

Авторы:
Александр Прохоров
Михаил Лысачев
Научный редактор:
Проф. **Алексей Боровков**

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК



Анализ
Тренды
Мировой опыт

Корпоративное издание

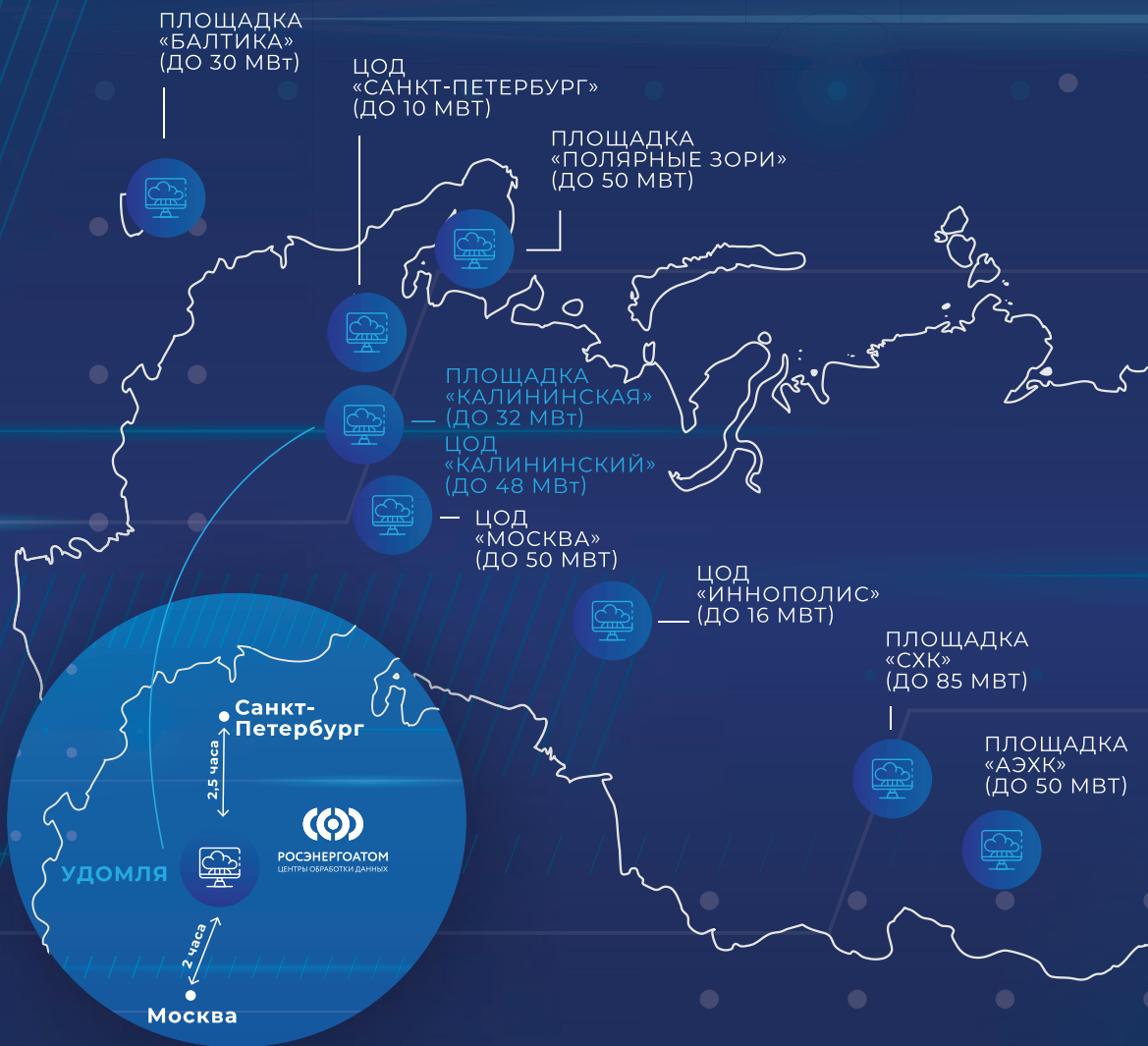


РОСЭНЕРГОАТОМ
РОСАТОМ



РОСЭНЕРГОАТОМ
ЦЕНТРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ГЕОРАСПРЕДЕЛЕННАЯ СЕТЬ ЦОД РОСАТОМА



Контакты



atomdata.ru
support@atomdata.ru



РОСЭНЕРГОАТОМ
ЦЕНТРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ЦОД «КАЛИНИНСКИЙ» - КРУПНЕЙШИЙ
НАДЕЖНЫЙ ДАТА-ЦЕНТР В РОССИИ
И ОДИН ИЗ КРУПНЕЙШИХ В ЕВРОПЕ,
РАСПОЛОЖЕННЫЙ В Г. УДОМЛЯ
ВБЛИЗИ КАЛИНИНСКОЙ АЭС



КОНСИСТ-ОС
РОСАТОМ



Выделенная
мощность - 48МВт



Размещение до 4800
ИТ-стоек



Бесперебойное
энергоснабжение
напрямую от АЭС



Минимальные цены
на электроэнергию



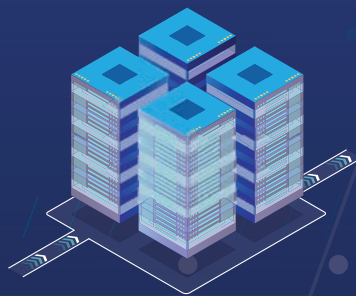
Максимальный уровень
физической безопасности



Уровень надежности
сетевой инфраструктуры -
TIER III



РАЗМЕЩЕНИЕ
ИТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ



КОНТЕЙНЕРНЫЕ
И МОДУЛЬНЫЕ ЦОД
ПОД КЛЮЧ



ИНФОРМАЦИОННАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ



ОБЛАЧНАЯ
ИНФРАСТРУКТУРА

Александр Прохоров, Михаил Лысачев
Научный редактор профессор Алексей Боровков

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК

Анализ, тренды, мировой опыт

Корпоративное издание

Москва
2020

УДК 339.97

ББК 65.29

П844

П844 Прохоров А., Лысачев М.

Научный редактор профессор Боровков А.

Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил.

Книга дает представление о технологии цифровых двойников и формирующемся рынке услуг по их разработке. Материал адресован широкому кругу читателей – всем тем, кто хочет разобраться с технологией ЦД и областью ее применения.

УДК 339.97

ББК 65.29

ISBN 978-5-98094-008-9

© Александр Прохоров, Михаил Лысачев

Оглавление

Благодарности	5
Об авторах	6
Обращение к читателю	9
Приветственное слово	11
Глава 1. Концепция, определения и классификация ЦД	14
Определение ЦД и эволюция термина	14
ЦД и эволюция составляющих технологий	33
Инжиниринговые инструменты для создания ЦД и их эволюция	39
ЦД и оптимизация изделия, аддитивные технологии	55
Технологии сбора и обработки данных для создания ЦД	64
Технологии математического моделирования и цифровых теней ...	69
ЦД, облака и периферийные вычисления	83
ЦД и новые человеко-машинные интерфейсы	87
ЦД и Блокчейн	95
Схема ЦД и роль составляющих технологий	96
ЦД как способ преодоления сложности инженерных систем	101
ЦД и концепция MBSE	101
ЦД как интеграция этапов жизненного цикла изделия	119
Объединение ЦД в комплексных объектах и их взаимодействие ...	135
Типы ЦД и их классификация	142
Классификация ЦД по уровню сложности	142
Классификация ЦД по уровню зрелости	144
Другие виды классификации и обобщенная схема	147
Трактовка термина «ЦД» в разных отраслях экономики	149
Границы восприятия термина «ЦД» в профессиональном сообществе	151
Глава 2. Рынок цифровых двойников	156
ЦД на пике завышенных ожиданий	156
Игроки рынка ЦД и варианты их ранжирования	178
Зарубежные поставщики ПО для построения ЦД	188
Зарубежные поставщики комплексных решений класса ЦД	204
Российские поставщики ПО для построения ЦД	230
Российские поставщики комплексных решений класса ЦД	241

Глава 3. Примеры использования ЦД в разных отраслях.....	258
ЦД в транспортном машиностроении и на транспорте	258
ЦД в автомобильной промышленности	258
ЦД в аэрокосмической отрасли	271
ЦД в судостроении и эксплуатации водного транспорта.....	277
ЦД в железнодорожном транспорте.....	280
ЦД в архитектурном проектировании и строительстве	283
ЦД в нефтегазовой отрасли.....	298
ЦД в энергетике	309
Атомная энергетика.....	318
ЦД в здравоохранении и медицине.....	337
ЦД в сельском хозяйстве	342
ЦД водных объектов.....	345
Применение ЦД в других областях	347
Будущее цифровых двойников.....	352
Приложение	358
Используемые источники	364

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность коллегам, оказавшим помощь в подготовке этой книги.

Прежде всего хочется поблагодарить Сергея Мигалина и Сергея Немченкова. Это они подали идею написания книги и всячески способствовали ее осуществлению, в том числе организовав обсуждение разделов будущей рукописи в рамках цифрового семинара АО «Концерн Росэнергоатом». Отдельная благодарность научному редактору книги, профессору Алексею Боровкову, признанному лидеру развития научной школы «цифровых двойников» (ЦД) в России.

Авторы также выражают свою признательность сотрудникам АО «Концерн Росэнергоатом» Олегу Шальнову, Виктору Царану, Андрею Дружаеву, Александру Ребергеру, которые активно участвовали в обсуждении вопросов применения технологии ЦД в атомной энергетике и предоставили свою профессиональную экспертизу.

Авторы благодарят экспертов в области цифровизации Михаила Бубнова, Александра Самарина, Сергея Попова, Владимира Стручкова, Тимура Уджуху, Владислава Збитнева, Анну Гамзикову, Юрия Рябова, Сергея Щепнова, которые, как говорится, «с карандашом в руке» прочитали рукопись на стадии ее обсуждения и внесли ценные замечания. Авторы также выражают благодарность Эдуарду Пройдакову, Константину Кудашеву, Николаю Струеву, Ивану Хомякову, Дмитрию Жильцову, Вадиму Подольному, Юрию Абрамову и Елене Семеновской за их пожелания и рекомендации к отдельным разделам книги.

Об авторах

Александр Николаевич Прохоров

Около 25 лет работает в области информационных технологий.

С 2019 г. – в проектном офисе ЦОД и цифровых продуктов АО «Концерн Росэнергоатом», где занимается аналитическими исследованиями в области развития цифровых технологий.

Автор книги «Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт».

В 2015–2018 гг., будучи сотрудником Huawei, занимался анализом российского ИКТ рынка с целью разработки маркетинговой стратегии компании.

Прошел стажировку в учебном центре Huawei (г. Шэньчжэнь) по маркетингу и современным информационным технологиям.

До Huawei в течение 9 лет занимался аналитикой в компании IDC. Написал более 30 отчетов по рынкам различных информационных технологий.

До IDC 8 лет был редактором журнала «КомпьютерПресс», опубликовал три книги по ИКТ и несколько сотен статей в разных компьютерных журналах.

Перед этим работал в компаниях Silicon Graphics и Samsung.

До перестройки занимался научной деятельностью. Работал в МАТИ им. К. Э. Циолковского преподавателем и исследователем, занимался компьютерным моделированием прочности авиационных конструкций. Защитил в этой области кандидатскую диссертацию. За время учебы в аспирантуре МАТИ проходил стажировку в Массачусетском технологическом институте в Бостоне и Йоркском университете в Торонто.

Связаться с Александром можно по адресу:

prokhorov-an@rosenergoatom.ru

Михаил Николаевич Лысачев

Более 20 лет работает в области информационных технологий, прошел путь от разработчика информационных систем до генерального директора одного из крупнейших системных интеграторов атомной отрасли России.

За это время Михаил накопил огромный опыт в области разработки, внедрения и сопровождения самых разных информационных систем и цифровых продуктов корпоративного уровня, получил уникальный опыт управления масштабными ИТ проектами и большими коллективами разработчиков.

С 2015 г. по настоящее время Михаил работает генеральным директором АО «КОНСИСТ-ОС», которое является внутренним интегратором и центром компетенций в области информационных технологий Электроэнергетического дивизиона Государственной корпорации «Росатом».

Коллектив АО «КОНСИСТ-ОС» насчитывает более 1000 сотрудников, занимается проектированием и монтажом ИТ систем, развитием цифровых продуктов, информационных систем для АЭС, является центром цифровых технологий индустрии 4.0, а также оператором всех центров обработки данных (ЦОД) Электроэнергетического дивизиона Государственной корпорации «Росатом».

