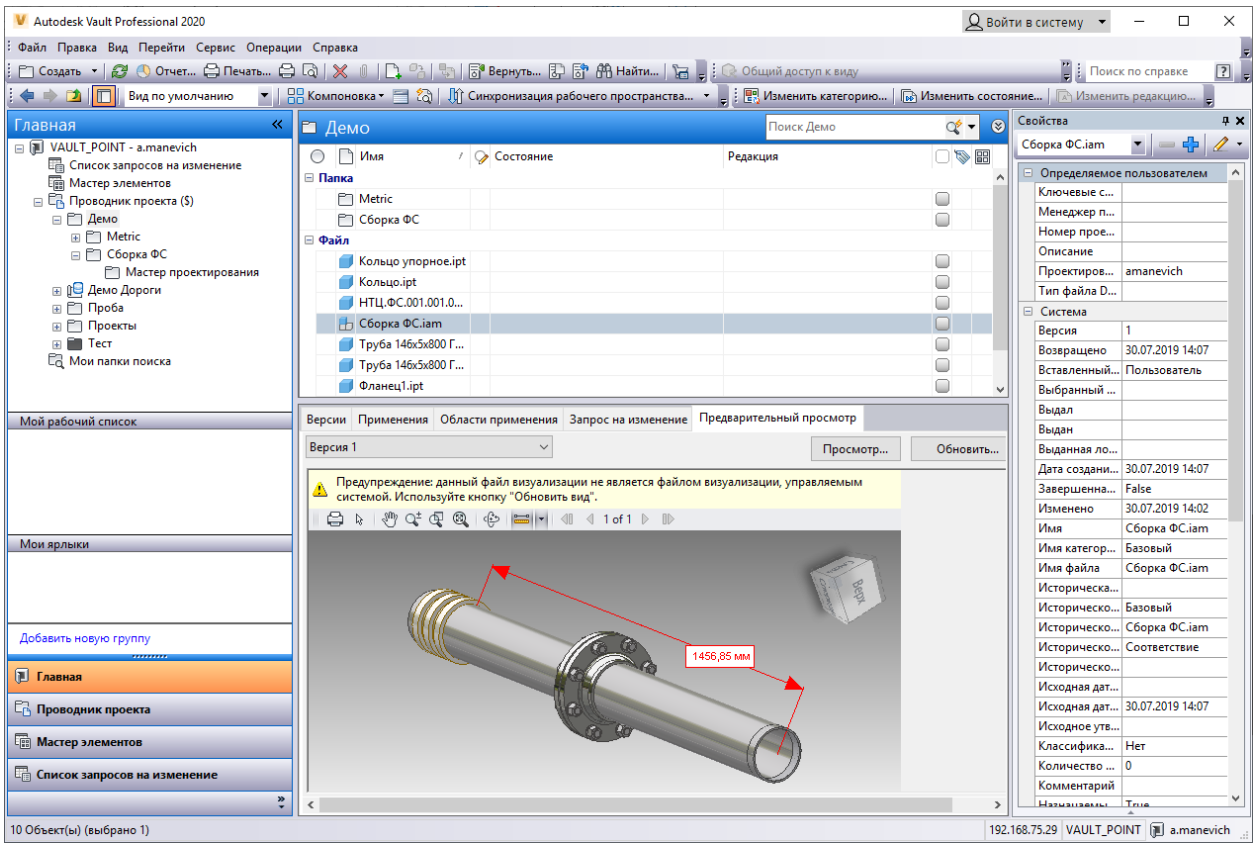


Рис. 3.34. Инструменты визуализации и аннотирования для не-САПР пользователей

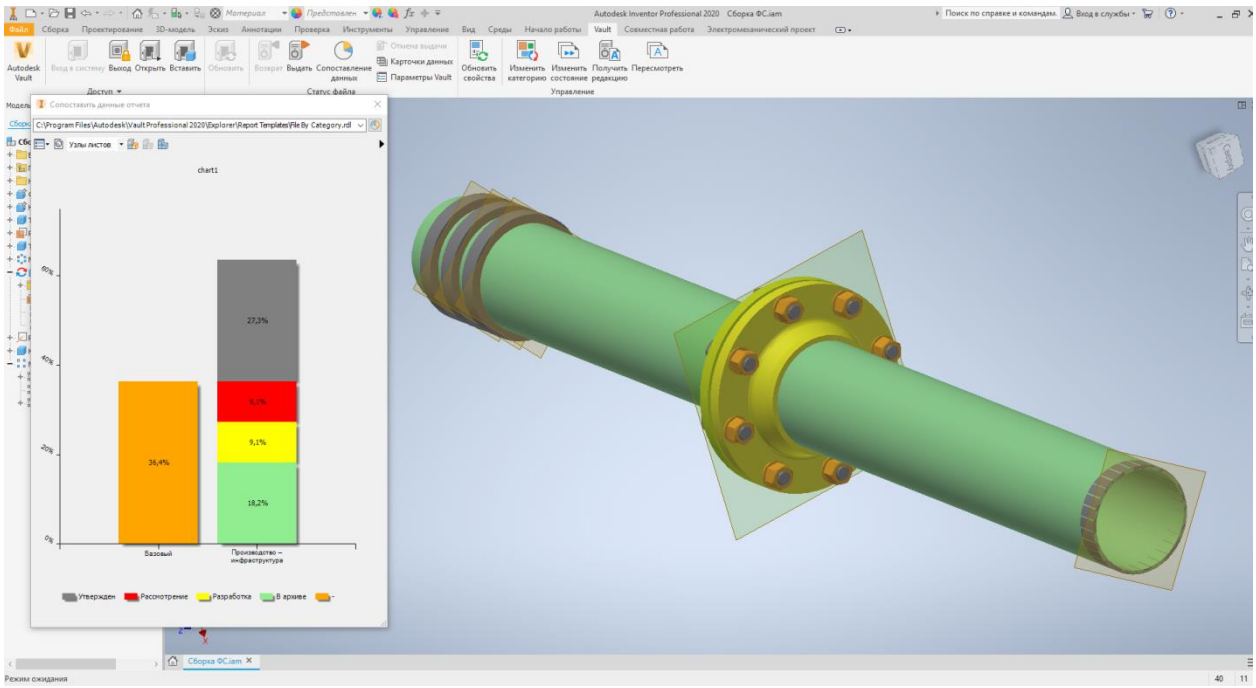


Рис. 3.35. Динамические отчеты, встроенные в САПР

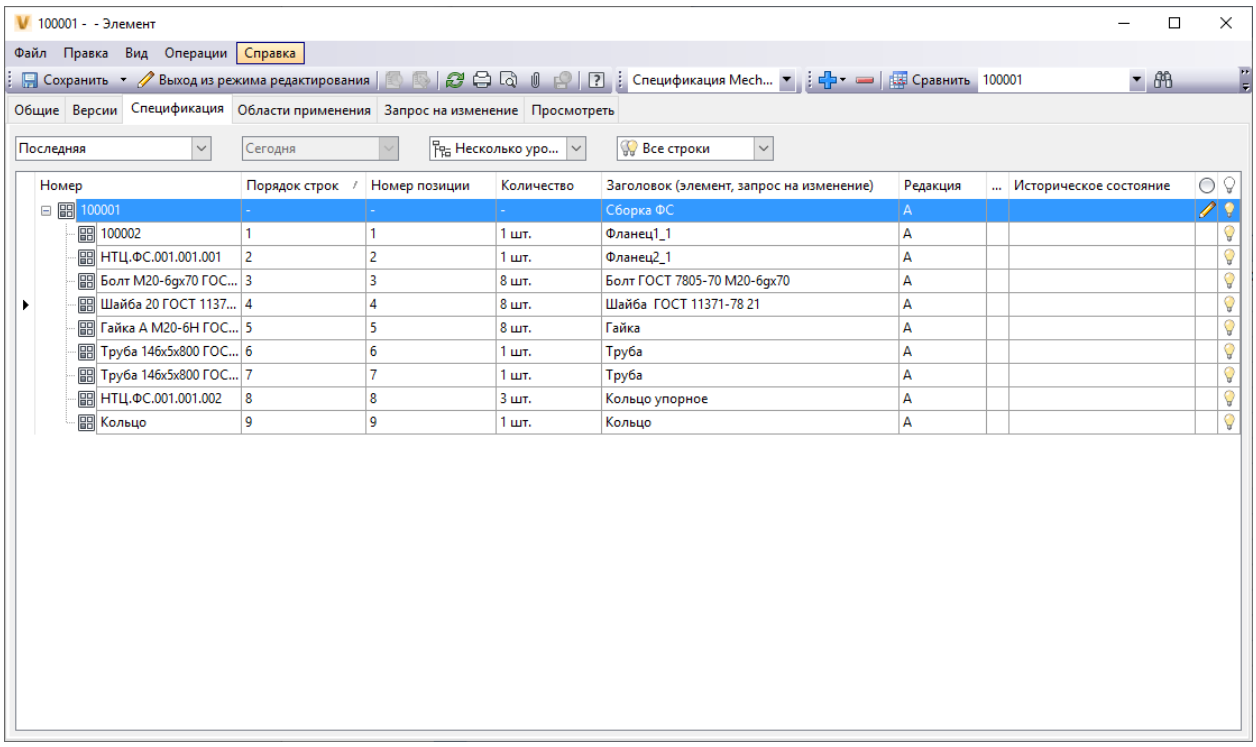


Рис. 3.36. Построение отчета-спецификации

	A	B	C	D
1	Номер	Заголовок (элемент, запрос на из	Единицы	Количество
2	АТ-202.06.23.23.01	АТ-202.06.23.23.01.iam	шт.	-
3	100001	АТ-202.06.23.23.01.ipt	шт.	1
4	АТ-202.06.23.23.04	АТ-202.06.23.23.04.ipt	шт.	1
5	АТ-202.06.23.23.06	АТ-202.06.23.23.06.ipt	шт.	1
6	АТ-202.06.23.23.07	АТ-202.06.23.23.07.ipt	шт.	1
7	Шайба 8 L ГОСТ 6402-70	Шайба ГОСТ 6402-70 8 L	шт.	2
8	Болт 2 М8-6g?20(S13) ГОСТ 7798-70	Болт	шт.	2
9	АТ-202.06.23.23.02	АТ-202.06.23.23.02.ipt	шт.	2
10	АТ-202.06.23.23.03	АТ-202.06.23.23.03.ipt	шт.	2
11	АТ-202.06.23.23.05	АТ-202.06.23.23.05.ipt	шт.	4
12	АТ-202.06.23.23.11	АТ-202.06.23.23.11.ipt	шт.	1
13	АТ-202.06.23.23.13	АТ-202.06.23.23.13.ipt	шт.	1
14	Крышка торцовая 1-130x102 ГОСТ 11641-73	Крыщка	шт.	2
15	АТ-202.06.23.23.12	АТ-202.06.23.23.12.ipt	шт.	1
16	Винт М12x1.25-6gx20 ГОСТ 1491-80	Винт 2 ГОСТ 1491-80 М12 x 1.25 x 2(	шт.	12
17	АТ-202.06.23.23.10	АТ-202.06.23.23.10.ipt	шт.	2
18	Шайба 16Л ГОСТ 6402-78	Шайба	шт.	8
19	Болт 2 М16-6g?30(S24) ГОСТ 7798-70	Болт	шт.	8
20	Винт А2.М12-6gx20 ГОСТ 1477-93	Винт	шт.	1
21				