В 2010–2015 гг. Михаил работал в ЗАО «Гринатом» начальником управления сервисных центров, затем заместителем генерального директора и директором по качеству и управлению услугами.

В 1998–2009 гг., будучи сотрудником компании IBS, прошел путь от ведущего специалиста центра аутсорсинга до директора ИТ дирекции.

Окончил Государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина по специальности инженер-системотехник, а также получил дополнительное профессиональное образование в области ИТ технологий (Сертифицированный дизайнер и инженер Cisco (CCDP, CCNP), Управление проектами (IBM Project Manager)).

Связаться с Михаилом можно по адресу:
maiklatom@yandex.ru

Научный редактор Алексей Иванович Боровков

Более 40 лет работает в области разработки и применения вычислительных методов и технологий (метод конечных элементов, Finite Element Analysis), компьютерных и суперкомпьютерных технологий (Computer-Aided Engineering, High Performance Computing), передовых производственных и сквозных цифровых технологий (Advanced Manufacturing Technology, Smart Design), включая технологию разработки и применения цифровых двойников (Digital Twin).

Член-корреспондент Российской инженерной академии и Международной академии наук высшей школы, Почетный работник сферы образования Российской Федерации. Научный руководитель Института передовых производственных технологий (ИППТ) СПбПУ, профессор Высшей школы «Механика и процессы управления» СПбПУ, руководитель Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab) СПбПУ, член Совета по развитию цифровой экономики при Совете Федерации Федерального Собрания РФ, член Межведомственной рабочей группы по технологическому развитию при Правительственной комиссии по модернизации экономики и инновационному развитию России, член Совета по инжинирингу и промышленному дизайну при Минпромторге России, заместитель председателя Координационного совета «Инженерное дело, технологии и технические науки» Минобрнауки России, лидер-соруководитель рабочей группы «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы (НТИ), руководитель Центра компетенций НТИ «Новые производственные технологии» и Научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии» СПбПУ. Основатель группы компаний CompMechLab.

Обращение к читателю



Дорогие читатели! В последнее время АО «Концерн Росэнергоатом» уделяет повышенное внимание разработке, внедрению, анализу и популяризации цифровых технологий. В 2019 г. в АО «Концерн Росэнергоатом» стартовала инициатива по изданию серии книг, посвященных вопросам цифровизации. Предлагаемая вашему вниманию книга «Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт» – это вторая книга серии, и она является логическим продолжением публикации «Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт», которая появилась годом ранее.

Представив в первой книге широкий обзор цифровых технологий, во второй книге мы решили остановиться на теме цифровых двойников, которая в последние годы привлекла к себе особый интерес как в мире, так и в России.

В 2018 г. аналитическая компания Gartner отнесла цифровые двойники к десяти стратегическим направлениям развития информационных технологий. В 2019 г. в России была принята Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии», где, в частности, отмечается, что среди множества передовых технологий «цифровой двойник» является интегратором практически всех «сквозных» цифровых технологий и субтехнологий, выступает драйвером, обеспечивает прорывы и позволяет компаниям переходить на новый уровень устойчивого развития на пути к промышленному лидерству на глобальных рынках.

С точки зрения бизнеса технология цифровых двойников имеет большие перспективы и, прежде всего, потому, что она необходима клиенту не только для эксплуатации современного «умного» продукта, но и для его регулярной поддержки, получения обновлений и постоянной адаптации к новым требованиям и условиям.

Клиенту уже сегодня нужен физический продукт в «цифровой связке», уже сегодня он готов заплатить и за физический объект, и за виртуальный. А завтра на высококонкурентных рынках (в том числе

и в атомной энергетике) продать продукт можно будет только, если у вас будет одновременно и изделие, и его цифровой двойник.

Предлагаемая читателю книга является первой отечественной публикацией, в которой приводится подробное представление о технологии цифровых двойников и формирующемся рынке услуг по их разработке. Книга адресована широкому кругу читателей – всем тем, кто хочет разобраться с технологией ЦД и областью ее применения.

*Сергей Александрович Мигалин,
заместитель Генерального директора, директор
по экономике и финансам АО «Концерн Росэнергоатом»*

Приветственное слово



Акционерное общество «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» (АО «Концерн Росэнергоатом», Концерн Росэнергоатом) – один из крупнейших игроков российского рынка электроэнергии, занимающий 1-е место в общем объеме выработки электроэнергии в России среди крупнейших генерирующих компаний и 2-е место в мире по объему установленной мощности атомных станций (АЭС). Концерн Росэнергоатом также явля-

ется единственным оператором (эксплуатирующей организацией) атомных станций в России.

Концерн Росэнергоатом является головным предприятием электроэнергетического дивизиона Госкорпорации «Росатом». Деятельность Концерна Росэнергоатом неразрывно связана с бизнес-приоритетами Госкорпорации «Росатом» и базируется на трех ее стратегических целях:

- повышение доли на международных рынках;
- снижение себестоимости продукции и сроков протекания процессов;
- создание новых продуктов для российского и международных рынков.

Решение стоящих перед Концерном задач невозможно без цифровой трансформации атомной отрасли, и Концерн Росэнергоатом активно участвует в этом процессе – реализует целый ряд проектов по разработке и внедрению новых цифровых технологий, включая технологию цифровых двойников.

Сегодняшние технологические продукты стали намного сложнее, поддержать их без знаний производителя практически невозможно.

Знания производителя должны стать неотъемлемой частью продукта, который сам сможет сообщить о технических проблемах

изделия, о требуемом ремонте, дать любую справку и экспертное заключение.

Благодаря возрастающему росту сложности инженерных изделий приходится менять и стратегию создания продуктов. Сложность заключается не только в увеличении количества деталей в изделии, но также в том, что электроника, программное обеспечение и встроенные системы стали неотъемлемой частью любых высокотехнологичных продуктов, а интеграция этих частей становится отдельной задачей.

Для обеспечения надежности и безопасности многокомпонентного изделия необходимо резкое увеличение числа испытаний, которые, несомненно, быстрее и дешевле делать в виртуальном пространстве на стадии проектирования, чем на более поздней стадии в металле.

Оптимизация десятков тысяч параметров для создания конкурентоспособного изделия невозможна без использования технологии цифровых двойников. Решение задачи увеличения сложности систем при сохранении высокого уровня их безопасности имеет особое значение в атомной отрасли, учитывая, что АЭС – это одно из сложнейших инженерных сооружений, современности.

Несмотря на большой интерес к теме ЦД, следует отметить, что сама технология ЦД, как и решения на ее основе, все еще находятся на ранней стадии развития, когда профессиональное сообщество еще не выработало общепринятых определений и нормативов, когда специалисты еще спорят по многим вопросам – о том, что такое ЦД, какие виды ЦД существуют, в каких отраслевых решениях применим этот термин и т. п.

Ответы на эти вопросы требуют достаточно широкого анализа реализованных вариантов применения технологии ЦД на разных типах машин, механизмов и сооружений, в разных отраслях экономики, в разных странах.

Одно из достоинств предлагаемой вниманию читателя книги состоит в том, что в ней представлен широкий анализ применения ЦД в различных отраслях экономики и производств, проведен анализ научных и деловых публикаций по теме ЦД.

Проанализировав широкий спектр материалов и опыт компаний в сфере ЦД, авторам удалось сформулировать системный взгляд и ответить на вопросы: что такое цифровой двойник, какие техноло-

гии определяют данное понятие, кто принадлежит к категории ключевых игроков на этом рынке, какие конкретные примеры использования технологии ЦД существуют в разных отраслях.

Книга дает достаточно целостное представление о технологии ЦД, сформировавшееся на сегодняшний день. Надеюсь, всем, кто интересуется вопросами цифровизации, будет полезно иметь на своем рабочем столе (физическом или цифровом) экземпляр данной книги.

Технология ЦД не стоит на месте. С публикацией данной книги Концерн Росэнергоатом приглашает всех заинтересованных участников к обсуждению широкого круга затронутых в книге вопросов, в том числе области применения технологии ЦД, перспектив развития данной технологии, роли технологии ЦД в процессах цифровой трансформации секторов экономики России и атомной отрасли в частности.

Концерн Росэнергоатом обладает необходимыми ресурсами для реализации самых амбициозных задач и проектов в области инфраструктуры и цифровых технологий и открыт к сотрудничеству и диалогу для потенциальных партнеров и клиентов в целях достижения синергии в области цифрового развития.

*Немченков Сергей Николаевич,
директор Департамента управления
и развития бизнеса ЦОД АО «Концерн Росэнергоатом»*

Глава 1. Концепция, определения и классификация ЦД

«Цифровой двойник – это зона пересечения цифрового и реального мира».

Хардик Гохил (Hardik Gohil)

Определение ЦД и эволюция термина

Вероятно, читатели согласятся, что термин «цифровой двойник» (ЦД, Digital Twin, DT) стал крайне популярным в последнее время. Он используется в многочисленных статьях, выступлениях, в интернет-блогах. Но существует ли его общепризнанное толкование?

На момент написания этой книги (февраль 2020 г.) поисковая система Google выдавала более миллиона ссылок по запросу «Digital Twin», и среди этих ссылок можно обнаружить сотни статей, где приводится трактовка понятия ЦД.

Увы, разные авторы подразумевают под этим термином разные вещи, и человека, который хочет уточнить для себя понятие ЦД, разнообразие формулировок подчас приводит ко все более размытому представлению.

Углубившись в тему, можно заметить, что в разные периоды времени термин ЦД имел разные акценты. Зародилось это понятие в рамках инженерной парадигмы, применительно к промышленным изделиям, где прослеживалась четкая связь цифрового двойника с реальным объектом на всех стадиях жизненного цикла изделия. Эта концепция и по сей день остается основной. Однако со временем стали говорить и о ЦД процессов, где не всегда прослеживалась четкая связь с процессами физическими и технологическими. Потом появились публикации, где о цифровых двойниках заговорили не только как об изделиях промышленного производства, но и как о моделировании природных объектов, – возникли такие словосочетания, как, например, «цифровой двойник водоема» или даже «цифровой двойник человека». Термин получал все более широкие толкова-

ния в рамках разных приложений в разных сферах деятельности, и специалисты подгоняли его под свои области применения.

Вслед за инженерами последовали нефтяники, ритейлеры, врачи, – все стали говорить о создании цифровых двойников.

Возникла ситуация, когда без рассмотрения истории становления термина, практики его применения в разных отраслях и разных научных школах было трудно осмыслить, что же вкладывается в это понятие в том или ином случае. В дальнейших разделах книги авторы приводят анализ исторической и отраслевой эволюции термина, предоставляют примеры применения технологии на практике, пытаются показать, что есть объединяющего в понятии «Цифровой двойник» применительно к разным отраслевым задачам и почему эта концепция стала столь популярна.

Прежде всего, обратимся к истории возникновения термина и самих цифровых двойников.

В качестве раннего предшественника концепции ЦД многие авторы упоминают проект NASA «Аполлон», развернутый в конце 1960-х гг., когда для предстоящей миссии были созданы два идентичных аппарата, один из которых был запущен в космос, а другой оставался на Земле для «зеркалирования» состояния космического корабля, выполняющего полет [1]. В описанном случае оба аппарата были «физическими двойниками». Позднее, с развитием виртуальных моделей, инженеры пришли к практике прогнозирования поведения основного аппарата на базе математического моделирования его свойств и поведения с помощью цифровой модели.

Использование цифровых моделей производственными компаниями для выпуска новых изделий известно с 60-х гг. XX в. Но до определенного времени после создания изделия виртуальную модель¹ отправляли в архив. В концепции цифрового двойника виртуальная модель не отбрасывается после создания материального объекта, а используется в связке с ним на протяжении всего его жизненного цикла: на этапе тестирования, доработки, эксплуатации и утилизации.

Важно отметить, что связь между физическим и цифровым двойником продолжается и после создания физического объекта, что позволяет отслеживать характеристики и историю обслуживания каждого изделия (физического двойника), а также выявлять и сообщать

¹ Точнее, электронную модель, термин «виртуальная модель» стали употреблять позже (прим. научного редактора).

об аномальном его поведении и рекомендовать/планировать техническое обслуживание².