Рис. 3.37. Выгрузка спецификации в Excel

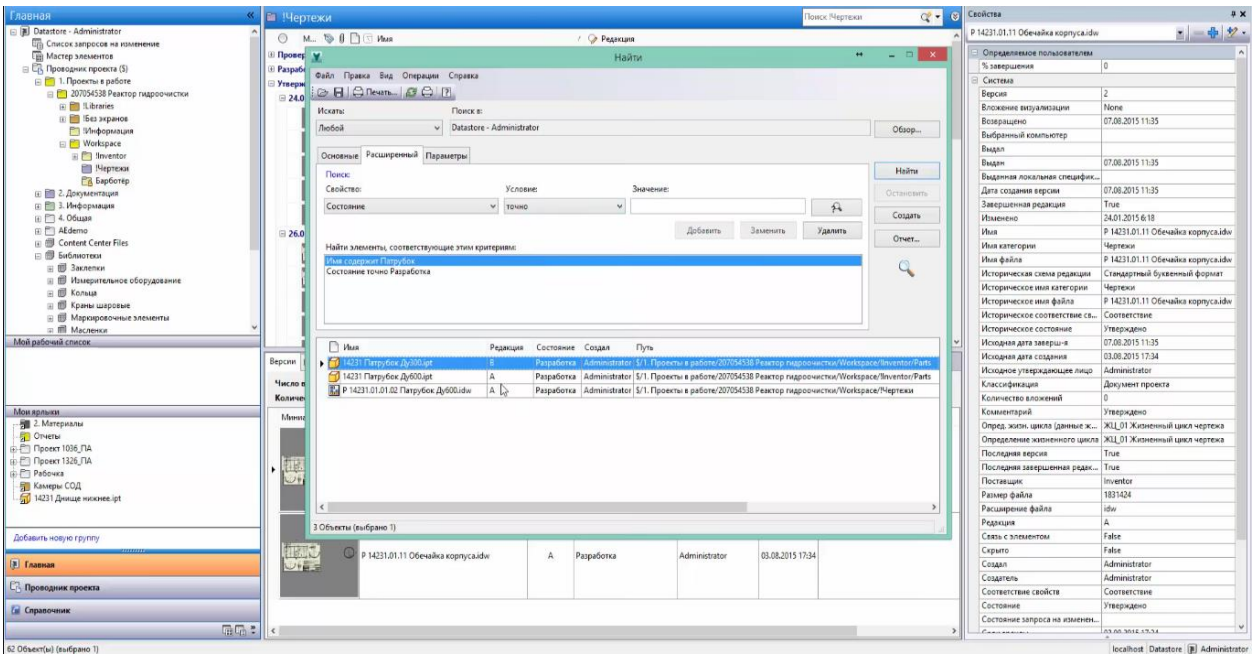


Рис. 3.38. Расширенный поиск в хранилище

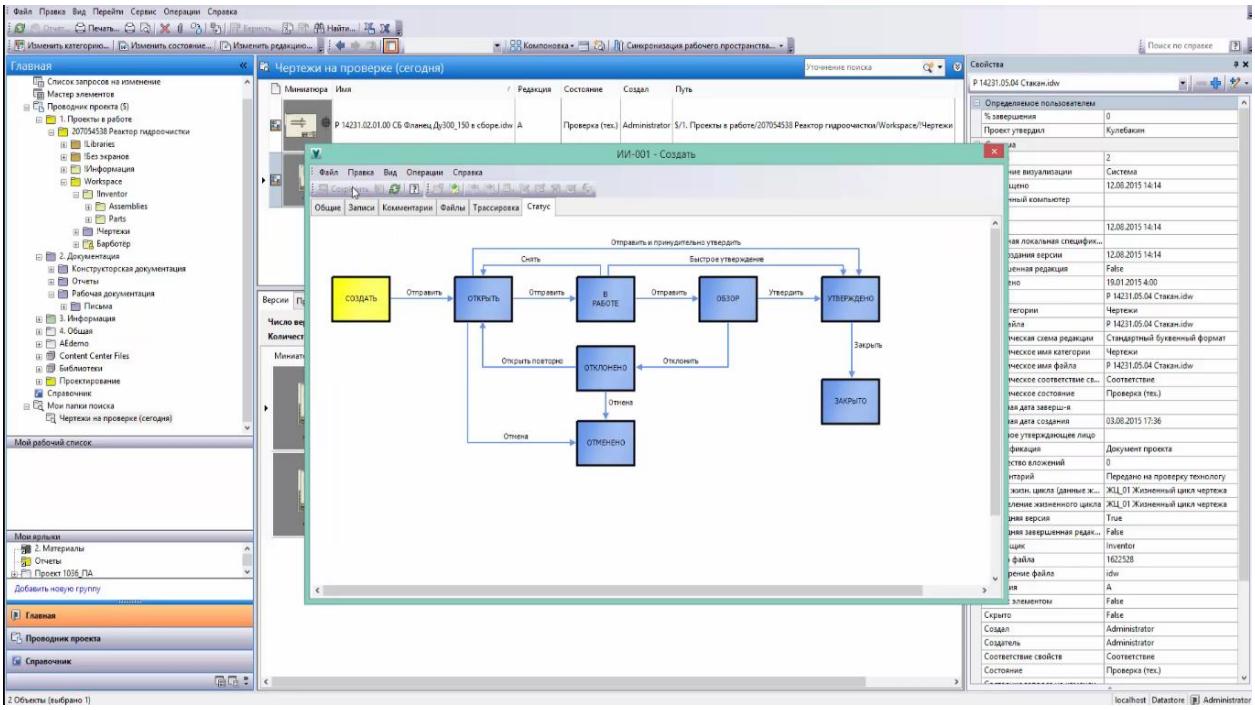


Рис. 3.39. Управление регламентированными процессами

3.4. Использование линеек продукции Autodesk на различных этапах КТПП

Схема использования линеек продукции Autodesk и варианты программного взаимодействия на различных этапах КТПП с использованием этих линеек показаны на рис. 3.40-3.42. При этом обратите внимание, что схема на рис. 3.40 коррелирует со схемой из главы 2 (рис. 2.2. прикладные ас в разрезе стадий жц производимых изделий»). Таким образом, вы можете выстроить собственный ИТ-ландшафт с использованием программного обеспечения Autodesk для цифрового производства (см. раздел 3.1.1).

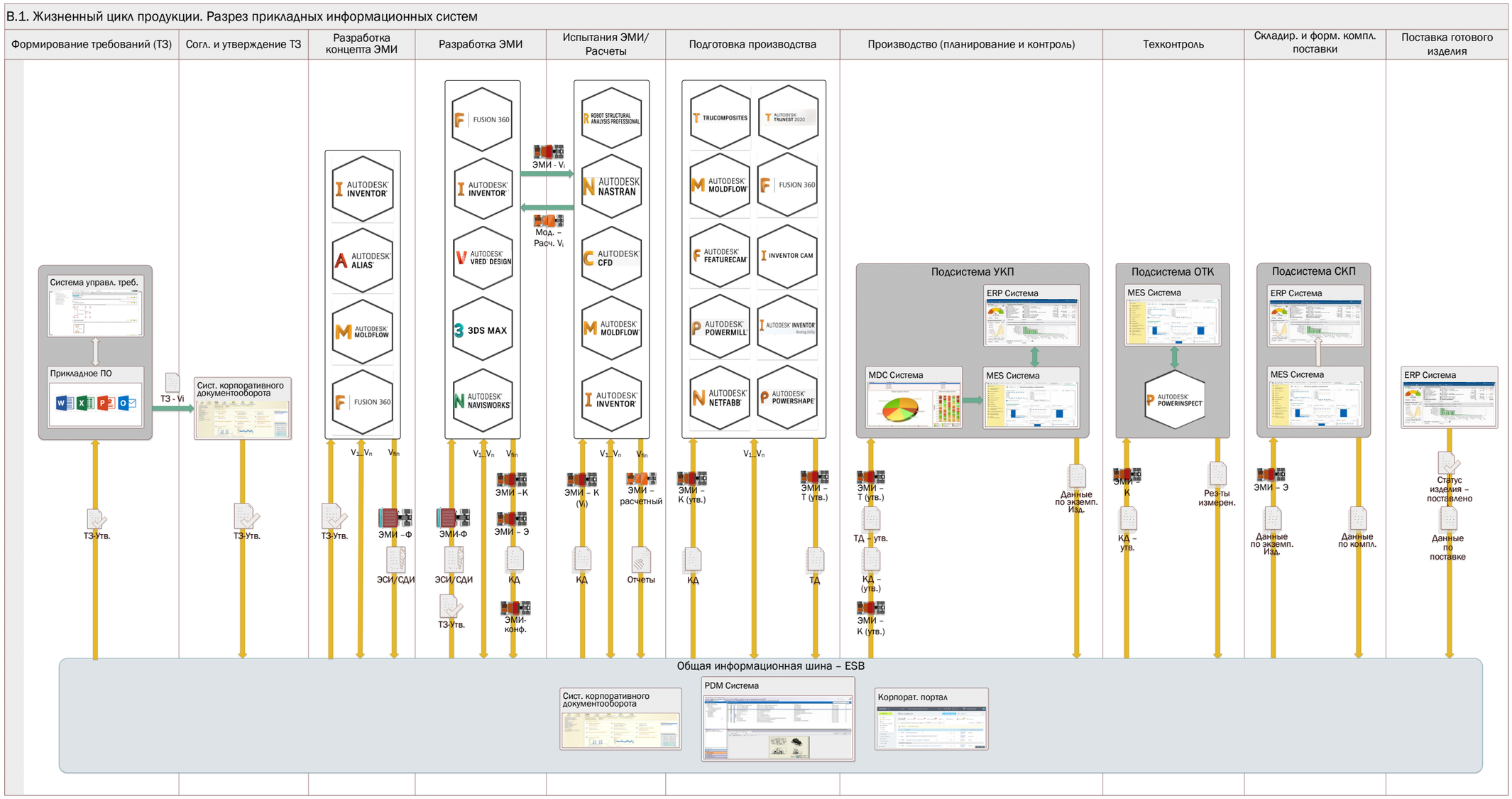


Рис. 3.40. Использование решений Autodesk на жизненном цикле изделия и на этапах КТПП

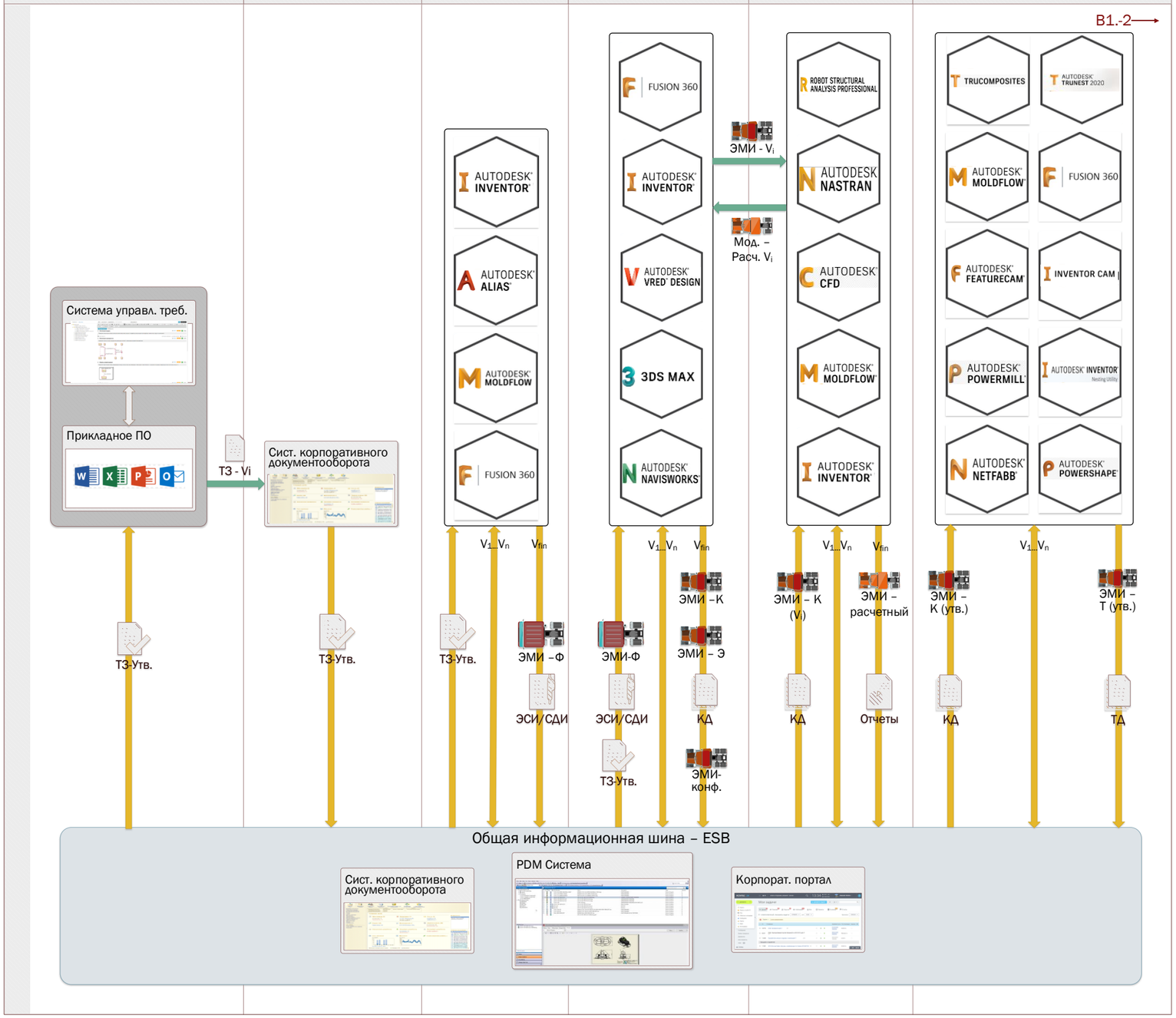


Рис. 3.41. Фрагмент 1 схемы В.1

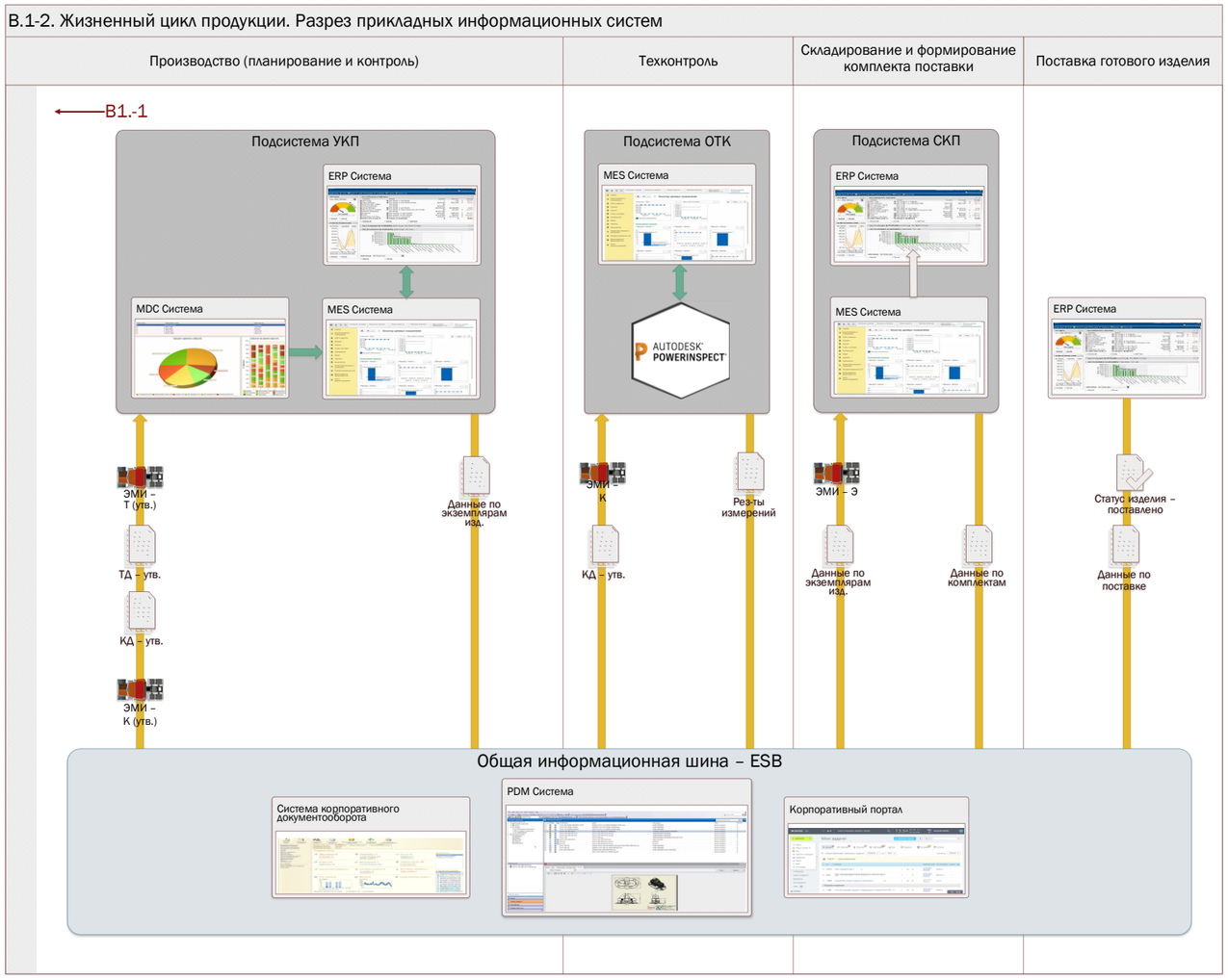


Рис. 3.42. Фрагмент 2 схемы B.1

3.5. Обеспечение интероперабельности

Интероперабельность – способность двух или более информационных систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена. Такое определение было впервые дано Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) в 1990 году.

Применительно к САПР задача обеспечения интероперабельности связана, главным образом, со стандартизацией форматов обмена данными между различными программными комплексами.

На всех стадиях жизненного цикла изделия интероперабельность может быть отнесена к одному из трех видов:

- интероперабельность между программными решениями различных производителей (вендоров) на основе открытых стандартов и форматов данных;
- интероперабельность между программными решениями одного производителя (вендора) на основе внутренних форматов и прямых API-интерфейсов (интерфейс прикладного программирования);
- интероперабельность между программными решениями различных производителей (вендоров) на основе проприетарных форматов и прямых API-интерфейсов.

Одним из наиболее активно применяемых открытых стандартов и форматов обмена данными модели (изделия) является формат STEP (Standard for Exchange of Product model data), который представлен в виде совокупности стандартов ISO 10303.

В июле 1984 года для установления единого международного стандарта обмена данными продукта – STEP – в Международной организации по стандартизации (ISO) были образованы технический комитет TC184 (системы промышленной автоматизации) и его подкомитет SC4 (внешнее представление данных о модели продукта). Основная цель стандарта – формирование механизма, предоставляющего параметры и характеристики определенного продукта независимо от того или иного программного обеспечения, участвующего при создании файла. STEP позволяет описать весь жизненный цикл изделия, включая технологию изготовления и контроль качества продукции. Чаще всего STEP используется для обмена данными между CAD-, CAM-, CAE- и PDM-системами.

Для обеспечения интероперабельности также важно стремление к двустороннему/многостороннему сотрудничеству в этой области компаний-производителей программного обеспечения. Ярким примером такого сотрудничества послужило заключенное в 2008 году соглашение между компаниями Autodesk и Bentley Systems о расширении совместимости продуктов для архитектурно-строительной отрасли. Договор подразумевал обмен библиотеками и модулями для повышения точности при чтении и записи файлов в форматах *.dwg (Autodesk) и *.dgn (Bentley Systems), а также двустороннюю поддержку интерфейсов прикладного программирования (API).

Линейка Autodesk включает множество программных продуктов, которые создают или используют электронные модели. Их можно условно разделить на три группы: системы CAD, CAM, CAE. Отчасти они перекрывают друг друга. Помимо этого, есть специализированные модули визуализации и инструменты работы с поверхностями. Таким образом, над одним проектом, используя наработки друг друга, работают специалисты разных направлений. Это предъявляет определенные требования

к интероперабельности элементов проекта. Например, электронная модель, разработанная в CAD-системе, должна передаваться в системы CAE. В случае изменения геометрии расчетные модули должны «подхватить» новую модель с уже настроенными граничными условиями и материалами. Далее ЭМИ передается в систему CAM для генерации управляющего кода соответствующего станка и т.д.

Существуют специальные технологии, которые посредством внешних ссылок объединяют элементы проекта и различные программные продукты. Как результат, при корректировке модели автоматически обновляются, и сама модель, и все, что с ней связано. Эти технологии работают не только с продуктами Autodesk, но и со многими САПР других вендоров, сокращают время при переходе от одной технологии к другой.

Некоторые программные продукты встраиваются в виде инструментальных панелей в среду разработки. Такая интеграция дает возможность решать различные задачи на одном рабочем месте, делая процесс решения максимально оперативным.

3.5.1. Особенности обмена данными Autodesk Inventor с наиболее распространенными САПР

Существует две технологии обмена данными: непосредственное открытие документов сторонних САПР в Inventor и организация внешних ссылок с использованием технологии AnyCAD.

В первом случае деталь преобразуется в формат Inventor, и сохраняется в папку активного проекта. Форматы открываемых файлов:

- двоичные файлы Parasolid (*.x_b);
- нейтральные файлы Pro/ENGINEER (*.neu);
- текстовые файлы Parasolid (*.x_t);
- файлы Alias (*.wire);
- файлы AutoCAD (*.dwg).
- файлы CATIA V4 (*.model; *.session; *.exp; *.dlv3);
- файлы CATIA V5 (*.CATPart; *.CATPrduct; *.cgr);
- файлы DXF (*.dxf);
- файлы IGES (*.igs; *.ige; *.iges);
- файлы JT (*.jt);
- файлы NX (*.prt);
- файлы OBJ (*.obj);
- файлы Pro/ENGINEER Granite (*.g);
- файлы Pro/ENGINEER и Creo Parametric (*.prt; *.asm);
- файлы Rhino (*.3dm);
- файлы SAT (*.sat);
- файлы SMT (*.smt);
- файлы STEP (*.stp; *.ste; *.step; *.stpz);
- файлы STL (*.stl; *.stla; *.stlb);
- файлы SOLIDWORKS (*.prt; *.sldprt; *.asm; *.sldasm);
- файлы панели IDF (*.brd; *.emn; *.bdf; *.idb);
- файлы пометки DWF (*.dwf; *.dwfx);
- файлы проекта Revit (*.rvt).

В качестве ссылочной модели AnyCAD можно импортировать следующие файлы:

- Alias;
- CATIA;
- DWG;
- PTC Wildfire;
- Solidworks;
- NX;
- STEP;
- Solid Edge;
- Fusion 360;
- Pro-E/Creo.

В случае, если проект параллельно разрабатывается в сторонних САПР, целесообразно импортировать его как ссылочную модель. При этом новый параметр «Ссылочная модель» сохраняет ссылку на выбранный файл, что позволяет отслеживать и обновлять его по мере изменения модели. Если после импорта файл будет изменен в соответствующем продукте, эти изменения отразятся в файле Inventor и во всех связанных ссылочных документах.

3.6. Облачные сервисы Autodesk

Облачный сервис (cloud service) – это экземпляр некоего программного сервиса (продукта), работающий на удаленном сервере (или на множестве серверов, связанных друг с другом). Как правило, речь идет о серверах производителя ПО, или его авторизованного партнера.

Системная архитектура облачных сервисов позволяет предоставлять отдельные экземпляры сервисов в аренду пользователям. Пользователь, желающий работать с тем или иным сервисом (прикладным ПО), подключается к серверу облачного сервиса посредством легковесного клиентского приложения – как правило, веб-браузера. Таким образом, пользователю нет необходимости ни в установке, ни в какой-либо настройке серверных и клиентских компонентов ПО, все это уже сделано в облаке поставщиком услуги.

Наиболее распространенной моделью поставки ПО в облаке становится Software-as-a-Service (SaaS) – ПО как услуга. Это подразумевает оплату не лицензии на использование ПО, как было принято ранее, а оплату подписки (аренды) на использование сервиса. При этом арендой можно гибко управлять – арендовать на любые сроки, «замораживать» и т.д. – в зависимости от политики поставщика услуги.

Облачные сервисы и их предоставление по модели SaaS имеет достаточно большое количество преимуществ перед «классической» моделью предоставления лицензий и развертыванием ПО на мощностях покупателя. Среди них можно выделить:

- отсутствие какой-либо существенной нагрузки на ИТ-инфраструктуру клиента – вся серверная инфраструктура, обслуживание, настройка, сопровождение прикладного ПО выполняются поставщиком сервиса;
- низкий порог входа – нет необходимости в приобретении дорогостоящей лицензии;
- высокая доступность – сервис доступен сразу же после оплаты аренды;
- возможность получать техподдержку в режиме 24/7 (в зависимости от уровня контракта SLA);

- модель гибкой аренды – когда клиент не испытывает потребности в ПО, он может «вернуть» его поставщику сервиса, тем самым не оплачивая аренду во время простоя. При необходимости аренда возобновляется;
- гибкое управление лицензией – можно арендовать то или иное количество клиентских подключений, а затем, в процессе использования, уменьшать либо увеличивать это количество, соответственно переключаясь с одного тарифного плана на другой.

Таким образом, облачные сервисы имеют неоспоримые материально-экономические преимущества по сравнению с моделью ПО «on-premise» (локально поставляемое ПО). Заметен тренд в сторону все более широкого использования облачных сервисов производственными предприятиями (см. главу 1).

Облачная платформа Autodesk Forge – набор web-сервисов для работы с цифровым двойником

Говоря об общей информационной шине предприятия, нельзя не упомянуть о необходимости предоставить пользователям доступ к данным об изделии, а также о наборе интерфейсов, обеспечивающих участникам процессов ЖЦ изделия возможность получать все необходимые данные цифрового двойника в удобном и наглядном виде.

Autodesk Forge – это облачная платформа, предоставляющая широкий набор специализированных API для решения таких задач, как управление инженерными данными, визуализация данных из САПР в web (в том числе интерактивная), предоставление данных для сервисов виртуальной и дополненной реальности, формирование интерактивных эксплуатационных руководств (ГОСТ Р 53394-2017) и многое другое 29.

В прикладные сервисы на платформе Autodesk Forge можно загружать данные из платформы интернета вещей (IoT), получаемые с реального объекта при помощи технологий промышленного интернета (см. главу 1).

Ниже представлены некоторые из вариантов реализации интерфейсов на платформе Forge:

- Интерфейс решения класса ИЛП (интегрированная логистическая поддержка, ГОСТ Р 53394-2017), реализованный на платформе Forge (рис. 3.43). Источник: https://forge-digital-twin.autodesk.io. К электронному макету изделия привязываются данные по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонтам, поставкам и наличию запасных частей, а также вся необходимая документация. Интерфейс просмотра 3D, предоставляемый платформой Forge, позволяет увидеть разнесенную модель, построить сечение модели, произвести измерения на модели, увидеть ее составные части в виде иерархического списка, получить отображение отчета и пометок на 3D-модели.

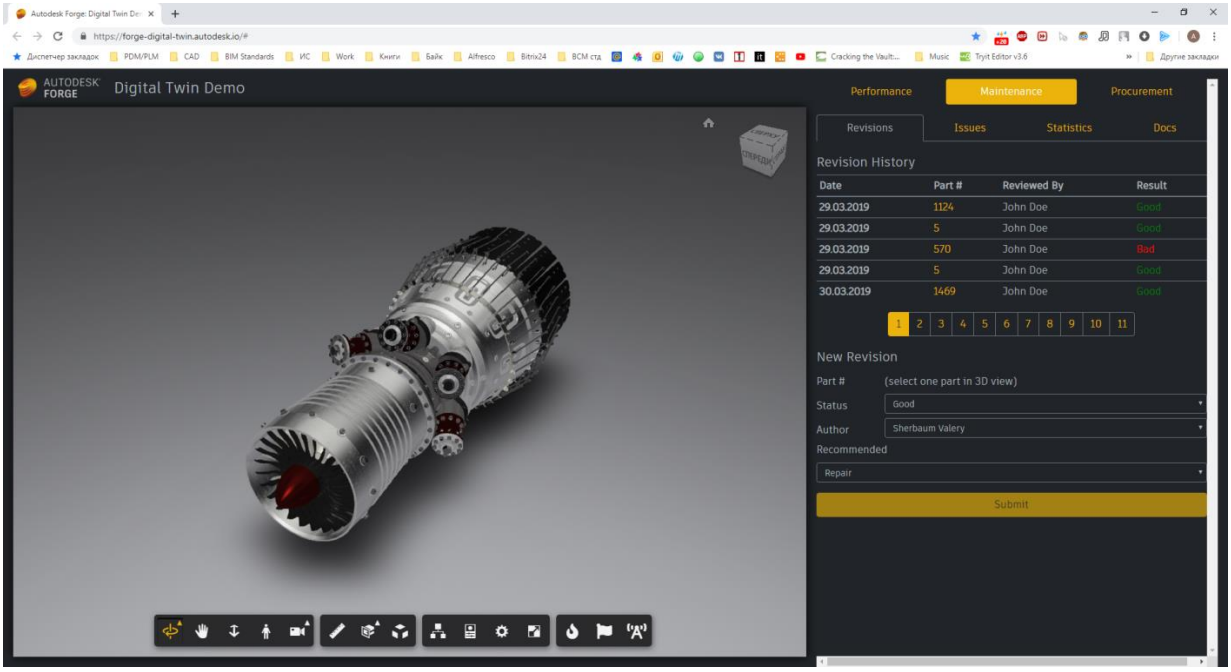


Рис. 3.43. Интерфейс решения класса ИЛП (ГОСТ Р 53394-2017), реализованный на платформе Forge

Интерфейс сервиса предоставляет возможность получать различные отчеты, которые отображаются прямо на 3D-модели в виде шкалы интенсивности (heatmap), а при выборе той или иной детали отображается подробная информация о ней (рис. 3.44).

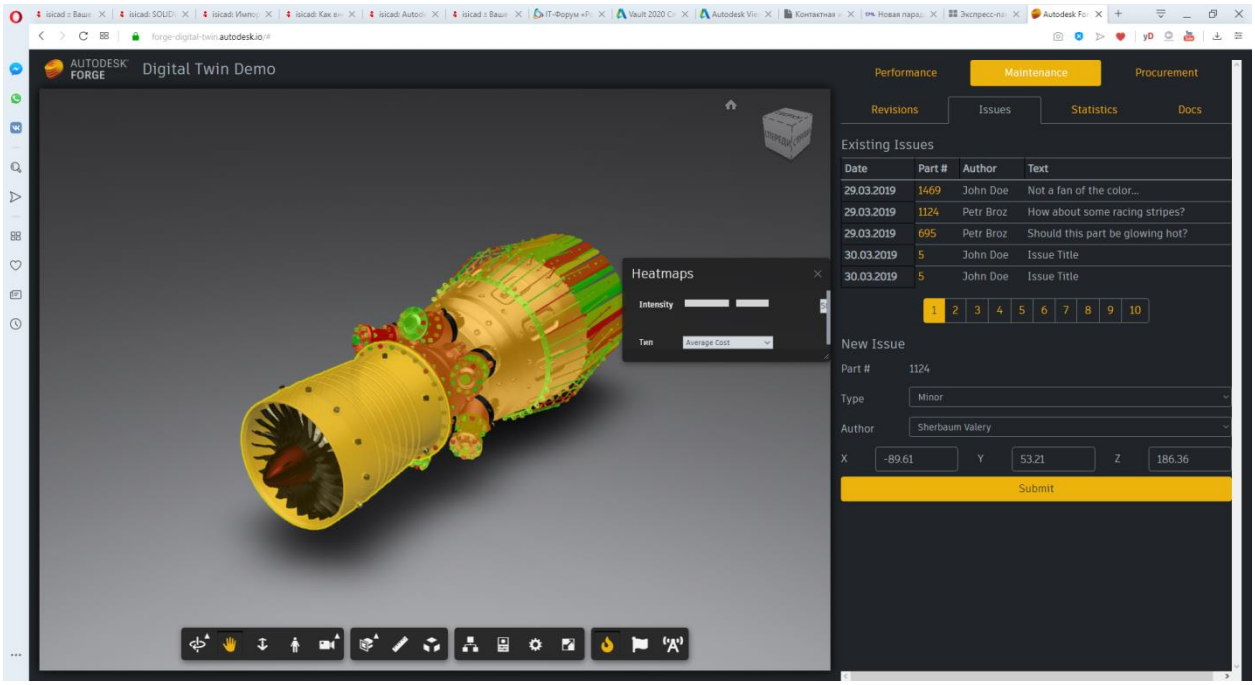


Рис. 3.44. Интерфейс решения класса ИЛП (ГОСТ Р 53394-2017), отображение карты стоимости ремонтных комплектов

Отображается распределение по инцидентам техобслуживания с прикреплением фотографий на 3D-модели (рис. 3.45).