То есть ЦД не ограничивается задачами разработки продукта, а решает задачи поддержания его на всех стадиях жизненного цикла. Например, когда продукт выходит на стадию эксплуатации, параметры его работы могут быть собраны с помощью датчиков и использованы для улучшения цифровой модели. ЦД на базе высокоадекватной математической модели может использоваться для диагностики проблем с реальным объектом и прогнозировать оптимальные циклы его профилактического обслуживания.

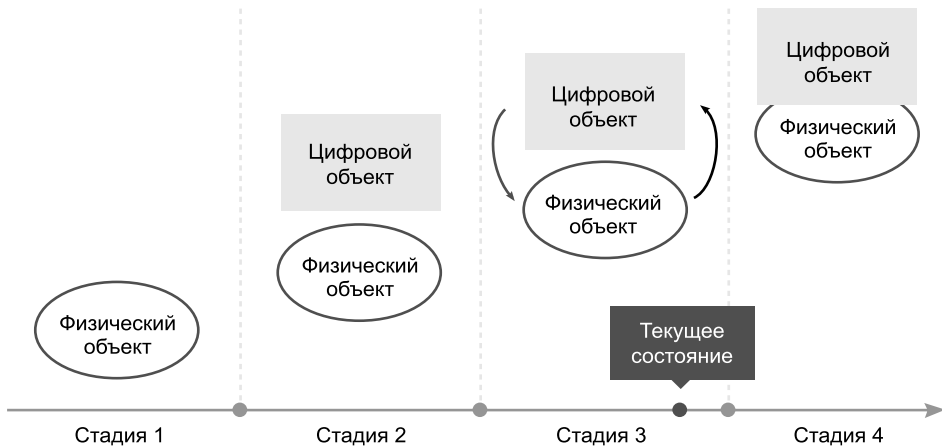


Рис. 1.1. Эволюция концепции цифровых двойников. Источник: www.seebo.com

Примерно этой логике следуют авторы статьи «Новый век производства: Технология цифрового двойника и IoT» (The New Age of Manufacturing: Digital Twin Technology & IoT) [2], показывая процесс эволюции ЦД. В их схеме (рис. 1.1) первый этап соответствует периоду, когда физические объекты создавались без цифрового прототипа. Второй этап относится к периоду, когда искусственные объекты проектировались с помощью цифровой модели, которая использовалась только на стадии создания объекта. На третьем этапе начинается

² Важно также отметить возможность образования обратных связей – на этап эксплуатации – для оптимизации процесса с учетом различных режимов эксплуатации, на этап производства – для оптимизации производственных процессов и в начало процесса перепроектирования критических узлов или проектирования высокотехнологичной продукции нового поколения с учетом опыта эксплуатации, технического обслуживания и ремонтов. (прим. научного редактора).

взаимодействие (обмен информацией) между физическим и цифровым двойниками. И, наконец, четвертый – характеризует сближение и «пересечение» физического и цифрового двойников, когда информационный обмен и обновление цифрового и физического двойников идет практически в реальном времени.

Концепция ЦД имела ряд предшественников, несколько авторов развивали сходные идеи одновременно. В частности, Вонг (Wong) и соавторы (2002) [3] представили концепцию «интеллектуального продукта» и определили его основные характеристики: уникальная идентичность, способность общаться с окружающей средой, способность хранить данные о себе, способность нести информацию о продукте, включая производственные требования к продукту, а также принимать решения, относящиеся к развитию этого продукта.

Хриберник (Hribernik) и соавторы (2005) [4] выдвинули концепцию «аватара продукта», согласно которой продукт может иметь виртуальную цифровую копию – аватар. Аватар является отдельным объектом и способен получать доступ к данным, собранным в течение жизненного цикла продукта, оптимизировать параметры эксплуатации, технического обслуживания, ремонта и др.

Таким образом, в рамках концепций, предшествующих понятию «ЦД», уже обсуждались вопросы, которые стали актуальными и для современных цифровых двойников: как обеспечить обмен данными между потребителями ЦД, как управлять данными и придать ЦД интеллектуальные функции, как управлять жизненным циклом продукта.

Большинство авторов сходится во мнении [5], что первоначально концепция ЦД была озвучена Майклом Гривсом на PLM (Product Lifecycle Management) курсе в Мичиганском университете в начале 2002 г. и позднее, в 2003 г., была представлена на конференции по PLM.

Суть концепции состояла в том, что каждый объект можно представить в виде физической и виртуальной системы, так что виртуальная система отображает физическую, и наоборот. Сам термин «цифровой двойник» появился позднее. Однако концепция взаимодействия физического продукта в реальном мире, его цифровой копии в виртуальном мире и наличия информационной связи между ними, объединяющей виртуальное и материальное пространство (рис. 1.2), по сути и отображает идею ЦД.

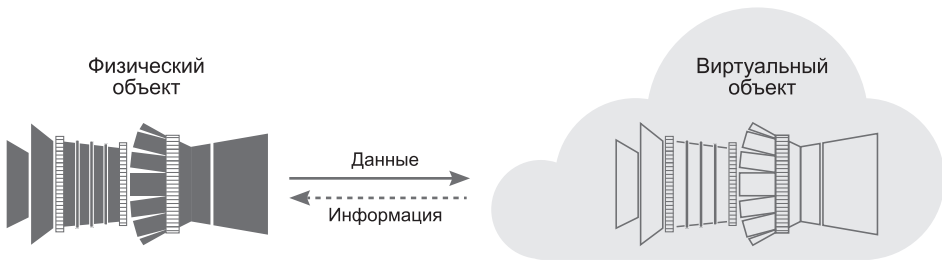


Рис. 1.2. Базовая концепция «Цифровой двойник». Источник: Dassault Systèmes, 2014

В физический объект встроены датчики, которые собирают данные о состоянии этого объекта в реальном времени, данные отправляются цифровому двойнику; на базе полученных данных уточняется цифровая модель. Модель учитывает все изменения, происходящие с физическим объектом, накапливает информацию о его поведении, и по мере уточнения может более адекватно описывать и прогнозировать поведение физического объекта.

На основе актуализированной модели могут быть сформированы рекомендации по оптимизации режима эксплуатации и обслуживания реального объекта. Например, модель может предсказать возможность отказа определенного узла, рекомендовать время профилактического обслуживания, проведения техосмотра, смены фильтров и т. п.

Мы начали с самого общего толкования концепции ЦД. Книга построена таким образом, что определение ЦД (как многогранного понятия) будет дополняться и уточняться по ходу рассказа о сопутствующих технологиях.

Несмотря на то, что концепция ЦД была высказана в начале двухтысячных, она возникла не на пустом месте, а сформировалась на достижениях целого ряда технологий. К моменту появления этой концепции уже оформилась практика проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа на основе (CAD/CAM/CAE-систем), которая формировалась с 60-х гг. (рис. 1.3). Также к этому времени уже широко применялась практика использования датчиков для измерения параметров физических объектов, необходимая для верификации и валидации соответствующих цифровых моделей.



Рис. 1.3. Ключевые события и этапы в развитии концепции ЦД.
Источник: авторы

На рисунке 1.3 отмечены предпосылки и ключевые события в формировании ЦД, – в том числе упомянутая практика использования «физических двойников» специалистами NASA в планировании космических запусков в 1970-е гг., когда изготавливались точные дубликаты сложных систем, для того чтобы иметь возможность на копии, которая остается на Земле, отрабатывать различные сценарии, тестировать возможности управления объектом и находить решения при развитии нештатных ситуаций с космическим аппаратом при изучении его физического двойника на Земле [6]. Аналогичные подходы применялись и советскими инженерами при планировании полетов в космос.

Авиакосмическая отрасль была первой отраслью, которая обратила пристальное внимание на концепцию ЦД, о чем можно судить по публикациям NASA. В 2010 г. появилась статья «Shafto M, Conroy M, Doyle R, et al. «Draft Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap National Aeronautics and Space Administration». В 2012 г. NASA выпустило документ под названием «The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles» («Парадигма цифровых двойников для будущих самолетов НАСА и ВВС США»).

В период с 2010 по 2014 г. концепция ЦД развивалась при пристальном внимании со стороны аэрокосмической индустрии, а термин применялся в сфере проектирования промышленных изделий преимущественно для транспортной отрасли.

Какие же отличительные признаки вкладывались в новое понятие на этом этапе? Объединяя разные источники, можно привести следующий перечень:

- ЦД – это цифровая копия конкретного физического объекта, которая отражает структуру, производительность, техническое состояние и характер рабочей миссии физического объекта, включая такие параметры, как, например, пройденные километры, возникшие неисправности, а также историю технического обслуживания и ремонта реального изделия (физического двойника);
- ЦД базируется на мультифизическом (MultiPhysics) математическом моделировании³ разных физических процессов, определяющих свойства и поведение объекта;
- ЦД связан с конкретными условиями, в которых работает реальный объект. Это – модель, которая накапливает информацию о реальном изделии по мере его эксплуатации в конкретных условиях. У двух конструктивно одинаковых изделий ЦД будут разными, если они работают в разных условиях;
- ЦД позволяет разработчикам наблюдать за работой виртуального объекта, чтобы лучше понять, как оптимизировать работу физического объекта;
- ЦД помогает понять, как физический двойник (реальный объект) работает в реальном мире, и может дать прогноз, как эта работа будет выполняться в случае своевременного обслуживания в будущем;
- ЦД позволяет собирать данные о физическом объекте и, используя инструменты предиктивной аналитики, делать прогнозы относительно состояния этого объекта, определять, когда следует планировать профилактическое обслуживание;
- ЦД позволяет устранять неисправности удаленного оборудования и выполнять дистанционное обслуживание;
- ЦД, основанные на моделировании физических процессов, предоставляют данные, которые невозможно получить непосред-

³ Мультифизическое моделирование (многодисциплинарный/мультидисциплинарный анализ) подразумевает наличие математических моделей и программного обеспечения, описывающих ряд физических явлений и инженерных дисциплин. При моделировании сложных многокомпонентных изделий для построения высокоточных моделей зачастую невозможно разделить задачу на последовательность задач из отдельных дисциплин (механики, гидродинамики, теплопереноса). Только при помощи мультидисциплинарного анализа можно учесть влияние различных физических процессов друг на друга и на функционирование изделия в реальном мире.

ственно на физическом объекте, что может использоваться в качестве инструмента для устранения неполадок в существующих изделиях и оптимизировать производительность их последующих поколений.

Нетрудно заметить, что большинство отличительных признаков цифрового двойника относилось именно к промышленным изделиям. Действительно, в первое десятилетие после введения термина Гривсом ЦД упоминался в разных статьях в качестве связки физического объекта и цифровой модели, причем, как правило, применительно к авиационной тематике. Например, в определении Glaessgen & Stargel (2012) [7] в качестве физического двойника упоминается летательный аппарат. «Цифровой двойник – это сочетание физических (мультидисциплинарных и мультимасштабных) моделей, а также статистических моделей транспортного средства, которое использует лучшие доступные физические модели, обновления датчиков, историю парка и т. д., чтобы отразить жизнь своего двойника – физического летящего аппарата».

Постепенно ЦД утрачивает связь с аэрокосмической отраслью, распространяясь на широкий круг промышленных изделий.

В некоторых определениях речь идет только о виртуальной части двойника, которая определяется как виртуальная модель, состоящая из двух частей – «цифрового мастера» (Digital master) и цифровой тени (Digital shadow).

Цифровой мастер содержит исчерпывающую информацию, достаточную для изготовления изделия с определенными заказчиком свойствами, включая анализ физических свойств этого изделия. Цифровая тень, которую физический объект «отбрасывает в виртуальное пространство», – это набор данных, получаемых с датчиков, и модель, которая позволяет прогнозировать свойства объекта в определенных пределах.

Совокупность цифрового мастера и цифровой тени и определяет понятие виртуальной части цифрового двойника.

ЦД, который сформировался в тесной связке со стадией проектирования, все чаще упоминается в контексте построения систем обслуживания и ремонта эксплуатируемых изделий. Причем иногда цифровыми двойниками стали называть проекты, в которых использовались лишь статистические модели, построенные на основе данных (измерений), полученных с датчиков. Модели, построенные

на базе цифровых теней, не связанные с математической моделью стадии проектирования, стали называться рядом авторов цифровыми двойниками⁴. В ряде случаев те, кто причислял к цифровым двойникам проекты, основанные на цифровых тенях, ссылались на то, что объекты длительной эксплуатации, для которых необходимо было построение ЦД, создавались во времена, когда еще не было стадии проектирования в цифровом виде.