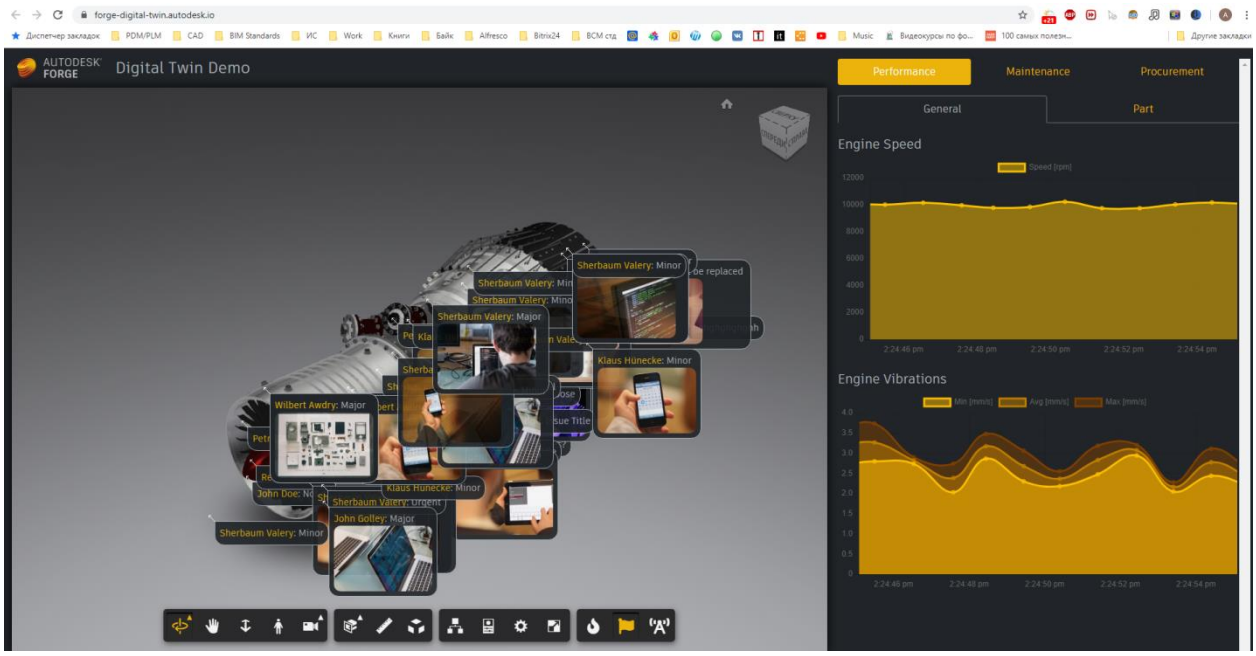


Рис. 3.45. Интерфейс решения класса ИЛП (ГОСТ Р 53394-2017), отображение карты инцидентов техобслуживания на модели

Разнесенные виды 3D-модели позволяют оценить конструкцию и модель сборки изделия (рис. 3.42).

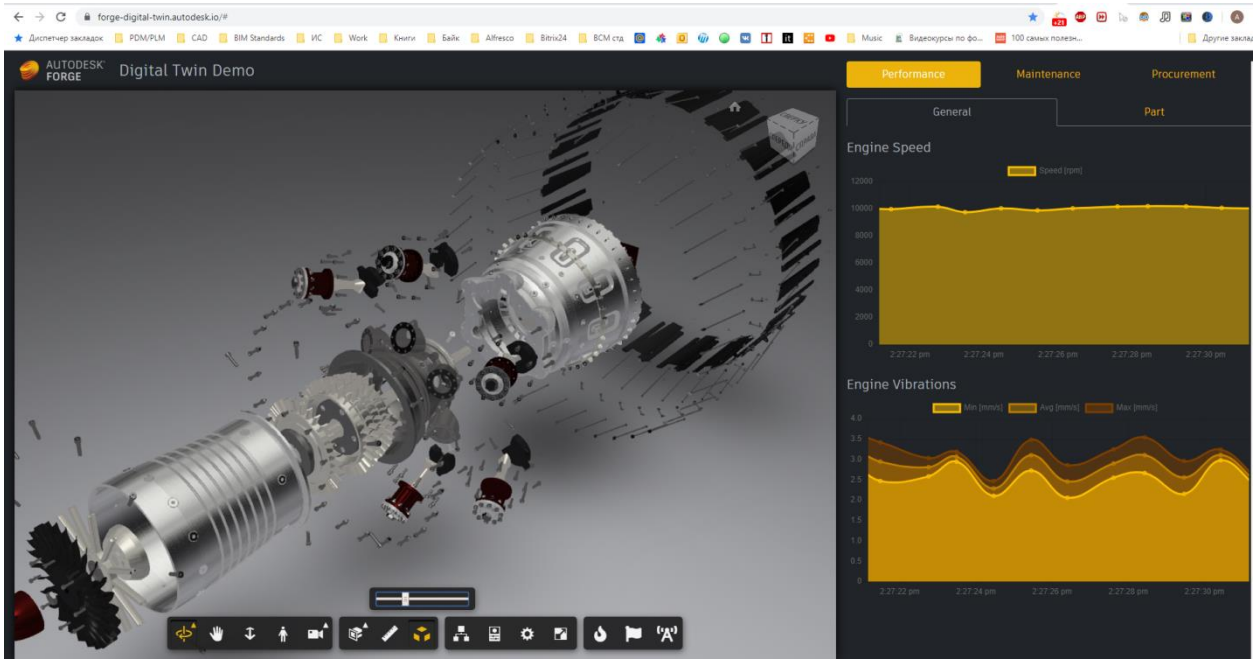


Рис. 3.46. Интерфейс решения класса ИЛП (ГОСТ Р 53394-2017), отображение разнесенного вида

Браузер модели позволяет оценить входимость элементов и состав сборки (рис. 3.47).

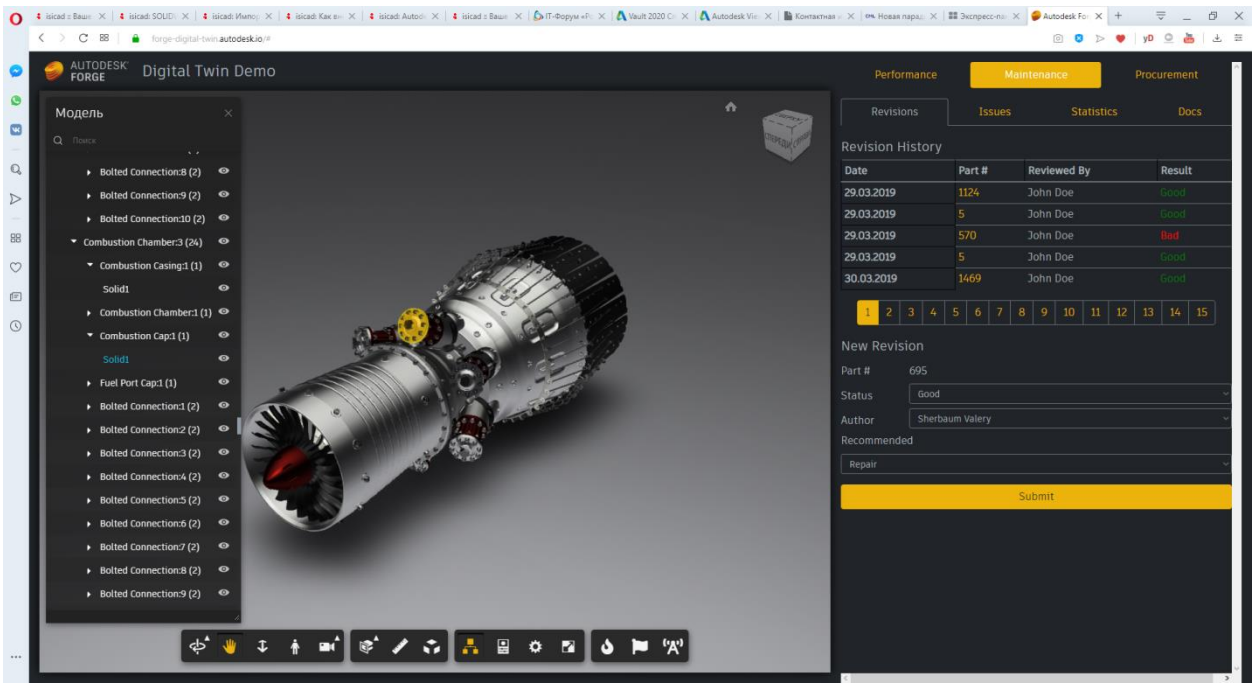


Рис. 3.47. Интерфейс решения класса ИЛП (ГОСТ Р 53394-2017), отображение браузера сборки и свойств выбранного объекта

Динамические сечения помогают понять конструкцию сборки и увидеть внутренние скрытые компоненты (рис. 3.48).

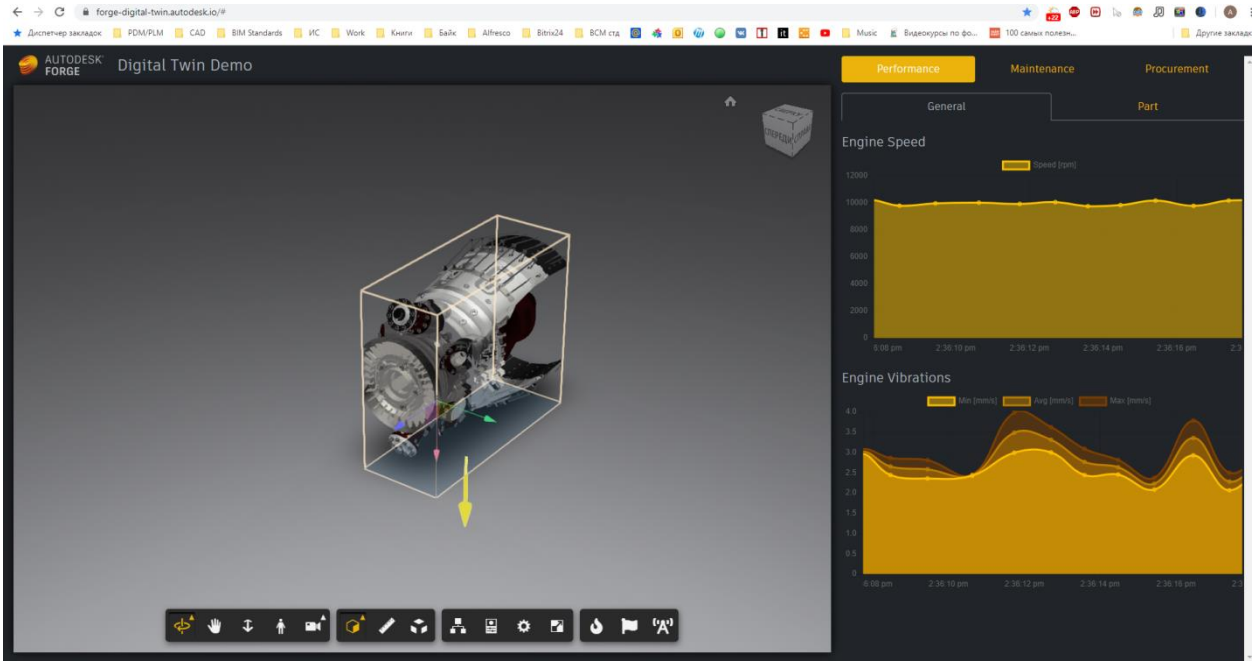


Рис. 3.48. Интерфейс решения класса ИЛП (ГОСТ Р 53394-2017), отображение настраиваемого сечения модели

Данные из промышленного интернета вещей попадают в облако Forge и отображаются на мобильном устройстве оператора (рис. 3.49).

Рис. 3.49.Отображение неисправности изделия на цифровом двойнике, реализованном при помощи платформы Forge

- Интерфейс решения класса SCM (управление цепочками поставок), реализованный на платформе Forge (Рис. 3.50). Источник: https://forge-rcdb.autodesk.io/configurator?id=5904729b0007f5ead5b1196d&_ga=2.44109293.830959843.1566489667-1172968206.1538068278. Здесь к электронному макету изделия привязываются данные по поставщикам запчастей, стоимость материалов для изготовления, сроки поставки, наличие и др. Такая информация может быть получена в автоматическом режиме из PDM/ERP/SCM-систем.

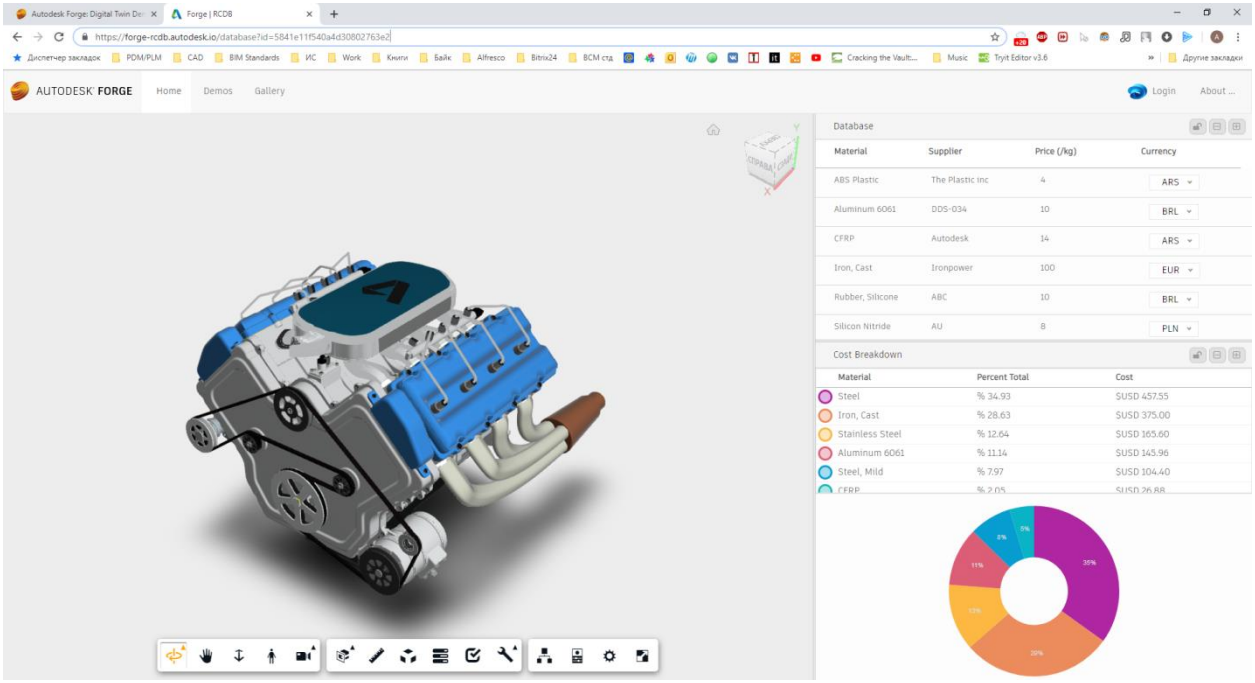


Рис. 3.50. Интерфейс решения класса SCM на Forge

Прикладные сервисы и решения на Autodesk Forge

Примером уже реализованной связки Forge и прикладной АС может служить семейство продуктов Autodesk Fusion: Fusion 360 и Fusion Lifecycle. Архитектура этих решений представлена на рис. 3.51.

Рис. 3.51. Архитектура семейства продуктов Fusion на платформе Forge

В свою очередь, пользователи могут разрабатывать собственные прикладные решения с использованием высокоуровневого API, предоставляемого платформой Forge:

1. Authentication (OAuth). Открытый стандарт, используемый в платформе Forge для аутентификации и авторизации;
2. Data Management. Работа с файлами во встроенном в Forge Object Storage Service (OSS), а также в репозиториях таких облачных решений, как A360, Fusion 360

Team, BIM 360 Docs, BIM 360 Team. Данный компонент позволяет программистам управлять файлами на сервере Autodesk, а также выгружать и загружать их;

3. Design Automation. На данный момент включает в себя технологию AutoCAD I/O, которая позволяет разработчикам при работе с чертежами запускать скрипты AutoCAD в облаке. Большинство пользователей платформы используют этот компонент в качестве инструмента генерации чертежей для онлайн-приложений. В скором времени к нему также добавятся технологии Revit I/O, Inventor I/O и 3ds Max I/O, сейчас этот функционал работает в режиме Private Beta. Подробнее об этих технологиях можно узнать из видеовебинаров Autodesk Developer Days;
4. Model Derivative. Способен переводить инженерные файлы из одного формата в другой, готовит их для дальнейшего онлайн-просмотра, извлекает метаданные из модели (структуру и свойства). Извлеченные метаданные могут быть переданы в другие приложения для дальнейшего использования;
5. Viewer. Отображает графические 2D- и 3D-объекты, а также ассоциированные с ними метаданные в более чем 60 различных форматах с помощью мобильной или десктопной версии веб-браузера. Также позволяет осуществлять измерения, создавать комментарии, делать пометки и сечения. Все это незаменимо при совместной работе географически распределенных участников рабочей группы;
6. BIM 360. Предоставляет разработчикам прикладных решений доступ к BIM 360 Account Admin для автоматизированного создания проектов, назначения администратора проектов, управления участниками рабочей группы и субподрядчиками. Также у этого компонента в режиме Private Beta находится функционал «Manage issues and RFIs», который позволит с помощью API настроить процесс согласования проектной документации в BIM 360;
7. Reality Capture. Позволяет при помощи фотографий с камеры создавать 3D-модель в виде текстурированной сетки из многогранников, а также облако точек или ортофотоплан. Этот компонент полюбился сервисами, которые осуществляют аэрофотосъемку с помощью дронов;
8. Webhooks. При помощи этого компонента разработчики могут отслеживать изменения данных в репозитории Autodesk и направлять пользователю уведомления о происходящих изменениях.

3.7. Реализация процессов цифрового производства в технологических центрах Autodesk

Компания Autodesk активно занимается продвижением новых технологий и делится своим опытом с пользователями. С этой целью открываются технологические центры, где любой желающий может ознакомиться с тем, как совместно работают технологии и программное обеспечение. Один из таких центров – Центр продвинутых технологий производства AMF (Advanced Manufacturing Facility) в Бирмингеме, Великобритания (рис. 3.52, рис. 3.53). Ультрасовременный технологический центр представляет собой фабрику будущего, оснащенную новейшим оборудованием от DMG Mori, Hermle, Steifelmeyer и Hamuel, роботами ABB и KUKA Robotics, а также использующую собственные технологии Autodesk для организации умного производства. Вместе с Autodesk, вложившей в эту фабрику миллионы фунтов, над проектом работали несколько компаний, включая BMW и GKN Additive. Центр получил сертификат AD9100D, позволяющий работать над аэрокосмическими проектами.

Рис. 3.52. Центр продвинутых технологий производства AMF (Advanced Manufacturing Facility) в Бирмингеме

Все данные производства в AMF собираются в Autodesk Fusion Production – облачном инструменте, который, используя промышленный интернет вещей (IIoT), позволяет объединить планирование работ, контроль за ними и мониторинг станков с ЧПУ. Работать с Fusion Production можно и в браузере, и через мобильное устройство. Конструкторы и изготовители могут получать информацию из цеха в режиме реального времени вне зависимости от своего местоположения. Fusion Production разработан на базе платформы Autodesk Forge и позволяет с легкостью выстраивать взаимосвязанную производственную экосистему. Например, можно автоматизировать процесс передачи данных из CAM-решения PowerMill и запускать оборудование непосредственно из приложения.

Рис. 3.53. Промышленный робот KUKA в центре Autodeskв Бирмингеме

В 2018 году эта технология стала доступна подписчикам облачного программного обеспечения Autodesk Fusion 360. В рамках проекта Autodesk начала сотрудничество с институтом цифрового производства и инновационного дизайна Manufacturing x Digital (MxD) в Чикаго. Лаборатория развернется в инновационном центре площадью более девяти тысяч квадратных метров.

«Взаимодействие таких средств автоматизации, как роботы и машинное обучение, коренным образом меняет традиционные процессы производства и строительства. Объединение этих технологий через облачные вычисления позволит получить доступ к их возможностям большему количеству людей и за гораздо меньшую стоимость. Эти технологии являются очевидным вызовом сложившимся практикам. Тем не менее, они предлагают нынешним производителям и строителям огромные возможности, чтобы они могли делать больше, лучше и при этом оказывать менее негативное влияние на мир. Сегодняшним открытием мы надеемся воодушевить и подготовить бизнес во всех отраслях к созданию объектов будущего», – говорит Эндрю Анагност, Президент и CEO Autodesk.

«Для того чтобы развивать производство, нам нужно думать обо всем жизненном цикле изделия, и начинается это на самых ранних стадиях проектирования. Сегодня мы в состоянии делать вещи, которые раньше были невозможны, потому что такие партнеры, как Autodesk, предлагают новые решения. Autodesk знакомит людей со всем процессом, от проектирования до готового изделия, а это очень важная часть нашей миссии», – поясняет Чандра Браун, генеральный директор MxD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее руководство призвано придать импульс цифровой трансформации производственных предприятий.

Ряд компаний узнали в нем себя:

- прежде чем приступить, компании необходимо понять, зачем меняться, и быть уверенной в необходимости изменений;
- компаниям, кто уже на старте – важно изучить основные пути и выбрать свой;
- компаниям, кто приступил, быть ориентированными не просто на изменения, а на измеримый и понятный всем участникам процесса результат.

Цифровизация может и должна стать реальным инструментом на пути к повышению эффективности и поиску оптимальной бизнес-модели компании в новом мире. Не все глобальные технологические тренды сразу сыграют роль в изменении каждой конкретной компании, однако в настоящее время больше невозможно их игнорировать.

Авторы рассчитывают, что следование рекомендациям, приведенным в руководстве, позволит добиться повышения производительности, сократить затраты на разработку и производство продукции, сократить время вывода изделий на рынок, повысить уровень зрелости предприятия и оптимизировать логистические цепочки. Новые процессы разработки изделия и гибкое производство способны повысить конкурентоспособность компании на внутреннем и глобальных рынках.

Не стоит забывать, что люди – главный ресурс. Изменение культуры работы и принятия технологий людьми в новой производственной парадигме – одна из главных целей. Корпоративный университет и постоянное внешнее профессиональное развитие персонала, индивидуальные траектории роста – уже не просто тренд, а необходимость.

Что дальше? Понимая, что представленный в руководстве материал – лишь точка старта в большом пути, авторы предлагают двигаться по следующему плану:

- осознать свой текущий уровень цифровой зрелости, определить и формализовать ключевые производственные процессы цифрового инжиниринга;
- наметить пути трансформации процессов с текущего на ожидаемый уровень, разработать методику, в которой обязательно должны быть описаны этапы, сроки выполнения, ответственные люди и выделенные ресурсы;
- выполнить оценку эффективности изменений в разрезе оценки ключевых метрик производственных процессов.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. МОДЕЛИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ САПР

А.1 Использование плоских эскизов для построения твердых тел и поверхностей

Существуют несколько основных способов формообразования ЭМИ: выдавливание, вращение, сдвиг и лофт. При этом используются эскизы, в основном плоские. Одни и те же результаты можно получить разными способами, поэтому конструктор, опираясь на свой опыт, должен грамотно выстроить архитектуру построения. Выбор инструмента определяется и удобством изменения геометрии детали, и удобством дальнейшей работы с ней. Что касается эскизов, они могут быть сформированы на основе существующих плоскостей либо плоских граней детали или сборки.

При создании детали и сборки в их составе уже существуют плоскости XY, XZ и YZ (рис. а.1). Обычно принято считать, что плоскость XY совпадает с горизонтальной плоскостью. Плоскости построены на основе осей X, Y и Z, пересечение осей дает точку начала координат. Исходя из существующей геометрии, пользователь САПР может создать собственные плоскости, причем с изменением геометрии плоскость перестраивается, и, конечно, перестраивается эскиз, находящийся в этой плоскости.

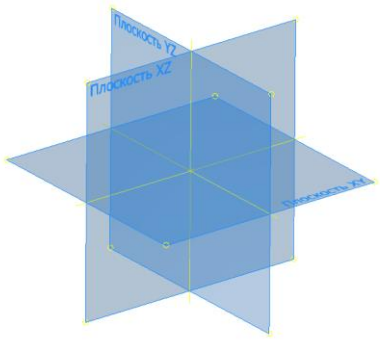


Рис. А.1. Плоскости построений

В современных САПР широко используется технология наследования и построения связей между объектами. Это дает возможность привязываться к точкам, ребрам, граням, плоскостям и выстраивать логику построения, которая сохраняется при изменении размеров детали. Таким образом, конструктор управляет геометрией детали через инструменты построения, и это дает возможность гораздо эффективнее управлять формой детали.

При использовании эскиза инструменты формообразования анализируют его на предмет замкнутости и вложенности. Чем сложнее эскиз, чем больше пересечений в эскизной геометрии, тем менее однозначным оказывается выбор. Чтобы упростить работу алгоритма анализа эскиза, существует вспомогательная геометрия. Она задействована в построении эскиза, на нее можно наносить зависимости и размеры, но в получении объема она не участвует. Обычно такая геометрия отрисовывается тонкими линиями.

При вводе любого значения в размере создается переменная с именем (рис. а.2). Таким образом, чем больше у детали введенных параметров, тем больше переменных. Переменные можно связывать друг с другом, применять математические формулы.

Существует возможность импорта переменных из других деталей, сборок или внешних файлов. При изменении значения переменной деталь и сборка перестраиваются.

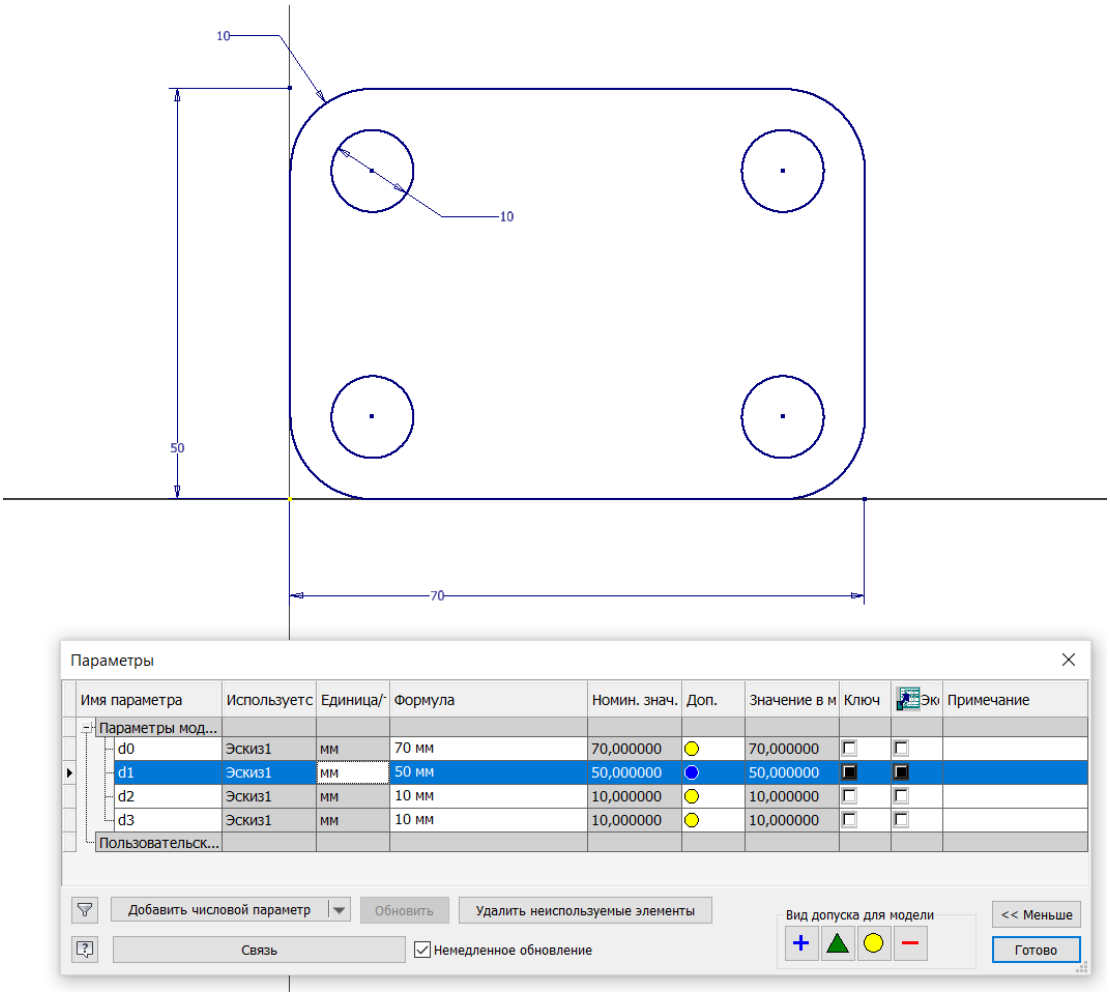


Рис. А.2. Параметры в эскизе

Помимо инструмента управления переменными эскиз предоставляет возможность нанесения зависимостей (коллинеарность, концентричность, параллельность и т.д.) (рис. а.3). В итоге эскиз должен стать полностью определенным, а количество размеров и зависимостей – необходимым и достаточным. Эскиз превращается в механизм, управляемый размерами.

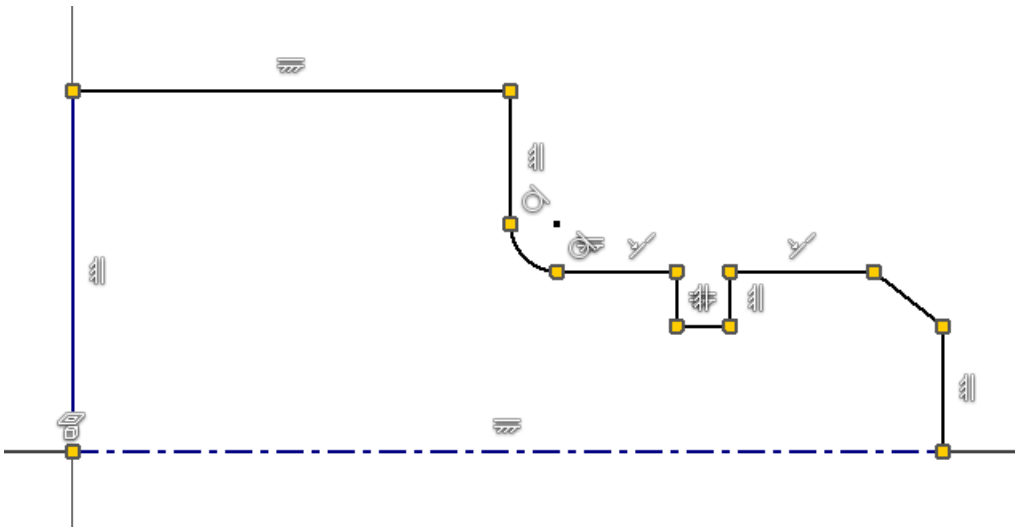


Рис. А.3. Зависимости в эскизе

Есть возможность простановки справочных размеров, когда, например, прямоугольник однозначно определен шириной и длиной и необходимо установить размер диагонали. Справочный размер всегда остается справочным и не может управлять эскизом.