Появилось также понятие «ЦД для стадии проектирования», где речь идет не о связке «готовое изделие – его цифровая модель», а о связке «цифровая модель – прототип изделия». В этом случае нет традиционных стадий жизненного цикла готового продукта, нет стадии эксплуатации изделия в реальных условиях, нет задачи поддержки изделия, прогнозирования необходимых ремонтов и т. п. Нет жесткой привязки ЦД к конкретным изделиям и условиям их эксплуатации.

По мере роста применений ЦД в разных отраслях разными профессиональными группами становилось все сложнее выдерживать консенсус по поводу определения термина. Действительно, на практике ЦД имеет конкретного разработчика и владельца, перед которым стоят определенные задачи. ЦД, разработанный конструктором-проектировщиком, будет отличаться от ЦД, создаваемого группой эксплуатантов. В идеале ЦД отдельных узлов и этапов жизненного цикла должны быть интегрированы, но на практике этого подчас не происходит.

Заметив эту тенденцию (противоречия в трактовке термина ЦД), разные авторы предлагали дополнительную классификацию типов двойников и даже ввести смежные понятия. Так, например, авторы работы «Let's Be Clear Which Digital Twin We Are Talking About» [8] предложили использовать в случае построения ЦД исключительно на данных с датчиков термин «клон» вместо термина «двойник». Их рассуждения понятны. Если цифровые двойники⁵ создаются при рождении физического объекта и проживают все этапы жизненного цикла вместе, то клоны могут создаваться на разных этапах жизненного цикла. И хотя в данном замечании есть логика, термин «цифровой

⁴ С подобной трактовкой, что ЦД может быть построен на базе цифровой тени и не иметь части, основанной на моделировании физических процессов, базирующихся на математической физике, согласны далеко не все специалисты, работающие в данной области знаний. В этой части терминология окончательно еще не сформировалась.

⁵ Англоязычный термин Twins переводится на русский язык и как «близнецы», и как «двойники». И в данном контексте слово «близнецы» более точно раскрывает логику рассуждений авторов.

клон» широкого распространения не получил, чаще пользуются уточнением «ЦД на базе цифровой тени».

До 2015 г. определение ЦД, как правило, упоминалось, когда речь шла о двойниках промышленных изделий. Позднее возникло более широкое толкование, согласно которому «цифровой двойник – это цифровая копия живой или неживой физической сущности. Соединяя физический и виртуальный мир, данные передаются, позволяя виртуальной сущности существовать одновременно с физической сущностью» (El Saddik, A. 2018)⁶. Определение из публикации того же года еще шире: «Реалистичное цифровое представление активов, процессов или систем в искусственной или естественной среде» [9].

То есть область рассмотрения термина расширялась по цепочке: модель промышленного изделия → модель физического объекта, созданного человеком или природой, → модель физического объекта (живого или неживого), а также процесса.

В качестве процесса стали не только рассматривать процесс сборки изделия в дискретных производствах, но также стали говорить о цифровых двойниках процессного производства и логистики. Появились такие понятия, как, например: «ЦД месторождения», «ЦД магазина» или даже «ЦД покупателя» [10].

Описанные выше изменения концепции ЦД показаны в виде этапов на рисунке 1.3. Период 2010–2014 гг. соответствует развитию этой концепции применительно к промышленным изделиям и преимущественно в рамках аэрокосмической индустрии. Условно, с 2014 г. начинается этап, на котором идет расширение спектра применения ЦД все большим числом компаний в разных секторах экономики. На рисунке 1.3 отмечена компания General Electric, которая одна из первых применила ЦД для ветрогенераторов. На данном этапе можно отметить целый ряд игроков, внедривших те или иные решения класса ЦД (Siemens, PTC, IBM, Microsoft и многих других). Направление ЦД развивается и в России. В частности, в ряде организаций Госкорпорации «Росатом» создаются элементы ЦД атомной электростанции и отдельных производственных площадок, изготавливающих оборудование для АЭС. Активные разработки ведутся в Санкт-Петербурге прежде всего применительно к автомобильной

⁶ Вопрос «что первично – цифровой или физический объект?» разными авторами трактуется по-разному. В трактовке Центра НТИ СПбПУ и ГК CompMechLab физический объект (изделие, продукт, машина, конструкция...), наоборот, является репликой (полномасштабной копией) цифрового двойника (прим. научного редактора).

промышленности. В 2017 г. за разработку и применение цифровой платформы CML-Bench⁷ для решения задач построения ЦД для высокотехнологичной промышленности «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab) СПбПУ Петра Великого был награжден национальной промышленной премией Российской Федерации «Индустрия». (Обо всех этих проектах будет рассказано в главе 3.)

Возвращаясь к вопросу эволюции ЦД, следует отметить, что за 20 лет с момента появления концепции и по настоящее время технологии, которые лежат в основе ЦД, не стояли на месте, а активно развивались. Новые технологии интегрировались в ЦД-решения и для некоторых авторов стали терминообразующими. В ряде определений, например, наличие IoT-платформы является обязательной составляющей для обозначения ЦД, в других – нет⁸.

Подчиняясь общим законам эволюции, технология ЦД развивалась под влиянием процессов конвергенции (вовлечения все новых технологий) и процессов дивергенции (применения технологии к разным группам пользователей и разным отраслям). Причем дивергенция шла по разным направлениям: по масштабу – ЦД детали, ЦД узла, ЦД завода; по типу объекта – машина, завод, процесс и т. п. (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Процессы конвергенции и дивергенции, определяющие развитие концепции ЦД. Источник: авторы

⁷ Первая российская SPDM-система CML-Bench (SPDM – Simulation Process & Data Management), более подробно о системе будет рассказано в главе 3.

⁸ В следующем разделе мы подробно поговорим о том, какие технологии использовались для создания ЦД и какую роль они сыграли в совершенствовании решений на базе ЦД.

Как было отмечено выше, расширение сферы применения ЦД только увеличило разрыв в трактовке самого термина. Каковы же пределы этих разночтений?⁹

Если проанализировать несколько десятков трактовок, то окажется, что определение ЦД лежит между двумя крайними подходами – от самого широкого толкования, когда цифровым двойником называют все проекты, где создают любую цифровую копию живого или неживого объекта, проекта или системы (как правило, с невысоким уровнем адекватности реальным объектам), до специализированного наукоемкого толкования, когда цифровыми двойниками называют решение, которое соответствует выполнению целого ряда жестких требований, направленных на повышение уровня адекватности ЦД: наличие мультифизической модели, моделирования материалов на микро- и макроуровне, одновременное наличие физических и статистических моделей, основанных на эксплуатационных данных, получаемых с датчиков, передача данных между физическим и цифровым двойниками в реальном времени и т. п. (рис. 1.5).

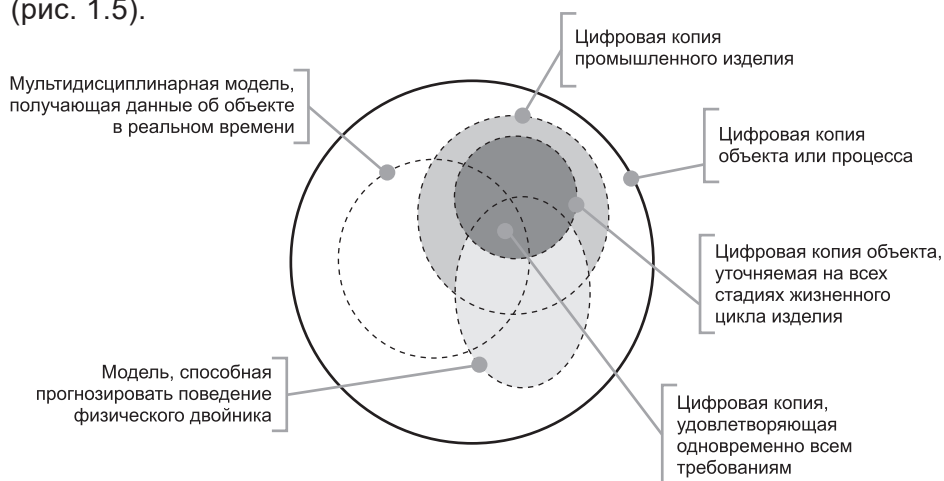


Рис. 1.5. Границы понятия ЦД в современных публикациях.

Источник: авторы

Очевидно, что первая (самая широкая) трактовка определения термина ЦД не имеет практического значения, поскольку ничего не добавляет к известным терминам, таким как компьютерная модель,

⁹ В главе 3 будут приведены данные о разбросе в толковании понятия ЦД на основе опросов профильных респондентов.

цифровая модель, электронная копия, виртуальная копия и т. п. Другая трактовка, в которой фиксируются как обязательные все ранее перечисленные требования, характеризует трудно достижимый в условиях современного развития техники цифровой двойник (особенно если речь идет о сложных объектах типа завода или атомной станции), то есть в этой второй трактовке ЦД – это решение, которое еще только появится в будущем.

В случае создания цифрового двойника сложного объекта (уровня завода или АЭС), процесс построения двойника, по сути, становится неотъемлемой частью проведения цифровой трансформации этого объекта. Действительно, процесс построения ЦД подразумевает интеграцию его элементов, создание цифровой непрерывности основного производственного процесса на этом объекте, что невозможно без перехода на уровень четвертой промышленной революции.

В пределах двух указанных границ (рис. 1.5) существует целый ряд вариантов трактовки ЦД, которые соответствуют реальным проектам в разных индустриях. Об этих проектах, а также о трактовках термина ЦД в них и пойдет речь в этой книге.

Процесс формирования понятия ЦД продолжается. С одной стороны, ЦД стал популярным термином, с другой, – не изжил черты так называемого предтермина¹⁰.

Что касается синонимов, отметим, что английское слово «twin» может быть переведено на русский язык и как «двойник», и как «близнец». И хотя в качестве термина в русскоязычной литературе прижился вариант «цифровой двойник», вариант «цифровой близнец» также продолжает использоваться в целом ряде статей. Так на момент написания этой книги Google выдавал на запрос «цифровой близнец» 1119 ссылок, на «цифровой двойник» – 67 200 ссылок, и на англоязычный термин «Digital Twin» – более миллиона.

В некоторых случаях при переводе англоязычных текстов словосочетание «цифровой близнец» лучше подходит для передачи смысла. Например, шутка, произнесенная на одной из конференций, посвященных цифровизации, о том, что «близнецы, как правило, перенимают дурные привычки, в то время как цифровые близнецы

¹⁰ «Предтермин» используется в качестве термина для новых понятий, но не отвечает основным требованиям, предъявляемым к термину, как-то: однозначность, точность, отсутствие синонимов, соотнесенность с научной дисциплиной, системность, дефинированность (то есть наличие однозначного определения).

учатся только хорошему», явно требует в качестве перевода слово «близнец».

Слово «близнецы» имеет определенный смысл и в плане озвучивания предиктивных способностей ЦД. Ведь наряду с одинаковым воспитанием близнецы несут в себе одну и ту же генетическую информацию, что определяет их поведение и часто сходные траектории жизненного пути.

В литературе описаны случаи, когда разлученные близнецы попадают в разную обстановку, но совершают сходные поступки: женятся примерно в одном и том же возрасте, выбирают похожие занятия и спутниц жизни. То есть, наблюдая жизнь одного из близнецов, с высокой степенью вероятности можно предсказать поведение другого.

Что касается однозначности, отметим, что в понятии ЦД уже изначально заложен ряд противоречий. Например, как было показано выше, в классическом цифровом двойнике есть две части: цифровая и физическая. Цифровую часть в целом ряде источников называют «цифровым двойником», а физическую – «физическим двойником» или «реальным объектом». Получается, что целое и часть обозначаются одним и тем же термином. Это противоречие не только лингвистическое. На стадии, когда еще нет физического изделия (и, соответственно, физического двойника), одни специалисты говорят о создании цифрового двойника, понимая под ним лишь цифровую часть, в то время как другие утверждают, что, если нет двух частей (цифровой и физической), значит, не может быть и понятия «двойник». Третьи находят выход из положения, добавляя уточнения к термину, например, «цифровой двойник стадии проектирования» или «предварительный цифровой двойник».

Говоря о том, что термин ЦД формируется и может иметь разные прочтения, подразумевают следующее.

Во-первых, набор технологий, которые определяют ЦД, меняется, появляются новые. То есть цифровой двойник сегодня (по набору функций и технологических возможностей) может существенно отличаться от ЦД, доступного 15 лет назад¹¹.

Во-вторых, и сегодня в рамках одной организации могут использоваться разные по сложности и набору технологий ЦД, в зависимо-

¹¹ Действительно, часто речь ведут о best-in-class («лучших в классе») технологиях, понимая, что они не могут быть «лучшими в классе» всегда, а только в определенный момент времени или в определенный исторический период (прим. научного редактора).