Также для однозначного определения эскиза необходима привязка его характерной точки к началу системы координат. Таким образом, например, логичнее всего располагать ось вращения вала в начале координат – в этом случае главные плоскости детали будут являться плоскостями симметрии.

В случае существующей геометрии в эскиз можно проецировать грани, ребра и точки. Элементы эскиза могут быть привязаны к элементам спроецированной геометрии.

Эскиз может оперировать такими элементами, как описанный и вписанный многоугольник, паз, скругленный паз. Эти элементы управляются своими размерами и остаются таковыми при их модификации. Существует инструмент построения смещенного контура, для определения которого необходим только один размер.

А.2 Восходящее и нисходящее проектирование при построении 3D-модели

Проектирование «снизу вверх» или «сверху вниз» выбирается исходя из того, какая из моделей детали является «родителем», а какая «потомком». Метод определяется конструктором в зависимости от исходных данных и результата, который должен быть получен. Обычно в сборке используется комбинированный метод, некоторые (базовые) детали разрабатываются самостоятельно и устанавливаются в сборку, а затем наступает очередь разработки ЭМИ деталей, ориентированных на базовые компоненты.

В САПР существуют наборы инструментов, позволяющие создавать конструктивные элементы, такие как:

- фланцевое соединение;
- шлицевое зацепление;
- зубчатое зацепление.

С одной стороны, технология наследования и адаптивности геометрии дает возможность быстро проектировать и создавать «умные» детали и сборки, но с другой – избыточные

логика и количество наследований могут «рассыпать» сборку как цепочку в случае возникновения ошибки в одной из базовых деталей.

Таким образом, структура деталей и сборок выстраивается в соответствии с критериями оптимальности, надежности и удобством последующей работы.

Согласно [7], метод восходящего проектирования рекомендуется применять при разработке изделий, спецификой которых является минимальное количество изменений и заранее полностью определенная конструкция всех компонентов.

Разработка нового изделия «сверху вниз» позволяет обеспечить поддержку следующих сторон процесса проектирования:

- предварительная разработка структуры изделия;
- проработка концепции на стадии трехмерного эскизного проекта;
- детальная проработка конструкции изделия на стадии рабочего проекта;
- возможность организации параллельной работы групп проектировщиков, дизайнеров, конструкторов, технологов за счет использования в качестве исходной информации общей геометрии, распределяемой через структуру каркасных моделей (скелетных моделей) и PDM-системы;
- возможность осуществления контроля над привязками и управления потоком информации в рамках проекта;
- возможность быстрого обновления состояния общей геометрии в рабочих группах при изменении начальных условий проекта.

А.3 Использование каркасных (скелетных) моделей

Пример использования скелетного проектирования – инструмент «Генератор рам».

В этом случае разрабатывается деталь-заготовка (Рис. А.4), представляющая собой плоский или пространственный каркас.

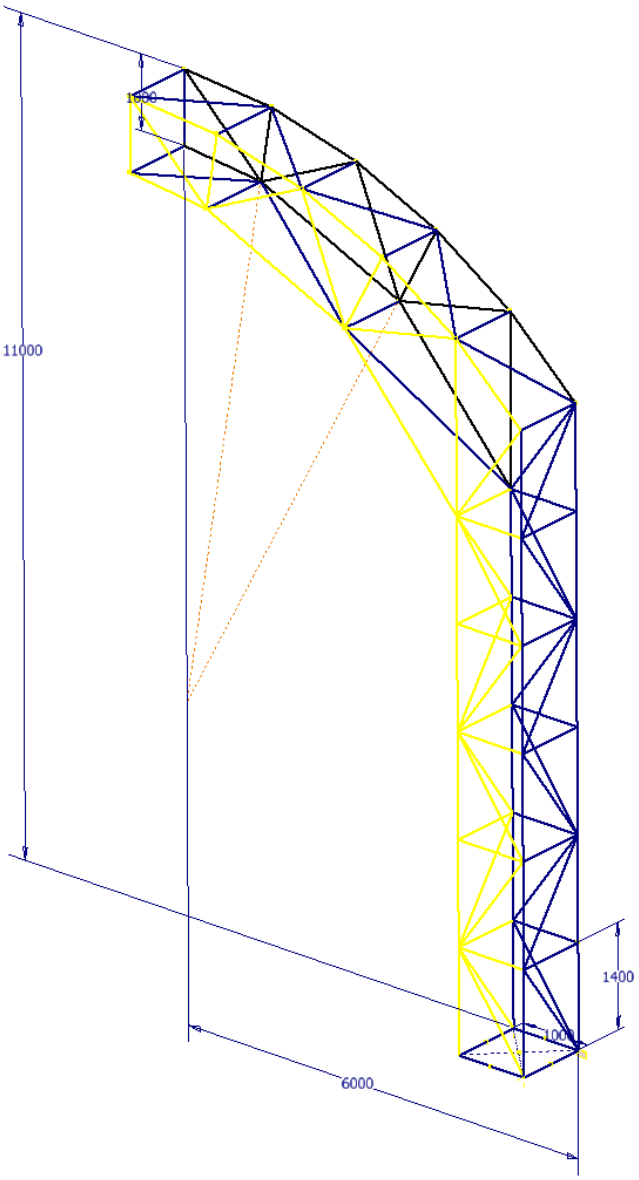


Рис. А.4. Деталь-заготовка каркаса

Элементы каркасной модели не обязательно должны быть прямыми отрезками, возможно использование дуг и сплайнов. Как правило, каркас однозначно определен с помощью зависимостей и размеров. Управляющие размеры открыты, доступ к ним максимально упрощен.

Далее деталь-заготовка размещается в сборке, привязываясь в системе координат, а на ребра каркаса с помощью специального инструмента назначаются профили (рис. а.5). Профили вставляются в соответствии с выбранными стандартом и размером, привязываясь соответствующим образом к осевой линии скелета.

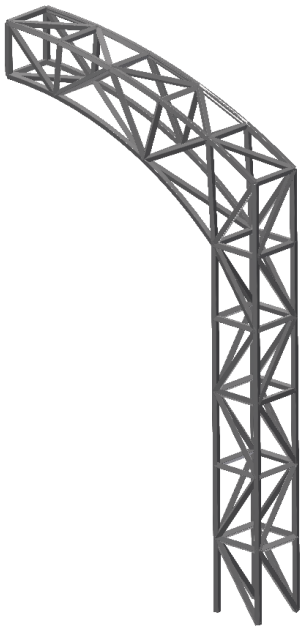


Рис. А.5. Профили на каркасе

Инструмент может организовывать стыковку и подрезку профилей, а также производить удлинение и укорачивание, смещать и поворачивать профиль относительно продольной оси. Таким образом, можно вносить коррективы в каркас уже после работы со скелетом, добавлять в детали дополнительные конструктивные элементы. При этом управление размерами каркаса по-прежнему осуществляется через деталь-заготовку. Корректоры в мастере генератора рам являются параметрическими, при желании их можно изменить или удалить. Данный инструмент значительно сокращает время работы над моделью каркаса, а также позволяет гибко менять размеры в процессе модификаций, получая новую электронную модель сборки, деталей и соответствующий им комплект конструкторской документации.

А.4 Использование прототипов и производных компонентов

Производный компонент также является элементом наследования, при котором новая деталь использует «родителя». Зачем создавать новую деталь, если можно добавить элементы к уже имеющейся? На производстве существует такое понятие, как доработка детали. В этом случае в графе материала основной надписи чертежа записывается обозначение той детали, которая является заготовкой. При изменении родительской детали меняется и производный компонент – так, собственно, и происходит при наследовании компонента.

При наследовании можно изменить масштаб или сделать деталь зеркальной, указав плоскость симметрии.

На производстве штампов функцию производного компонента удобно использовать при необходимости получить детали пуансона и матрицы, связанные друг с другом через поверхность родительской детали. В случае изменения поверхности исходной детали пуансона и матрицы автоматически меняются.

Команды наследования позволяют использовать сборки, при этом возможно объединение компонентов сборки в единую деталь.

Есть возможность подавить связь с базовым компонентом или вовсе разорвать ее. В этом случае родительский компонент в рамках наследуемой детали становится фиксированным и условно неуправляемым.

А.5 Использование оцифрованных данных: облака точек, сканированные подложки

Иногда приходится проектировать в рамках уже существующей обстановки, привязываться к уже построенным объектам и элементам. В этом случае на помощь приходят современные технологии 3D-сканирования. Облака точек можно подгружать в модель детали или сборки, привязываться к точкам в процессе проектирования. Точки, полученные геодезистом вручную или с использованием тахеометра, есть возможность вставить из файла Excel. Эта технология позволяет учесть все элементы и геометрию, в которую встраивается новая конструкция, привязываться к конкретным координатам, строить на основании импортированной геометрии плоские или 3D-эскизы. Доступна координация положения сборок и деталей в пространстве, в результате чего реальные объекты становятся частью проекта.

Возможность вставки растровых изображений, сканированных чертежей в плоские эскизы деталей реализуется через сканированные подложки. Подложку можно масштабировать, поворачивать и перемещать. После этих манипуляций происходят ее фиксация и рисование эскиза поверх картинки.

Данная технология применяется в случае использования растровой документации либо набросков дизайнера, сделанных от руки.

А.6 Твердотельное, поверхностное и гибридное моделирование

Конструкторы в основном заняты твердотельным моделированием, и инструмент САПР настроен именно на это. Существует несколько основных методов формообразования, а именно:

- выдавливание эскиза по нормали к его плоскости на определенное расстояние (рис. а.6). Направление выдавливания можно изменить, сделать его симметричным или асимметричным;

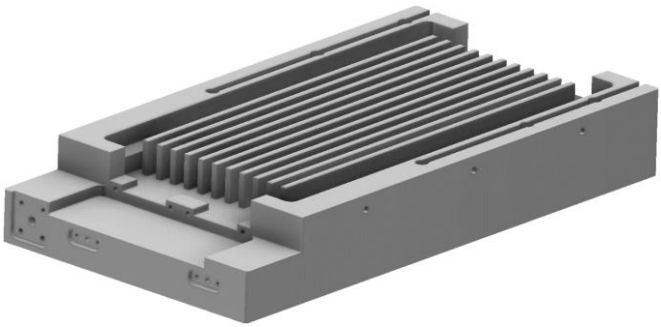


Рис. А.6. Тело выдавливания

- вращение эскиза вокруг отрезка на определенный угол (обычно он равен 360 градусам). Отрезок желательно маркировать как осевую линию, тогда при ее выборе и нанесении отрезка проставляются значения диаметров (рис. а.7);

Рис. А.7. Тело вращения

- команда **Сдвиг**. Частый случай этой команды – команда выдавливания, но путь при этом не прямолинеен и может представлять собой 2D- или 3D-сплайны, кривую по формуле, сплайн, лежащий на поверхности, ребро или цепочку ребер детали и т.д. (рис. а.8);

*Рис. А.8. Тело после операции **Сдвиг***

- лофт (рис. а.9) позволяет произвести трансформацию одного эскиза в другой, третий и т.д. Этот метод (впрочем, как и команду **Сдвиг**), могут использовать направляющие – объекты, через которые должна проходить создаваемая поверхность.

*Рис. А.9. Тело после операции **Лофт***

Все вышеописанные команды могут получить твердое тело. Замкнут эскиз или не замкнут, результатом работы будет поверхность (рис. а.10).

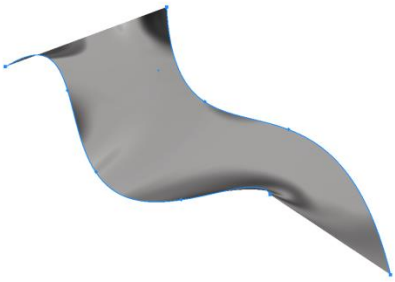


Рис. А.10. Поверхность из незамкнутого контура

Возможен лофт кривых от одной к другой или построение поверхностей по образующим и направляющим кривым – тогда этот процесс можно отнести к поверхностному моделированию. В случае использования инструмента «Лофт» можно добиться поверхности класса G2.

Поверхности классаG2 можно получить, используя команду “сопряжение” при твердотельном моделировании. Особенность данной поверхности состоит в том, что ее функция кривизны будет дифференцируема, и полученная в результате функция также будет иметь производную в каждой точке.

Если необходимо получить поверхности класса G3, G4 (поверхности класса А), следует воспользоваться специализированным программным обеспечением, способным создавать такие поверхности.

В рамках одной детали можно применять все методы в любой последовательности, причем они могут не только добавлять объем детали, но и выступать в качестве инструмента булевских операций – вычитания и пересечения.

Существует целый набор инструментов, создающих конструктивные элементы, такие как сопряжение, фаска, оболочка, отверстие, резьба сгиб детали и т.д.

Как уже сказано, моделирование бывает твердотельным и поверхностным. Конструктор сам решает, какой метод применить для получения нужного результата. Это связано, например, с невозможностью построения сопряжений либо оболочки из-за вырождения геометрии, сложностью топологии и т.д.

В части геометрии один и тот же результат можно получить с применением разных инструментов. Эскизы или несут в себе всю информацию о контуре, или часть этой информации забирают конструктивные элементы. Второй способ предпочтительнее, так как в этом случае эскиз оказывается более простым и управляемым. Разработчик также должен предугадать, какие элементы детали, возможно, изменятся (например, в ходе расчетов), и моделировать деталь таким образом, чтобы изменение элементов не привело к повреждению модели.

Необходимо оценить состав проекта, предположить уровень вложенности сборок, типы деталей, возможные векторы развития или модификации проекта – и на основании этого выбрать ту архитектуру, которая окажется наиболее эффективной и гибкой.

Существует возможность создания наследуемых деталей, а также деталей, которые адаптивны геометрически либо связаны друг с другом через параметры. Обычно сборки в той или иной мере содержат детали такого типа. Всё определяется эффективностью и скоростью их построения, а также устойчивостью к повреждению и надежностью сборки и деталей. Каждый конкретный случай рассматривается отдельно.

Для работы с геометрией в части свободного моделирования существуют инструменты работы с произвольными формами, которые могут обеспечить дизайнерам получение интересных результатов. Они позволяют на лету создавать и редактировать формы, получая сглаженные поверхности. Впоследствии к этим телам можно добавлять классические конструктивные элементы, доступные в САПР. Поверхности свободных форм не параметрические; все, что делается с ними в части редактирования, происходит визуально.

Необходимо отметить возможность создания табличных деталей и табличных сборок. При редактировании только в таблице или при добавлении строк таблицы возможна параметризация в ЭМИ.