сти от зрелости решения и спектра доступных инструментов у конкретного разработчика.

В-третьих, ЦД могут применяться к разным объектам. Сложность модели объекта, состоящего из нескольких деталей, может многократно отличаться от сложности модели изделия, состоящего из тысяч деталей.

В-четвертых, разные провайдеры ЦД предлагают свою трактовку термина, в зависимости от того, какими компетенциями они обладают. Разработчики CAD/CAM/CAE делают упор в концепции ЦД на этапе создания изделия, строители – во главу угла ставят BIM¹², разработчики IoT-платформ, соответственно, считают, что главное в концепции – это наличие именно IoT-платформы для сбора данных.

В-пятых, цифровые двойники могут применяться в разных отраслях, и изучаемые реальные объекты могут быть принципиально разными: искусственными, как изделия промышленного производства (турбина), созданными природой (водоем)¹³, живыми (сердце человека). И если цифровая копия искусственного объекта, как правило, создается до появления самого физического объекта, то для природных объектов – картина обратная.

Новое качество и новые свойства проявляются при объединении цифровых двойников. Развитие этой концепции приводит к таким абсолютно новым понятиям, как, например, «национальный цифровой двойник» (NDT – National Digital Twin) [11].

Так существует ли определение ЦД, которое не противоречит частным примерам из разных отраслей и научных школ, и в чем сокрыта объединяющая часть, отвечающая всем вышеописанным частным случаям? Позволим себе высказать некоторые соображения по этому поводу...

Отметим, что трудности однозначной трактовки маркетингово-технологических терминов возникают не только при попытке определения термина ЦД, но и ряда технологий, на которых ЦД базируется.

В частности, аналогичные проблемы возникают с концепцией

¹² BIM (Building Information Model или Modeling) – информационная модель (или моделирование) зданий и сооружений, под которыми в широком смысле понимают любые объекты инфраструктуры, например, инженерные сети (водные, газовые, электрические, канализационные, коммуникационные), дороги, железные дороги, мосты, порты и тоннели и т. д.

¹³ Яркий пример – федеральный проект по созданию основанной на больших данных системы комплексного управления водными ресурсами крупнейшего в России и третьего по величине в мире – Обь-Иртышского речного бассейна (Создание «умного» цифрового двойника (Smart Digital Twin) речного бассейна как техноприродного объекта с определением критических факторов техногенной нагрузки) (прим. научного редактора).

«большие данные». Действительно, начиная с какого объема массив данных становится большим? Вчера это был один объем, завтра количественные мерки будут другими. Попытки связать большие данные с отдельной технологией – будь то Hadoop или MPP, SQL или NoSQL, облачными или необлачными платформами – тоже не являются продуктивными, поскольку специалисты постоянно будут сталкиваться с широким, а главное, расширяющимся спектром технологий, на которых будут строиться решения больших данных.

Эти же трудности возникают и при попытке связать ЦД с уровнем точности математического моделирования, определенным набором инструментов моделирования или типом моделируемого объекта. По всей видимости, менее противоречивое определение ЦД (как и в случае с термином Big Data) можно получить, исходя из рассмотрения проблемы, решаемой с помощью новой концепции. Можно сказать, что проблема больших данных сложилась по мере роста объема и структуры накапливаемых данных, когда существующие на тот момент технологии перестали эффективно справляться с обработкой больших массивов данных и потребовались новые технологии, которые в сочетании решали бы эту проблему. Причем речь идет о самых разных технологиях, создающих новое программное обеспечение, новое аппаратное обеспечение и новую организацию сервисов. По-видимому, в случае с ЦД наиболее общее и непротиворечивое определение следует искать в той же плоскости. ЦД – это набор подходов и решений, призванных решить проблему, которая заключается в том, что рост сложности современных систем, а также многокомпонентных и многофункциональных продуктов опережает рост возможностей инструментов для их проектирования, изготовления и безопасного обслуживания. И решение этой проблемы лежит в объединении ряда цифровых технологий для предложения более эффективных средств моделирования, проектирования, создания и обслуживания подобных сложных систем. Эти инструменты должны комплексно описывать объект, бесшовно интегрироваться между собой, обеспечивая цифровую непрерывность среды создания продукта, работать в тесной информационной связке с предметом моделирования и отслеживать все фазы его развития (фазы жизненного цикла). Основным элементом в данном определении – это интеграция: интеграция цифровых технологий, интеграция инструментов моделирования на базе непрерывного информационного

обмена на уровне данных, интеграция модели и объекта моделирования на базе информационного обмена в режиме, приближенном к реальному времени, интеграция моделирования на всех стадиях его жизненного цикла.

Элементы перехода на новый уровень интеграции можно наблюдать в разных отраслевых решениях. В инженерных приложениях – это переход от дискретного взаимодействия модели с физическим объектом к непрерывному взаимодействию. Это переход от ситуации, когда расчетчик должен был часами ждать сравнения расчетных и натуральных экспериментов, к ситуации, когда результаты с датчиков передаются в цифровой двойник и уточняют модель в реальном времени. Это переход от оптимизации, когда последовательно решались задачи из разных дисциплин, к мультифизической оптимизации. Это, например, переход от рассмотрения механики сплошного твердого тела (макроуровень) до интеграции моделей макро-, мезо- и микроуровней (с учетом микродефектов их расположения и т. п.). Это переход от наличия разрозненных инструментов к цифровой непрерывности, когда есть бесшовный обмен на уровне данных, когда соблюдается так называемый принцип «единой истины» для систем моделирования разных физических процессов и когда изменения в одной модели автоматически отрабатываются во всех других.

Вероятно, сходные представления о ЦД имели авторы работы [12], когда писали: «Цифровой двойник сам по себе не является технологией. Это слияние многих новейших цифровых технологий, которые помогают достигать бизнес-результатов и приносить пользу различным отраслям».

Почему термин ЦД стал столь популярен? По всей видимости, это связано с тем, что дихотомия (цифровой – физический), которая лежит в основе определения «цифровой двойник», имеет фундаментальный философский смысл, разделяя явления на виртуальный мир и мир физический, мир идей и мир воплощений, информацию и материю, идеальное и материальное. Слово «двойник» говорит о неразрывной связи цифрового и физического (цифрового и физического двойников), о порождении одной сущности на основе другой. С одной стороны, замысел в голове инженера воплощается в виде цифровой модели, на основе которой станок изготавливает физический материальный объект (траектория от цифрового к материальному). С другой стороны, не изучив свойств материальной

сущности конструкционных материалов и физических законов их поведения, невозможно создать ЦД физического объекта (от материального к цифровому). Построение цифровой модели тоже двойственно: мы можем идти от конкретного физического объекта (путь от частного к общему), измерять данные о его состоянии и, обрабатывая их аналитически, приходим к цифровой модели, основанной на данных (модель на основе цифровой тени), с помощью которой будем создавать улучшенные физические продукты. Мы можем идти от «знания о природе вещей» (в форме физико-математической модели, выраженной в виде дифференциальных уравнений), задавать краевые условия и получать модель, которая позволяет создать физическое изделие с заданными, просчитанными свойствами (от общего к частному). Оба эти цикла заложены в создании цифрового двойника. Причем именно совокупность первого и второго дает нам возможность говорить о создании ЦД. Концепция ЦД может быть применена не только к промышленному изделию, создаваемому по замыслу человека, но и к природному объекту. В этом случае исследователь-инженер изучает физическую сущность объекта (которая уже существует и заложена природой) с тем, чтобы научиться грамотно его обслуживать, сопровождать и, возможно, корректировать¹⁴ [13].

Моделирование искусственных объектов и создание цифровых прототипов промышленных изделий неизбежно черпают информацию о структуре природных объектов, что наиболее наглядно проявляется в таких подходах, как бионика и биомиметика¹⁵. Многие аспекты архитектуры ЦД сложных объектов имеют прототипы в живой природе. Сложные физические объекты, состоящие из множества подсистем, могут включать набор ЦД, имеющих ту же структуру вложенности, что и части физического объекта. И эта вложенность отображается на уровне цифровых двойников соответствующих подсистем. При этом корневая структура содержит информацию о про-

¹⁴ Для объекта, созданного человеком, цифровая модель может быть как первичной, так и вторичной, – можно создать цифровую модель здания и по ней построить реальный дом (модель первична), а можно в готовом здании поставить датчики и на основе собираемой информации создать цифровую модель изменения прочности конструкции (цифровая модель вторична). При этом для природного объекта цифровая модель всегда вторична.

¹⁵ Биомиметика – создание устройств, приборов, механизмов или технологий, идея и основные элементы которых заимствуются из живой природы. Бионика – это наука, пограничная между биологией и техникой, решающая инженерные задачи на основе анализа структуры и жизнедеятельности организмов. В английском языке термин *bionics* обычно рассматривают как соединение слов *biology* и *electronics*.

цессах высшего уровня, делегируя часть управления на уровень границы периферийным приложениям. По сути, идея управления ЦД на основе централизованного (cloud computing) и периферийного (edge computing) уровней имеет аналоги в организации природных объектов (например, центральная и автономная нервная система). Известно выражение, что практически в любой детали современного высокотехнологичного изделия лежит огромный объем человеческих знаний, которыми не обладает отдельный человек. Действительно, чтобы создать любое из современных высокотехнологичных изделий, необходимы мультидисциплинарные знания (знания, которые определяют состав материала, знания о технологических процессах обработки этих материалов, знания об электрических схемах, программных кодах и т. п.). Неслучайно часто поднимается вопрос о тщетности усилий отдельного, даже самого грамотного инженера воссоздать, опираясь на собственный багаж знаний, что-либо из современных творений человеческой технической мысли, – будь то компьютер, автомобиль или самолет. В основе концепции ЦД лежит идея преодоления разрыва между физической и цифровой сущностью физического объекта, конечной целью которой является соединение физического объекта и знания о его создании, воплощенного в его цифровой сущности в рамках единого целого. При этом отметим, что перемещение знаний идет по направлению от человека (как создателя искусственного изделия) к самому изделию (снабженному его цифровым двойником). Этот процесс становится еще более наглядным, если вспомнить про роль ИИ в цифровом двойнике. Действительно, первоначальная идея будущего изделия, возникшая в голове его создателя (конструктора и инженера), все меньше и меньше детализируется по мере того, как в моделировании (оптимизации изделия) все больше принимает участие ИИ.

Это явление воплощается в практике так называемого генеративного проектирования, когда программа, моделирующая будущие свойства объекта (в составе ЦД), все в большей мере выступает в качестве его сотворца. Продукт создается в процессе компьютерной оптимизации его будущих свойств, отображающих не только внутренние качества продукта, но и его форму, которая не была известна до участия в процессе цифрового двойника.

Неверно полагать, что создание ЦД нужно начинать с нуля. Цифровой двойник должен максимально аккумулировать имеющуюся

ся информацию, а не полностью заменить ее. Одна из основных функций ЦД состоит в добавлении нового слоя, в рамках которого осуществляется интеграция уже имеющейся информации.

ЦД – это средство коммуникации для инженеров из разных областей знания, которым достаточно сложно объединить свои усилия и понять друг друга, если они живут в мирах разных процессов, инструментов и подходов.

ЦД позволяет разрушить барьеры между разработчиками ПО, механического дизайна и электроники и показать, как найти взаимоприемлемые решения, чтобы сработать на общий результат и вместе избежать дорогостоящих ошибок. Более подробно эти функции ЦД будут рассмотрены далее в этой главе.

Известно, что новые технологические прорывы часто возникают на стыке дисциплин. В этом смысле ЦД представляет особый интерес как технология, которая находится на стыке цифровой и физической реальности и при этом развивается на фоне конвергенции целого ряда новых перспективных технологий, таких как аддитивные технологии, искусственный интеллект (ИИ), интернет вещей и т. д.

Выше было отмечено, что наполнение термина ЦД меняется по мере того как меняется сам набор технологий, которые его определяют. Поэтому для того чтобы рассказать подробнее о ЦД, следует кратко проследить его эволюцию и эволюцию технологий, с ним связанных.

ЦД и эволюция составляющих технологий

Для того чтобы дать более полное толкование термина ЦД, следует напомнить читателю, какие технологии вобрала в себя концепция ЦД. По мере рассмотрения эволюции технологий, входящих в ЦД, а также введения новых терминов и понятий, будут сформулированы более подробные определения ЦД.

Как было уже отмечено, сегодня не существует единого определения ЦД, соответственно, и единого представления о том, какие этапы следует выделять в его эволюции, а также какие технологии и когда появились в его составе, поэтому мы рассмотрим представления о технологической эволюции ЦД с точки зрения разных авторов.

Одно из наиболее полных и наглядных представлений об эволюции ЦД и наборе составляющих его технологий изложено в статье

«Эволюция цифровых двойников для операторов активов» [14], где обсуждаются шесть уровней развития ЦД (рис. 1.6).

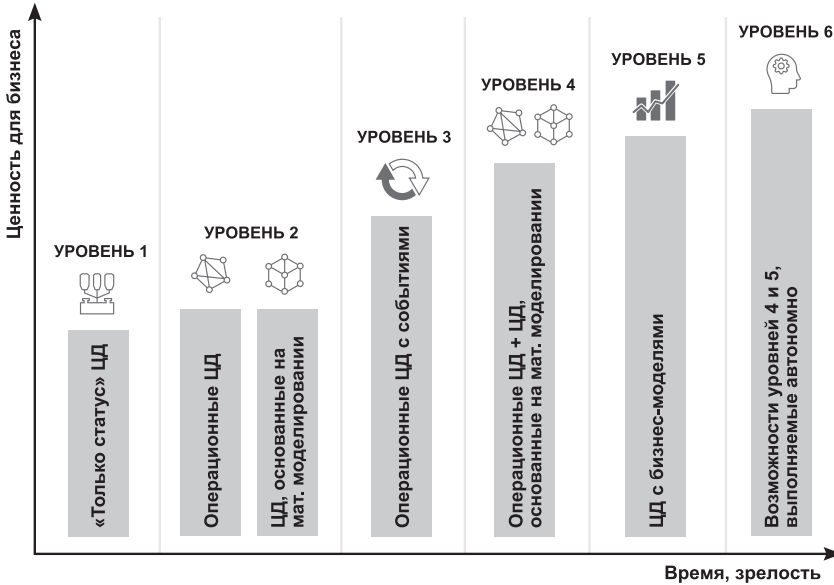


Рис. 1.6. Эволюция ЦД и сопутствующих технологий в концепции Elementanalytics. Источник: elementanalytics.com

Уровень 1. К этому уровню отнесены ЦД категории «только статус» (Status Only Digital Twins), фиксирующие лишь статус объекта¹⁶. К данной категории может быть отнесена система, с помощью которой пользователи удаленно определяют статус электроники в своем «умном» доме (удаленно включают освещение или обогреватели, закрывают жалюзи, регулируют температуру в комнате и т. п.). ЦД подобного типа уже десятки лет работают на рынке промышленной автоматизации в системах диспетчерского управления и сбора данных – так называемых SCADA-системах (Supervisory Control And Data Acquisition) – приложениях, предназначенных для обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки и отображения информации об объекте мониторинга¹⁷. SCADA-системы используются

¹⁶ В трактовке CompMechLab – это цифровые тени, а не ЦД (прим. научного редактора).

¹⁷ Отметим, что далеко не все специалисты, занимающиеся темой цифровых двойников, считают классические SCADA-системы цифровыми двойниками какого-либо уровня, но поскольку мы уже оговорились, что консенсуса на определение ЦД пока не существует, то приводим разные точки зрения, но позднее обсудим степень их распространенности, знакомя читателя со спектром определений и классификаций.

во многих отраслях, где требуется операторский контроль за технологическими процессами в реальном времени. Первые системы подобного типа появились более 30 лет назад и требовали рутинного ручного обслуживания: рабочие данные, как правило, хранились в едином справочном файле, где инженерам приходилось фиксировать имя каждого отдельного измерительного датчика, прибегая к соглашениям об именах этих датчиков, чтобы обеспечить управление данными. При создании ЦД этого класса требовалось вручную сопоставлять каждый датчик в реестре приборов с чертежом, чтобы создать единый экран процесса. Изготовление нового экрана или отчета выливалось в отдельный кропотливый процесс. Например, для визуализации напряжения на всех насосах завода необходимо было создать новую уникальную схему и модель данных, отображающую показания датчиков на тысячах насосов, которая слабо применима для аналогичных объектов (к примеру, при использовании других типов датчиков). На решение подобных задач могли уходить месяцы работы. В силу уникальности подхода при появлении новых типов данных или необходимости разработки кардинально нового объекта (например, новый завод) все наработки по данной схеме переиспользовать было затруднительно. ЦД категории «только статус» (Status Only DT) подразумевали подход, в котором вариант использования определяла модель данных, что, соответственно, исключало возможность переиспользования решения.

Уровень 2. На этом этапе появляются сразу два типа ЦД: операционные ЦД (Operational DT) и ЦД, основанные на математическом моделировании (Simulation DT)¹⁸. Операционные ЦД возникают тогда, когда пользователи начинают массово собирать данные на промышленных предприятиях и задаются вопросом, – как извлечь из них наибольшую выгоду. Именно в этом случае может быть полезен класс решений Operational Digital Twins, которые реализуют методологии обработки и представления данных в зависимости от различных запросов, что позволяет избежать необходимости создания пользовательских моделей данных для каждого аналитического запроса

¹⁸ В Центре НТИ СПбПУ и ГК CompMechLab мы принципиально различаем имитационное и математическое моделирование и термин Simulation применяем исключительно для математического моделирования, причем обязательно подразумеваем, что математические модели описываются, как правило, нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, что является необходимым условием для создания математических моделей, обладающих высоким уровнем адекватности реальным материалам, изделиям, процессам (прим. научного редактора).

и существенно сэкономить время. Гибкая модель данных позволяет операторам быстро предоставлять данные соответствующим приложениям независимо от типа запроса, благодаря чему ценность данной системы многократно возрастает.

На втором этапе появляются также Simulation DT (цифровые двойники, основанные на математическом моделировании), которые базируются на моделировании физических процессов для описания работы деталей/оборудования.

Уровень 3. Операционные ЦД с событиями (Operational DT with Events). Событие или отмеченный временной интервал позволяет применять машинное обучение с так называемыми контролируемыми данными. Работая с контролируемыми данными, алгоритмы машинного обучения могут выдавать прогнозы и определять основные индикаторы наступления прогнозируемого события. Возможность анализировать тысячи датчиков и данные за десятилетия позволяет выявлять паттерны, соответствующие тем или иным событиям, а также прогнозировать время наступления события. Технология помогает компаниям реализовать эти возможности на базе ML-аналитики: увеличить пропускную способность, сократить время простоя или предотвратить опасные события.

Уровень 4. Операционные двойники, основанные на математическом моделировании (Operational DT + Simulation DT). На этом этапе появляются решения, где возможности операционного цифрового двойника расширяются с помощью информации о физических процессах, полученной путем математического моделирования.

Уровень 5. ЦД с бизнес-моделями (DT with Business Models). Благодаря появлению цифровых двойников, комбинирующих возможности операционных двойников и двойников, основанных на математическом моделировании, инженерам стало намного проще оптимизировать работу изделий и продуктов, соединяя задачи по оптимизации операционной деятельности объекта с финансовыми моделями.

Уровень 6. Автономные ЦД (Autonomous DT). На этой стадии цифровой двойник эволюционирует в систему пооперационного принятия решений. Высшей стадией развития ЦД в концепции (рис. 1.6) является автономный цифровой двойник (также называемый «когнитивным двойником») (Cognitive Digital Twin, CDT), который становится средством принятия решений и программного управления оборудо-

ванием/устройствами. ЦД совершенствует свой интеллект по мере обучения, получая необходимые вычислительные ресурсы из облака, и автономно принимает решения в режиме, близком к реальному времени. На первоначальном этапе в цикле принятия решений присутствует человек, однако по мере повышения степени интеллектуальности двойника система будет получать все более высокий уровень автономии.

Эволюции ЦД и технологий, на которых он базируется, посвящен целый ряд исследований. В частности, на рисунке 1.7 представлена концепция компании Microsoft. Согласно рисунку вплоть до 2014 г. ЦД использовались в основном в рамках НИР, с 2014 г. начались коммерческие применения ЦД, а в 2015 г. появились новые сервис-ориентированные модели применения технологии ЦД.

1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
1985-2002	2003-2013	2014-2016	2017- по настоящее время
			
<ul style="list-style-type: none"> • ЦД как концепция • Модель информационного зеркалирования • Выделенные рабочие станции и серверы • 3D-моделирование • Компьютерное цифровое управление • Роботы 	<ul style="list-style-type: none"> • Цифровое имитационное моделирование • 3D-печать • Браузеры, веб-доступ • Цифровое моделирование • Виртуальная сборка • Имитационное моделирование перед изготовлением • Выход 3D-печати на массовый рынок 	<ul style="list-style-type: none"> • Подключенные устройства • Обмен данными между цифровым и физическим миром • IoT • Big Data-аналитика • Облака • Быстрая обратная связь с объектом на этапах жизненного цикла • Продукты, дополненные цифровыми сервисами 	<ul style="list-style-type: none"> • Голография • Дополненная и виртуальная реальность • Интеллектуальные сервисы • Искусственный интеллект • Человеко-машинное взаимодействие • Автономная работа • Самовосстановление

НИР

Производство, эксплуатация, сервисы

Новые сервис-ориентированные бизнес-модели

Рис. 1.7. Эволюция ЦД и сопутствующих технологий в концепции Microsoft. Источник: [15]

На рисунке 1.7 обозначены четыре временных этапа. Поскольку далее речь пойдет о времени появления и применения тех или иных технологий, следует отметить, что расхождения в датах в разных источниках могут быть вызваны точками отсчета. Мы можем сказать, что, например, метод конечных элементов (МКЭ) начал применяться в семидесятые годы прошлого столетия, когда появилась первая коммерческая программа для его компьютерной реализации, мы можем также назвать пятидесятые годы, когда этот метод начал применяться в научных исследованиях на первых компьютерах, или назвать тридцатые годы, когда метод конечных элементов разрабатывался математиками. В этой книге мы старались придерживаться следующего правила: если технология упоминается в привязке к временной шкале без указания на дату конкретного события, то речь идет о времени, когда данная технология стала коммерчески доступной для того, чтобы применяться в решениях класса «цифровой двойник».

Первый этап (17 лет) – период, когда появился сам термин ЦД. На этом временном отрезке развивались такие технологии, как 3D-моделирование и компьютерное цифровое управление. На втором – более коротком этапе (11 лет), выделяются такие технологии, как виртуальная сборка, моделирование на стадии до физического изготовления прототипа. На третьем – еще более коротком этапе (2 года), отмечены такие технологии, как «быстрая обратная связь с объектом на этапе проектирования, изготовления и эксплуатации», «продукты с дополненными цифровыми сервисами». На последнем – четвертом этапе, который начался в 2017 г., отмечены такие новации, как «человеко-машинное взаимодействие», «автономная работа двойников» и «самовосстановление». Здесь также отмечены дополненная и виртуальная реальность, новые форматы человеко-машинного взаимодействия, которые выводят технологию ЦД на качественно новый уровень по сравнению с этапом конца прошлого века [16].

Очевидно, что по каждой технологии, используемой в концепции цифровых двойников, можно представить и более подробную историю развития.

Свое видение эволюции ЦД и сопутствующих технологий представила также компания РТС, которая активно развивает данное направление (рис. 1.8). На рисунке технологии разделены на две группы, имеющие отношение к физической и цифровой среде.



Рис. 1.8. Эволюция ЦД и сопутствующих технологий.
Источник: РТС [17]

Инжиниринговые инструменты для создания ЦД и их эволюция

Как мы уже отметили, инструменты цифрового проектирования и изготовления промышленных продуктов начали формироваться задолго до появления концепции ЦД. Напомним читателю краткую историю их возникновения.

Первые станки с ЧПУ появились в США, в конце 40-х гг. прошлого века. Первый коммерческий вариант стал доступен покупателям в 1952 г. Массовая эксплуатация станков с ЧПУ началась в конце 50-х годов¹⁹. Примерно в то же время началась работа над первыми CAD- и CAM-инструментами. Появление CAD-систем относят к 1963 г., это год, когда Айвен Сазерленд разработал программу Sketchpad, положившую начало системам автоматизированного проектирования. Программа позволяла рисовать линии и комбинировать их в фигуры, которые можно было копировать, перемещать и масштабировать. При работе со Sketchpad использовался манипулятор «световое перо», поэтому эту технологию в некоторых источниках называют оцифровкой с помощью светового пера или оцифровкой с помощью пера (Pen based digitizing).