Так же, как при параметризации в эскизе, создаются параметры, которые конструктор вводит в диалоговых окнах по мере построения детали. Помимо численных значений переменных используются настройки направлений, нормалей, свойств, которые находятся в инструментах, создающих геометрию. К этим элементам конструктор обращается через обозреватель модели, показывающий дерево построения детали либо состав сборочной единицы. Именно в нем записывается вся хронология построения, и разработчик имеет возможность не только настраивать элементы, управлять ими в обозревателе, но и удалять элементы, менять их последовательность – при том условии, конечно, что сохраняются наследственные связи. Таким образом, конструктор оперирует не геометрией, а инструментами, ее создавшими. Это открывает большие возможности редактирования формы детали, так как разработчик вводит понятия, которыми управляет численно (например, количество отверстий в круговом массиве и т.д.). Отверстие при этом является «родителем», который отвечает за диаметр, резьбу, глубину и т.д., а массив только размножает элемент вокруг оси либо участка цилиндрической или конической поверхности.

При создании сборок записывается информация о положении деталей относительно друг друга, благодаря чему ими можно управлять. Если механизм имеет несколько геометрических состояний, на основе этой информации создаются позиционные представления.

Существует возможность создавать табличные детали или сборки, когда для каждого параметра составляется список возможных значений. Также можно воспользоваться генератором форм для корректировки геометрии в заданных пределах. Если в рамках одного проекта необходимо получить несколько исполнений, существующих одновременно и не связанных друг с другом, рекомендуется воспользоваться командой «Сохранить как». Создается новая электронная модель, которая корректируется посредством параметров. Таким образом, возможно получить столько исполнений, сколько требуется.

Если говорить о сборке, то в ее контексте существует инструмент копирования, создающий новые детали с новыми обозначениями и наименованиями. В этом случае процесс создания новых экземпляров существенно ускоряется. Данным инструментом пользуются, когда сборка реструктуризируется и всем деталям нужно присвоить обозначения с учетом вложенности, которые будут указаны в именах файлов. Необходимость реструктуризации возникает часто, поскольку в ходе разработки состав изделия может неоднократно меняться.

Механизм изменения детали или сборки посредством параметризации позволяет оперативно менять ее размеры, поэтому создание ряда исполнений не представляется сложной задачей.

Для автоматизации построения геометрии существует инструмент, позволяющий создавать «умные» детали, использующие элементы программирования. В результате деталь может подстраиваться под определенные условия, не только менять значения своих размеров, но и перестраиваться по параллельным веткам, используя альтернативные наборы инструментов.

Можно создавать правила, которые при запуске вручную или при срабатывании инициатора будут выполняться, модифицируя деталь в соответствии с кодом, написанным в правиле. Также есть возможность использовать подобные инструменты для создания новых деталей при чтении файла Excel. Это позволяет быстро создавать ряды деталей из массива данных.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ГЛОССАРИЙ

Цифровизация	
Цифровая стратегия	Процесс формулирования целей компании или бренда и составления плана их достижения с помощью цифровых технологий. Это прежде всего нацеленность на рост оборота, а не борьба за сокращение затрат
Цифровая трансформация	Изменение подхода к ведению бизнеса (бизнес-модели) за счет интеграции инновационных технологий во все аспекты бизнес-деятельности, требующее внесения коренных преобразований в технологии, культуру, операции и принципы создания новых продуктов и услуг с целью обеспечения коммерческого успеха в условиях новой цифровой экономики
Умное производство (Smart Manufacturing)	Полностью интегрированные, совместные производственные системы, которые *в режиме реального времени* реагируют на изменяющиеся требования и условия на производственном предприятии, в сети поставок и в потребностях клиентов
Фабрики Будущего 5 (Factories of the Future)	Определенный тип системы бизнес-процессов, способ комбинирования бизнес-процессов, который имеет следующие характеристики: • создание цифровых платформ, своеобразных экосистем передовых цифровых технологий. На основе предсказательной аналитики и больших данных платформенный подход позволяет объединить территориально распределенных участников процессов проектирования и производства, повысить уровень гибкости и кастомизации с учетом требований потребителей; • разработка системы цифровых моделей как новых проектируемых изделий, так и производственных процессов. Цифровые модели должны обладать высоким уровнем адекватности реальным объектам и реальным процессам (конвергенция материального и цифрового миров, порождающих синергетические эффекты); • цифровизация всего жизненного цикла изделий (от концепт-идеи, проектирования, производства, эксплуатации, сервисного обслуживания и до утилизации). Чем позже вносятся изменения, тем их стоимость больше, а потому центр тяжести смещается в сторону процессов проектирования, в рамках которых закладываются характеристики глобальной конкурентоспособности или высокие потребительские требования

Умные (цифровые) услуги	Обработка потока данных с формированием решений на их основе в реальном времени
Цифровой двойник (Digital Twin) 26	Семейства сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, реальным объектам/конструкциям/машинам/приборам/техническим и киберфизическим системам, физико-механическим процессам (включая технологические и производственные процессы), описываемых 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных. Высокий уровень адекватности означает, что цифровой двойник должен обеспечивать отличие между результатами виртуальных и физических/натурных испытаний в пределах ± 5%.
Цифровая тень (Digital Shadow) 28	Система связей и зависимостей, приближенно описывающих поведение реального объекта (как правило, в нормальных условиях работы) и содержащихся в избыточных больших данных (Big Data), получаемых с реального объекта при помощи технологий промышленного интернета. Цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных, но не позволяет моделировать ситуации, в которых реальный объект не эксплуатировался. Для формирования цифровой тени посредством выявления связей и зависимостей используются методы предиктивной аналитики
Промышленный интернет вещей (IIoT)	Платформа сбора потока данных от разных источников на основе интернет-решений (в том числе с открытыми кодами): от умных физических вещей (датчиков, систем ЧПУ, MDA-данных) и от информационных «вещей» (PLM-систем, ERP-систем, MES-систем). На этой платформе и формируется правильная цифровая тень предприятия как единый источник достоверных данных о ключевых материальных процессах (МП) на этом предприятии
Автоматизированные системы	
Корпоративная сервисная шина данных (Enterprise Service Bus), ESB, КСШД	Прикладная АС, предназначенная для построения распределенного информационного ландшафта предприятия. Обеспечивает взаимодействие всех интегрируемых приложений в одном центре, объединяя существующие источники информации и предоставляя централизованный обмен данными между разными информационными системами
Модуль интеграции PDM-системы	Модуль PDM-системы, функционал которого встроен в функционал прикладной АС и/или САПР и позволяет выполнять функции сохранения, обработки и управления

	проектными данными в PDM-системе непосредственно в интерфейсе прикладной АС и/или САПР
Прикладная автоматизированная система, прикладная АС (ГОСТ 58300-2018)	АС, предназначенная для решения задач на одной или нескольких стадиях ЖЦ изделия
Система управления взаимоотношениями с клиентами (Customer Relationship Management), CRM	Автоматизированная система, предназначенная для автоматизации стратегий взаимодействия с заказчиками (клиентами), в частности для повышения уровня продаж, оптимизации маркетинга и улучшения обслуживания клиентов путем сохранения информации о клиентах и истории взаимоотношений с ними, установления и улучшения бизнес-процессов и последующего анализа результатов
Система управления данными об изделии (АС УДИ, Product Data Management), PDM-система (ГОСТ 58300-2018)	Автоматизированная система, обеспечивающая создание (разработку), получение, безопасное хранение, преобразование, сопровождение конструкторских. технологических, производственных, эксплуатационных и других данных об изделии и их предоставление потребителям в соответствии с установленными правилами
Система электронного документооборота (Electronic Document Management), СЭД, EDM	Организационно-техническая система, обеспечивающая процесс создания, управления доступом и распространения электронных документов в компьютерных сетях, а также обеспечивающая контроль над потоками документов в организации
Система автоматизации изготовления, CAM (computer-aided manufacturing)	Класс АС для автоматизации расчета обработки изделий на станках с ЧПУ
Система автоматизированного проектирования, САПР, CAD (Computer-aided Drafting) (ГОСТ 23501.101-87)	Прикладная АС, входящая в структуру проектной организации и осуществляющая проектирование при помощи комплекса средств автоматизированного проектирования (КСАП)
Система инженерного анализа, CAE (Computer-aided Engineering)	Класс АС для инженерных расчетов, анализа и симуляции физических процессов
Система мониторинга станков с ЧПУ, MDC/MDA (Machine Data Collection/Machine Data Acquisition)	Автоматизированная система, осуществляющая функции по сбору данных о технологических режимах (подача, обороты, нагрузка), выполняемой в данный момент управляющей программе (УП), кодах ошибок, причинах простоя, оценке эффективности работы как единицы оборудования, так и всего станочного парка, принятии

	управленческих решений по внесению изменений в производственный процесс, а также функции передачи всей совокупности информации в MES-систему
Система организации производства(manufacturing execution system), MES	Автоматизированная система, предназначенная для производства необходимых изделий или оказания необходимых услуг, включающая в себя контроль качества, управление документооборотом, внутризаводское диспетчерское управление, отслеживание незавершенного производственного процесса, контроль соблюдения операционной технологической карты, протоколирование производственного процесса, управление ресурсами и исправлением бракованных изделий, контрольно-измерительные процедуры и сбор данных
Система планирования производства продукции (Manufacturing Process Management), MPM	АС для управления производственными процессами
Система управления и планирования ресурсами (предприятия), СУПР, ERP-система (Enterprise Resources Management)	Модульная АС, реализующая стратегию планирования ресурсов предприятия, осуществляет связь между производственными процессами в различных функциональных областях деятельности предприятия за счет консолидации информации в едином источнике и предоставления средств для эффективного обмена этой информацией в реальном масштабе времени
Система управления производственными активами, EAM-система (Enterprise Assets Management) (ГОСТ Р 55.0.01-2014/ИСО 55000:2014)	Автоматизированная система управления основными фондами предприятия в рамках стратегии управления активами
Жизненный цикл, управление жизненным циклом	
Жизненный цикл продукции, ЖЦП (ГОСТ 15.000-2016)	Совокупность взаимосвязанных процессов последовательного изменения состояния продукции от обоснования ее разработки до окончания эксплуатации и последующей ликвидации
Стадия жизненного цикла (ГОСТ 15.000-2016)	Часть жизненного цикла продукции, характеризующаяся совокупностью выполняемых работ и их конечными результатами
Система разработки и постановки продукции на производство, СРПП (ГОСТ Р 15.000-2016)	Комплекс взаимосвязанных основополагающих организационно-методических и общетехнических национальных стандартов, устанавливающих основные положения, правила и требования, обеспечивающие техническое и организационное единство выполняемых

	работ на стадиях ЖЦП и на стадии ликвидации продукции, а также взаимодействие заинтересованных сторон
Управление жизненным циклом (изделия) (CIMData), Product Lifecycle Management, PLM	Концепция ведения бизнеса на основе системных решений, обеспечивающих коллективную разработку, распространение и использование технических данных об изделии, а также управление ими, начиная с создания концептуального прототипа изделия и заканчивая его утилизацией. PLM обеспечивает интеграцию персонала, производственных процессов, бизнес-систем и информации
Этап жизненного цикла (ГОСТ 56136-2014)	Часть стадии ЖЦ, выделяемая по признакам моментов контроля (контрольных рубежей), в которых предусматривается проверка характеристик проектных решений типовой конструкции и/или физических характеристик экземпляров изделий
Изделие, управление изделием и требованиями к нему	
Единичное производство (ГОСТ 14.004-83)	Производство, характеризуемое малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматриваются
Серийное производство (ГОСТ 14.004-83)	Производство, характеризуемое изготовлением или ремонтом изделий периодически повторяющимися партиями
Составная часть изделия, СЧ (ГОСТ 2.101-2016)	Изделие, выполняющее определенные функции в составе другого изделия **Примечание.** Понятие «Составная часть изделия» следует применять в отношении конкретного изделия, в состав которого оно входит. По конструкторско-функциональным характеристикам СЧ может быть любым видом изделия (деталь, сборочная единица, комплекс и комплект)
Деталь (ГОСТ 2.101-2016)	Изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций
Сборочная единица (ГОСТ 2.101-2016)	Изделие, составные части (СЧ) которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями (свинчиванием, сочленением, клепкой, сваркой, пайкой, запрессовкой, развальцовкой, склеиванием, сшиванием, укладкой и т.п.)
Изделие (ГОСТ 2.101-2016)	Любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии
Конфигурация изделия, исполнение (ГОСТ 56136-2014)	Структурированная совокупность свойств (конструктивных, функциональных и эксплуатационных характеристик) предполагаемого к разработке,

	разрабатываемого или существующего изделия, описываемая, в зависимости от стадии (этапа) жизненного цикла: • комплектом документов и данных, определяющих требования к вновь создаваемому или модифицируемому изделию; • комплектом документов и данных, определяющих конструкцию изделия или ее модификацию; • конструкцией изготовленного изделия с учетом особенностей его исполнения, или их сочетанием
Схема деления изделия на составные части, схема деления, СДИ (ГОСТ 2.711-82)	Конструкторский документ (ГОСТ 2.102-2013), определяющий состав изделия, входимость составных частей, их назначение и взаимосвязь
Управление конфигурацией (изделия) (ГОСТ 56136-2014)	Деятельность в области управления процессами создания изделия, направленная на обеспечение соответствия изделия заданным требованиям с учетом изменений в конструкции изделия и предусматривающая систематический контроль соответствия заданным требованиям и процедуры управления необходимыми изменениями конструкции, документации и данных
Управление требованиями (к изделию) (ГОСТ 56136-2014)	Деятельность в области формирования требований к изделию, их структурирования и документирования, взаимного согласования, проверки выполнения заданных требований в рамках программы (проекта) и согласованного и контролируемого их изменения при необходимости
Электронный состав изделия, ЭСИ (ГОСТ 2.053-2017)	Электронный конструкторский документ (ГОСТ 2.102-2013, ГОСТ 2.051-2013), содержащий описание изделия (сборочной единицы, комплекта или комплекса), иерархические отношения между его составными частями и другие данные в зависимости от его назначения. ЭСИ выполняется только как электронный КД, предназначенный для использования в вычислительной среде
Компьютерные модели	
2D	Отображение геометрии объектов и их местоположения на плоскости (в координатах X и Y)
3D	Отображение геометрии объектов и их местоположения в пространстве (в координатах X, Y и Z)
Вспомогательная геометрия модели (ГОСТ 2.052-2015)	Совокупность геометрических элементов, которые не являются элементами моделируемого изделия

Выявление и анализ коллизий	Процесс обнаружения ошибок в геометрической модели, возникших в результате взаимных пересечений, нарушения допустимых расстояний между элементами, логических связей между элементами, нормируемых параметров и др., а также обработка этих ошибок (работа со статусом ошибки, комментирование и рецензирование места ошибки)
Каркасная геометрическая модель (ГОСТ 2.052-2015)	Трехмерная геометрическая модель, представленная совокупностью точек, отрезков и кривых, определяющих в пространстве форму изделия
Компьютерная модель, КМ (ГОСТ 57412-2017)	Модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными
(Компьютерное) моделирование изделия (ГОСТ 57412-2017)	Моделирование, выполненное с использованием компьютерной модели изделия
Математическая модель (ГОСТ 57412-2017)	Модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений
Твердотельная (геометрическая) модель (ГОСТ 2.052-2015)	Трехмерная геометрическая модель, представляющая форму изделия как результат композиции множества геометрических элементов с применением операций булевой алгебры к этим геометрическим элементам
Технология параметрического моделирования	Способ компьютерного моделирования (проектирования) изделия с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами
Электронная геометрическая модель изделия (ГОСТ 2.052-2015), ЭГМИ	Электронная модель изделия, описывающая преимущественно геометрическую форму, размеры и иные свойства изделия, зависящие от его формы и размеров
Управление инженерными данными	
Атрибут (информационного объекта), атрибут ИО в АС УДИ (PDM-системе)	Информационное отображение свойств объекта в АС УДИ (PDM-системе). Все ИО в АС УДИ (PDM-системе) имеют как минимум один атрибут (в таком случае этот атрибут является обязательным)
Версия (информационного объекта, информационного набора) версия ИО, версия ИН (ГОСТ 58300-2018)	Вариант ИН (ИО), данные которого актуальны в определенные периоды времени или соответствуют определенным условиям