¹⁹ Первые советские станки с ЧПУ промышленного применения были созданы в первой половине 1960-х гг.

На рис. 1.9 выделены этапы в развитии CAD/CAM/CAE/PLM технологий.

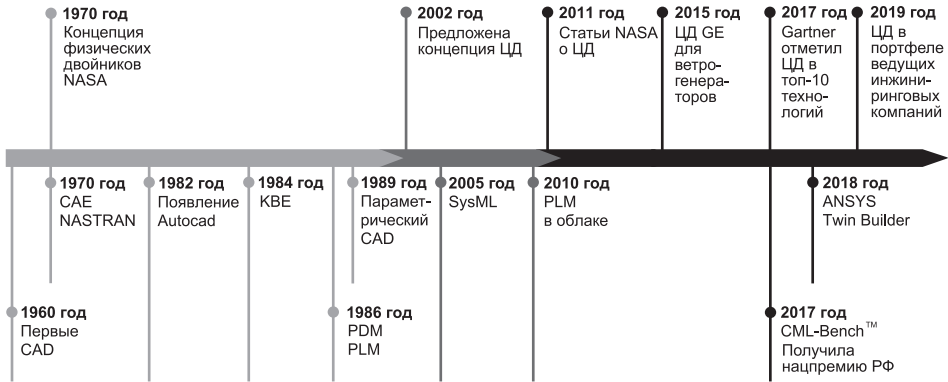


Рис. 1.9. Эволюция ЦД на фоне развития технологий CAD/CAM/CAE/PLM. Источник: авторы

Первые 2D CAD-программы, появившиеся в середине 60-х гг., позволили существенно ускорить работу инженеров, повысить производительность проектирования – быстрее создавать геометрические элементы, копировать фрагменты, автоматически наносить штриховку, проставлять размеры и т. п. Следом были предложены 3D CAD-системы. Вначале это были каркасные модели, в которых описание объекта выполнялось с помощью точек и линий, а в конце 60-х появилось твердотельное моделирование. В 1969 г. MAGI выпустила Syntha Vision – первую коммерческую программу для моделирования твердых тел²⁰.

Информация из CAD-моделей передавалась в CAM-системы, которые на основе информации о геометрии изделия создавали инструкции, управляющие движениями автоматизированного инструмента в станках с ЧПУ. Параллельно с развитием компьютерных программ моделирования геометрии изделия совершенствовались технологии металлообработки (фрезерование, лазерная и плазменная резка), значительно позднее появились аддитивные технологии – 3D-печать, в том числе на базе металлов. О технологии 3D-печати и о ее роли и влиянии на проекты класса ЦД мы скажем

²⁰ В твердотельном моделировании работа ведется с оболочками тел, которые полностью описывают поверхности моделируемых объектов, отделяющие их внутренний объем. Процесс построения оболочки тела в данном случае аналогичен процессу изготовления моделируемого объекта.

ниже в этой главе. Технологии CAD/CAM позволили снизить расходы, а также существенно ускорить процессы проектирования и производства. Развитие CAD и CAM шло параллельно и, по сути, привело к слиянию этих двух технологий. В это же время развивались CAE-системы. В 1970 г. появилась программа NASTRAN – первая коммерческая программа для компьютерных инженерных расчетов, продукт корпорации MSC.Software, которая еще в 1965 г. начала разработку МКЭ-системы NASTRAN для NASA. В начале 70-х гг. был создан главный продукт фирмы: решатель MSC.Nastran – универсальный МКЭ-пакет²¹, который впоследствии стал стандартом для аэрокосмических предприятий. Несколько позже появилась система ANSYS (разработанная одноименной американской фирмой ANSYS, Inc., основанной в 1970 г. как Swanson Analysis Systems).

На рисунке 1.9 отмечен 1984 г. как год первоначальной реализации программы ICAD²², использующей технологию инженерии, основанную на знаниях (Knowledge-based Engineering, KBE), и подразумевающей автоматическое создание вариантов проекта на основе прототипа по вводимым потребительским параметрам. KBE-технология становилась все более значимой по мере возрастания роли кастомизации проектов: производитель, готовый внести в проект изменения, отвечающие требованиям отдельных заказов, получал конкурентное преимущество.

Важным этапом в развитии CAD/CAM-систем стал в 1990-х гг. переход с больших ЭВМ, работающих под управлением UNIX, на ПК, после чего эти приложения стали гораздо более доступными для мелких производств и массовых потребителей.

Постепенно шло также сближение CAD и CAE, и со временем поставщики инженерного программного обеспечения стали предлагать инструменты, которые связывают эти две области. CAE-платформы стали включать препроцессор конечных элементов, который управляет генерацией моделей, от импорта геометрии CAD до экспорта файла, готового к запуску конечно-элементных расчетов.

На рисунке 1.9 отмечен 1986 г. как год появления PDM/PLM-систем. В это время активно развивались CAD-системы, по мере увеличения их популярности рос объем и версионность CAD-

²¹ Отметим, что сам метод конечных элементов возник как метод решения задач строительной механики в 1930-х гг. прошлого века, а применение метода на базе ЭВМ было продемонстрировано в середине 40-х гг..

²² В 2001 г. была куплена компанией Dassault Systèmes.

файлов, и для управления последними стали появляться PDM-системы (Product Data Management, PDM) – инструменты, обеспечивающие управление комплексной информацией об изделии. PDM является подмножеством концепции управления жизненным циклом продукта (PLM), предоставляющей более широкий функционал. Считается, что впервые PLM-системы начала использовать компания General Motors Corporation для ускорения производства своей продукции (в основном Jeep Grand Cherokee) в 1985–1986 гг. [18]. В конце 1980-х гг. PLM (наряду с ERP, SCM и CRM) становится одним из обязательных компонентов в ИТ-структуре любого производственного предприятия как бизнес-стратегия, направленная на поддержку жизненного цикла изделий компании, обеспечивающая коллективные разработки в масштабах партнерских сетей, технологий поддержки разработки изделий и усовершенствования производственных процессов, а также методов стимулирования инноваций.

PLM агрегирует в себя все больше технологий и впоследствии становится важным элементом для создания ЦД.

В 1989 г. появилось параметрическое моделирование²³. Первые САД-системы с возможностью параметризации возникли в конце 1980-х гг. в составе Pro/Engineer (трехмерное твердотельное параметрическое моделирование) фирмы Parametric Technology Corporation и российской T-FLEX CAD (двумерное параметрическое моделирование) фирмы Топ Системы.

В 1990 г. появилась технология мультидисциплинарной оптимизации проектирования (Multi-disciplinary Design Optimization, MDO). Объединение нескольких дисциплин в оптимизационную задачу увеличивает сложность, но дает решение, которое нельзя получить путем последовательной оптимизации в рамках каждой отдельной дисциплины. Например, компания Boeing использует мульти-дисциплинарные расчеты на базе уравнений аэродинамики, механики сплошной среды и теории управления в сочетании с экономической оптимизацией проекта.

В 2003 г. появились инструменты для цифрового прототипирования для стадии обсуждения новых идей и концепт-дизайна. Если

²³ В случае параметрического проектирования конструктор создает математическую модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п. Технология позволяет с помощью изменения параметров или геометрических соотношений «проиграть» различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок.

раньше для первого шага к воплощению идеи в жизнь использовалась бумага, то в начале второго тысячелетия для этих целей все чаще стали использовать программные средства – такие как, например, Sketchbook от компании Autodesk.

В 2005 г. началось использование предметно-ориентированного языка моделирования систем – SysML²⁴.

С 2010 г. появляются инструменты совместной разработки и совместного проектирования продукта (Collaborative Product Development, Collaborative Product Design, CPD), помогающие нескольким организациям работать над совместным созданием продукта.

На рисунке 1.9 развитие инжиниринговых технологий представлено на временной шкале, интересно также проследить, как эти инструменты соотносятся с отдельными этапами проектирования. Подобную схему можно найти в статье «Towards Adopting Digital Twins to Support Design Reuse during Platform Concept Development» [19] (рис. 1.10).

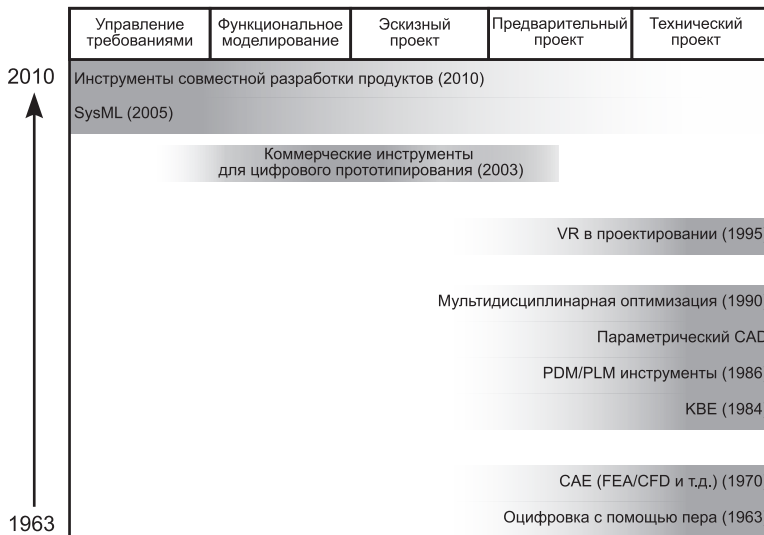


Рис. 1.10. Время появления инструментов цифрового проектирования на разных этапах создания продукта. Источник: Chandrasegaran

²⁴ Systems Modeling Language – графический язык моделирования общего назначения, поддерживающий анализ, спецификацию, дизайн, верификацию и валидацию сложных систем. Системы могут включать аппаратные и программные средства, данные, персонал, процедуры и другие элементы искусственного или естественного происхождения.

На рисунке 1.10 по вертикальной оси отложено время, по горизонтальной – последовательно рассматриваются пять стадий проектирования изделия.

Степень затемнения участков на горизонтальных полосах отражает степень применимости инструмента на соответствующих этапах проектирования. Указанные даты (года) относятся к первым реализациям упоминаемых технологий в виде рабочего программного продукта.

Как следует из рисунка, первые инструменты инжиниринга возникли применительно к автоматизации стадии детального проектирования, и значительно позднее началась автоматизация других, более ранних стадий создания изделия.

На рисунке 1.10 временная шкала заканчивается в 2010 г. Повышение производительности компьютеров за последнее десятилетие, прежде всего обусловленное параллельной обработкой, позволило существенно усовершенствовать возможности инструментов инжиниринга. CAD/CAM/CAE-модели позволяли представлять в цифровом виде все более сложные объекты, появилась возможность создавать все более подробные расчетные сетки, строить все более сложные мультидисциплинарные модели, решать нелинейные задачи с учетом динамических краевых условий. В существенной мере эволюция моделирования в этот период была связана с переходом от моделирования отдельных физических процессов к мультифизическому моделированию (рис. 1.11).

Следует отметить, что временные границы периодов, показанных на рисунке 1.11, условны и, по всей видимости, несколько сдвинуты вправо по временной шкале. По крайней мере отдельные задачи, которые можно отнести к мультифизическим (как, например, задачи термопластичности, где нужно учитывать распределение в исследуемых телах тепловых полей, а также полей механических напряжений и деформаций), решались в Советском Союзе и в США уже в начале 1990-х гг.

Мультидисциплинарный подход необходим, поскольку в сложном многокомпонентном продукте критические условия разрушения разных деталей определяются разными физическими процессами и их сочетанием. Одна деталь подвержена пластическому течению при высоких температурах, другая – усталостным разрушениям из-за циклического нагружения, в третьей могут развиваться трещины

в зонах высоких растягивающих (остаточных) напряжений, формирующихся еще на стадии создания конструкционного материала для будущего изделия, например, при сварке, и так далее.