(Внешняя) ссылка	Файл ДЭ, подключаемый к другому файлу ДЭ средствами прикладной АС с целью формирования агрегированного электронного документа по ГОСТ 2.051
Информационный набор, ИН (ГОСТ 58300-2018)	Идентифицированная совокупность ИО, содержащих сведения об изделии и отобранных с какой-либо целью или по какому-либо признаку (совокупности признаков)
Информационный объект, ИО (ГОСТ 58300-2018)	Идентифицированная совокупность данных в информационной системе **Примечание.** В рамках настоящего документа ИО является частным случаем ИН, состоящего из одного ИО
Проектно-конструкторские работы, ПКР (ГОСТ 58300-2018)	Работы по проектированию и конструированию изделий, выполняемые в составе опытно-конструкторских работ (ОКР)
Результат проектно-конструкторских работ, РКР (ГОСТ 58299-2018)	Часть результата ОКР, представляющая собой комплект конструкторских документов (в бумажной или электронной форме) и/или комплект ИН в АС УДИ (PDM-системе), содержащих информацию, необходимую для разработки, изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации, ремонта, модернизации и утилизации изделия
Среда коллективной работы с изделием (СКР-И)	Совокупность ПТК прикладных АС и PDM-системы (АС УДИ), а также программных модулей, обеспечивающих интеграцию и/или обмен данными между ними, представляющая единый источник данных и обеспечивающая совместное использование информации всеми участниками процессов поддержки ЖЦ изделия
Электронные и бумажные документы	
Извещение об изменении (ГОСТ 2.503-2013), ИИ	Документ, содержащий сведения, необходимые для внесения изменений в подлинники конструкторских (технологических) документов, их замены или аннулирования, в том числе причину и срок внесения изменений, а также указания об использовании задела изменяемого изделия
Интерактивное электронное техническое руководство, ИЭТР (ГОСТ 2.601-2013)	Обобщенное название для взаимосвязанной совокупности эксплуатационных документов, выполненных в форме интерактивного электронного документа по ГОСТ 2.051 и, как правило, содержащихся в одной общей базе данных эксплуатационной документации
Комплект технологической документации (ГОСТ 3.1109-82), комплект ТД	Совокупность комплектов документов технологических процессов и отдельных документов, необходимых и достаточных для выполнения технологических процессов

	при изготовлении и ремонте изделия или его составных частей
Конструкторская документация, комплект КД (ГОСТ 2.001-2013)	Совокупность конструкторских документов, содержащих данные, необходимые для проектирования (разработки), изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации, ремонта, модернизации, утилизации изделия
Конструкторский документ (ГОСТ 2.001-2013), КД	Документ, который в отдельности или в совокупности с другими документами определяет конструкцию изделия и имеет содержательную и реквизитную части, в том числе установленные подписи
Техническое задание (ГОСТ 15.016-2016), ТЗ	Исходный технический документ для проведения работы, устанавливающий требования к создаваемому изделию (его СЧ или КИМП) и технической документации на него, а также требования к объему, срокам проведения работы и форме представления результатов
Технологический документ (ГОСТ 3.1109-82), ТД	Графический или текстовый документ, который отдельно или в совокупности с другими документами определяет технологический процесс или операцию изготовления изделия
Электронный документ, ДЭ (ГОСТ 2.051-2013)	ИН/ИО с управляемым жизненным циклом, снабженный набором реквизитных и содержательных атрибутов в части требований ГОСТ 2.051
Электронная подпись, ЭП	Электронная подпись согласно Федерального закона №63-ФЗ
Электронный макет изделия	
Конструкторский ЭМИ, ЭИМ-К (ГОСТ 58301-2018)	Взаимосвязанная совокупность ИН, описывающих конструкцию и требования к изготовлению (сборке) изделия
Технологический ЭМИ, ЭМИ-Т (ГОСТ 58301-2018)	Взаимосвязанная совокупность ИН, описывающих технологию изготовления (сборки) изделия и используемых для планирования, оценки и организации процесса изготовления изделия
Функциональный ЭМИ, ЭМИ-Ф (ГОСТ 58301-2018)	Взаимосвязанная совокупность ИН, описывающих устройство, состав, характеристики, принципы работы и возможные нарушения работоспособного или исправного состояния изделия
Эксплуатационный ЭМИ, ЭМИ-Э (ГОСТ 58301-2018)	Взаимосвязанная совокупность ИН, описывающих эксплуатационные свойства изделия и требования к процессу его технической эксплуатации
Электронный макет изделия, ЭМИ (ГОСТ	Совокупность ИН разных видов, в том числе КМ изделия (его составных частей и, при необходимости, процессов, непосредственно связанных с изделием) в соответствии с

58301-2018)(Digital Mock-Up, DMU)	ГОСТ Р 57412. ЭМИ разрабатывают и сопровождают в АС УДИ с применением прикладных АС, интегрированных с АС УДИ. ЭМИ является одним из возможных видов представления РКР (части результата) в электронной форме в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58299

Сокращения

CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAE	Computer-aided Engineering
CAPP	Computer-Aided Process Planning
CRM	Customer Relationship Management
EAM	Enterprise Assets Management
ECM	Enterprise Content Management
EDM	Electronic Document Management
ERP	Enterprise Resources Planning
ESB	Enterprise Service Bus
MES	Manufacturing Execution System
MDC/MDA	Machine Data Collection/Machine Data Acquisition
MPM	Manufacturing Process Management
PDM	Product Data Management
RMS	Requirements Management System
SCM	Supply Chain Management
SOAP	Simple Object Access Protocol
BPMS	Business Process Management System
АС	Автоматизированная система
АС УДИ	Автоматизированная система управления данными об изделии
АСУТ	Автоматизированная система управления требованиями
БД	База данных
БП	Бизнес-процесс
ДЭ	Электронный документ

ЖЦП	Жизненный цикл продукции
ИИ	Извещение об изменении
ИИС	Интегрированная информационная среда
ИН	Информационный набор
ИЭТР	Интерактивное электронное техническое руководство
КД	Конструкторский документ
КМ	Компьютерная модель
КСШД	Корпоративная сервисная шина данных
НД	Нормативный документ
ПКР	Проектно-конструкторские работы
ПТК АС	Программно-технический комплекс автоматизированной системы
РКР	Результат проектно-конструкторских работ
САПР	Система автоматизированного проектирования
САПР ТП	Система автоматизированной технологической подготовки производства
СДИ	Схема деления изделия на составные части
СКР-И	Среда коллективной работы с изделием
СРПП	Система разработки и постановки продукции на производство
СЭД	Система электронного документооборота
ТД	Технологический документ
ТЗ	Техническое задание
УЖЦИ	Управление жизненным циклом (изделия)
ЭГМИ	Электронная геометрическая модель изделия
ЭМИ	Электронный макет изделия
ЭМИ-К	Конструкторский ЭМИ
ЭМИ-Т	Технологический ЭМИ
ЭМИ-Ф	Функциональный ЭМИ
ЭМИ-Э	Эксплуатационный ЭМИ
ЭП	Электронная подпись
ЭСИ	Электронный состав изделия

БИБЛИОГРАФИЯ

1. 5 лучших KPI для производства. – http://www.up-pro.ru/forum/topic179.html/page__st__30.
2. Биленко П.Н. Комплексная оценка развития предприятия как инструмент повышения производительности труда / П.Н. Биленко, Л.В. Лысенко, С.Л. Лысенко, И.С. Завалеев. – М., Сколково, 03-2018. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. Рабочий доклад Департамента Корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО. – http://odm3.io/.
3. Зинаида Сацкая. В ногу со временем или работа на опережение? / Аддитивные технологии, № 4/2018. – URL: https://additiv-tech.ru/publications/v-nogu-so-vremenem-ili-rabota-na-operezhenie.html.
4. Индекс зрелости Индустрии 4.0. – https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_rus_Maturity_Index_WEB.pdf.
5. «Индустрия 4.0» без предрассудков / РБК+ партнерские проекты, выпуск №10, 21 августа 2018. – https://plus.rbc.ru/news/5b7be96b7a8aa9225970941e
6. Индустрия 4.0 в ПАО «КАМАЗ» / Портал «Управление производством», 28 мая 2018 г. - http://www.up-pro.ru/library/strategy/tendencii/kamaz-industry4.html.
7. Комарова Л.А. Применение технологии нисходящего проектирования, основанной на решениях Windchill PDMLink и САПР PRO/Engineer, для разработки изделий ракетно-космической техники / Л.А.Комарова, А.Н. Филатов. Самарский государственный аэрокосмический университет, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ – Прогресс», г. Самара, 20.03.2011. – https://cyberleninka.ru/article/v/primenenie-tehnologii-nishodyaschego-proektirovaniya-osnovannoy-na-resheniyah-windchill-pdmlink-i-sapr-pro-engineer-dlya-razrabotki.
8. Космический посадочный модуль, спроектированный ИИ / журнал «Популярная механика», 15 ноября 2018 г. – https://www.popmech.ru/technologies/news-449742-kosmicheskiy-posadochnyy-modul-sproektirovannyy-ii/.
9. Кузин Е.И. Управление жизненным циклом сложных технических систем: история развития, современное состояние и внедрение на машиностроительном предприятии / Е.И. Кузин, В.Е. Кузин. Инженерный журнал: наука и инновации № 1, 2016. – URL: http://engjournal.ru/articles/1457/1457.pdf.
10. КЭЛС-центр. Технологии PLM. – URL: http://www.calscenter.ru/technology/.
11. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения. / Центр компьютерного инжиниринга СПбПУ, 08.04.2018. – http://fea.ru/news/6721.
12. Обзор софта для топологической оптимизации и бионического дизайна. https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/411999/.
13. Официальный сайт Ассоциации «ТЕХНЕТ». – https://technet-nti.ru/article/fabriki-buducshego.
14. Оценка эффективности внедрения киберфизических технологий: от цифрового развития к цифровой зрелости. – http://integral-russia.ru/2019/03/05/otsenka-effektivnosti-vnedreniya-kiberfizicheskih-tehnologij-ot-tsifrovogo-razvitiya-k-tsifrovoj-zrelosti/.
15. Полянсков Ю.В. Интеграция САПР-, PDM-, ERP-систем в единое информационное пространство производственного предприятия. / Ю.В. Полянсков, А.С. Кондратьева, М.С. Черников, А.А. Блюменштейн. – Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 15, № 4(3), 2013. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-capp-pdm-erp-sistem-v-edinoe-informatsionnoe-prostranstvo-proizvodstvennogo-predpriyatiya.

16. Проблемы и тенденции цифровой трансформации предприятия: от заимствования до собственных индустриальных ИТ-решений. – http://integral-russia.ru/2019/05/30/problemy-i-tendentsii-tsifrovoj-transformatsii-predpriyatiya-ot-zaimstvovaniya-do-sobstvennyh-industrialnyh-it-reshenij/.
17. Прогноз реализации приоритета научно-технологического развития, определенного пунктом 20а Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации / Центр компьютерного инжиниринга СПбПУ. – http://fea.ru/article/prognoz-realizacii-prioriteta-nauchno-tehnologicheskogo-razvitiya-opredelennogo-punktom-20a-strategii-nauchno-tehnologicheskogo-razvitiya-rossijskoj-federacii.
18. Семен Попадюк. Девять шагов к созданию аддитивного центра на предприятии / Аддитивные технологии, № 3/2019. – URL: https://additiv-tech.ru/publications/devyat-shagov-k-sozdaniyu-additivnogo-centra-na-predpriyatii.html.
19. Сервисная бизнес-модель – новые конкурентные преимущества для производственных компаний. – https://hbr-russia.ru/innovatsii/tekhnologii/a18573.
20. Теория организации (Кузнецов Ю.В., 2015). – http://be5.biz/ekonomika/o006/11.html
21. Технологии аддитивного производства и топологической оптимизации / Центр инженерно-физических расчетов и анализа. – https://www.multiphysics.ru/stati/blog/tekhnologii-additivnogo-proizvodstva-i-topologicheskoi-optimizatcii.htm.
22. «Умные технологии» на службе продуктовых программ: интервью А.И. Боровкова для «Проектного вестника ОДК». – http://fea.ru/news/6796.
23. Цифровые технологии в российских компаниях. – https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ru/pdf/2019/01/ru-ru-digital-technologies-in-russian-companies.pdf.
24. Что такое цифровая экономика? Тренды, компетенции, измерение. – М., Высшая школа экономики, 2019. – https://issek.hse.ru/data/2019/04/10/1174567204/Цифровая_экономика.pdf
25. Цифровой двойник на производстве: задачи, вопросы, перспективы / Портал «Управление производством», 15 апреля 2019 г. – http://www.up-pro.ru/library/information_systems/project/d7fb9dd59e1ffa29.html.
26. Цифровая трансформация экономики и промышленности. Сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием, 20-22 июня 2019 г. / под ред. д.э.н., проф. А.В. Бабкина. – СПб., ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 780 с.
27. Цифровая трансформация экономики и промышленности. Сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием, 20-22 июня 2019 / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/06_june/24/INPROM_Cifrovye_dvoyniki.pdf.
28. Эксперты Ассоциации «Технет» приняли участие в подготовке доклада РАНХиГС «Государство как платформа: люди и технологии». – https://technet-nti.ru/news/6852.
29. Ярослав Решетников. Платформа Autodesk Forge: компоненты для создания инженерных веб-сервисов. Autodesk, 2018. – URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19840.
30. Autodesk Technology Center – Birmingham, UK https://www.youtube.com/watch?v=gtR7g4JYisE.
31. Kenneth Wong. Manufacturing Awareness Signals a New Phase in Generative Design. https://www.digitalengineering247.com/article/manufacturing-awareness-signals-a-new-phase-in-generative-design/generative-design.
32. MX3D Printed Bridge Update 2018. – https://youtu.be/STAHy6hTP14.

33. Боровков А.И., Гамзикова А.А., Кукушкин К.В., Рябов Ю.А. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад (сентябрь 2019 года). – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 62 с.
34. Stephen Hooper, The Promise of Manufacturing Automation for All Starts With Generative Design. – https://www.autodesk.com/redshift/manufacturing-automation/.
35. STRATEGY, NOT TECHNOLOGY, DRIVES DIGITAL TRANSFORMATION. Becoming a Digitally Mature Enterprise. - https://sloanreview.mit.edu/projects/strategy-drives-digital-transformation/
36. Wohlers Report 2019 Details Striking Range of Developments in Additive Manufacturing Worldwide. https://wohlersassociates.com/press77.html.