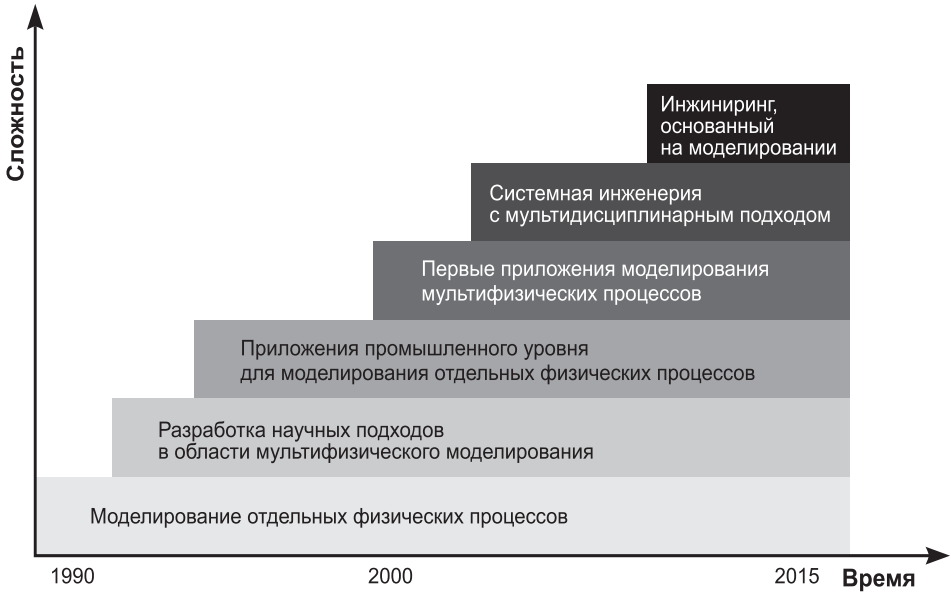


Рис. 1.11. Ступени эволюции инжиниринга, основанного на моделировании. Источник: [20]

Параллельно с развитием подходов мультифизического моделирования совершенствовались подходы мультимасштабного моделирования. По мере увеличения вычислительных возможностей рассматривались все более сложные модели поведения изучаемых объектов. Например, в решении механических задач исследователи двигались от рассмотрения моделей идеально упругопластического тела к решению задач с нелинейной зависимостью механических свойств материала от температуры и скорости нагружения. От рассмотрения однородных изотропных материалов – к моделированию поведения неоднородных композиционных материалов. Постепенно модели, разрабатываемые на разных уровнях (микро-, мезо- и макро-), стали объединяться в интегрированные модели с учетом «физики разных масштабов» (рис. 1.12).

Мультифизическое междисциплинарное, мультимасштабное моделирование, потребовало объединения моделей, созданных

специалистами разных научных школ, что явилось отдельной нетривиальной задачей²⁵.

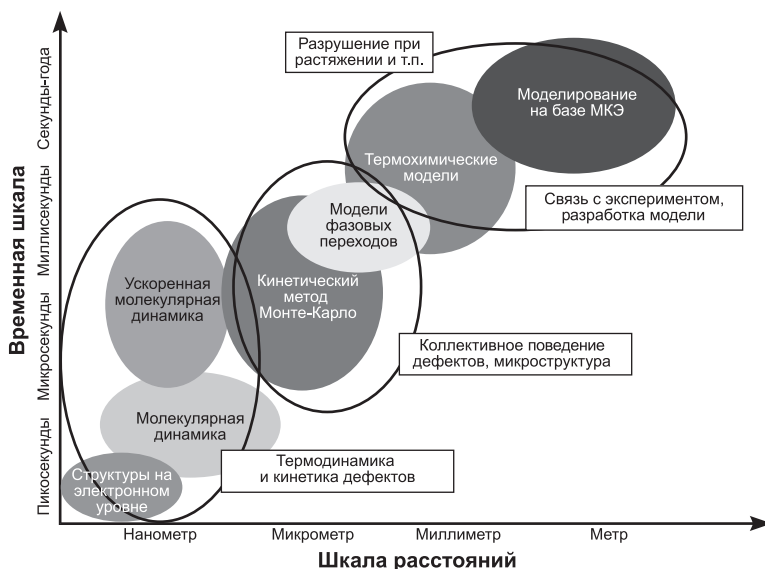


Рис. 1.12. Методы моделирования физических процессов применительно к разным масштабам исследуемой области. Источник: [21]

Мультифизическое мультимасштабное моделирование стало важным инструментом разработки конструкций из новых материалов, работающих в экстремальных условиях. Оно позволило создать изделия, способные работать в условиях экстремальных тепловых, ударных и взрывных нагрузок, в условиях жесткого излучения, агрессивной коррозии и других физических воздействий.

Постоянный рост возможностей вычислительной техники позволяет использовать все большее число элементов в расчетной сетке, увеличивать адекватность применяемых моделей, что на определенном этапе дает возможность проводить виртуальную оценку («virtual qualification») ответственных изделий – как альтернативу сложным физическим испытаниям.

²⁵ Мезомасштаб является трудным для прямого математического моделирования из-за множества нелинейных эволюционных и диссипативных процессов, которые необходимо описать. Однако именно на этом уровне возможно учесть влияние на прочность такого рода дефектов, как микротрещины, пустоты, дислокационные сети и кластеры точечных дефектов (прим. научного редактора).

В качестве примера можно привести проект, выполненный Управлением по атомной энергии Великобритании и Airbus Defense and Space (рис. 1.13), где на базе трехмерных рентгеновских изображений исследователи создавали цифровые копии изучаемого изделия высокой подробности, с учетом расположения внутренних технологических дефектов. Расчетная область разбивалась на конечные элементы с учетом выявленных дефектов, и выполнялись расчеты, анализирующие влияние этих дефектов на эксплуатационные свойства объекта с помощью МКЭ.

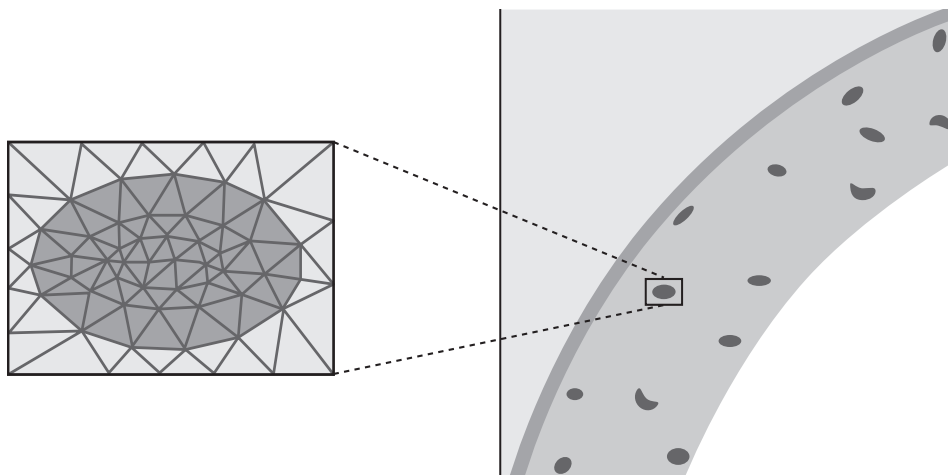


Рис. 1.13. Конечно-элементная сетка измельчается до уровня описания геометрии микродефектов. Источник: [22]

В частности, в проекте (рис. 1.13) для достижения требуемого уровня детализации в проводимом моделировании было использовано более 19 млн тетраэдрических конечных элементов. В то время как в типовых инженерных моделях используют, как правило, менее миллиона элементов.

Чем более совершенными являются средства математического моделирования, чем более комплексно удастся подойти к описанию задачи, тем более точную модель удастся получить.

Это соображение наглядно иллюстрирует рисунок, который в своих лекциях приводит профессор А. И. Боровков (рис. 1.14)²⁶.

²⁶ По материалам лекции А. И. Боровкова в рамках образовательного интенсива для технологических лидеров «Остров 10-21» (12 июля 2018 года, Владивосток, остров Русский).

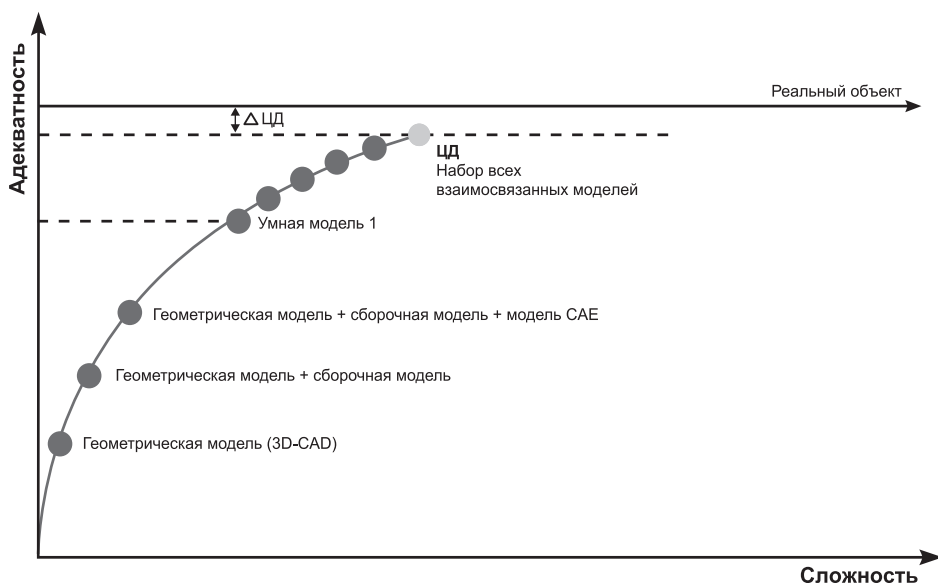


Рис. 1.14. Этапы формирования цифровой модели, лежащей в основе ЦД. Источник: лекция проф. А. И. Боровкова

Модели проходят в своем развитии несколько этапов: геометрическая модель, геометрическая плюс сборочная, затем добавляется модель инженерного анализа CAE, на определенном этапе формируются так называемые «умные математические модели», обладающие высоким уровнем адекватности реальному материалу, объекту или процессу. Согласно определению А. И. Боровкова «умные» модели агрегируют в себе все знания, которые применяются при проектировании, производстве и эксплуатации изделия/продукта/конструкции/машины/установки/технической или киберфизической системы [23, 24]. К данным областям знаний относятся «... математическая физика, теории колебаний, упругости, пластичности и т. д.; механика разрушения... и др.; геометрические (CAD) и вычислительные конечно-элементные (CAE) полномасштабные модели реальных объектов, данные о материалах изделия, информация об эксплуатационных режимах, данные о технологиях производства и сборки» [25].

«Помимо этого, для создания «умных» математических моделей необходимы ключевые компетенции разработчиков; кастомизация (способность оперативно реагировать на запросы заказчика и менять облик и состав систем под эти запросы); системный инжиниринг

(способность держать в поле зрения всю систему и все ее взаимодействующие компоненты); многоуровневая матрица целевых показателей и ресурсных ограничений, содержащая десятки тысяч целевых показателей и требований, предъявляемых к продукту (временных, финансовых, технологических, производственных и т. д.); валидация «умных» моделей, обеспечивающая описание с высоким уровнем точности результатов физических и натуральных испытаний, и специализированный бизнес-процесс – «цифровая сертификация», которая направлена на обеспечение прохождения с первого раза всего комплекса натуральных, сертификационных, рейтинговых и прочих испытаний...» [26].

Профессор А. И. Боровков выделяет два типа цифровых двойников – цифровые двойники объекта/продукта (Digital Twin, DT-1) и цифровые двойники производства (Digital Twin, DT-2), которые в основе своей имеют «умную» модель, учитывающую особенности конкретного производства.

То есть «умная» математическая модель учитывает влияние производственных операций, таких как литье, штамповка, сварка, сборка и т. д.²⁷.

Развитие цифровых моделей позволило решать новые задачи. Одна из таких задач – это переход от массового производства к массовому заказному изготовлению, при котором расширяется ассортимент, но сокращаются объемы партий изделий и цикл производства. Новым требованием становится изготовление продукции «точно в срок». Час простоя на современном производстве может стоить более 1 млн долл. [27]. Далеко не все компании смогут соответствовать новым требованиям, и будут постепенно уходить с рынка, либо осваивать новые технологии.

Многие крупные компании сталкиваются с проблемой снижения конкурентоспособности, – несмотря на обилие внедряемых информационных систем, планирование производственных проектов остается на низком уровне. ЦД является центральным направлением решения вышеописанных проблем. Его внедрение позволяет сократить сроки разработки опытных образцов, ускоряет процесс их приведения в соответствие с техзаданием, снижает стоимость эксплуатации и повышает скорость вывода изделия на рынок. ЦД позволяет бы-

²⁷ Более полное определение понятия «Цифровые двойники» в концепции проф. А. И. Боровкова приведено в конце этой книги, в Приложении.

стро создавать и тестировать различные модификации изделия и радикально уменьшает число натуральных испытаний, что ведет к существенному снижению затрат.

На рисунке 1.15 показана динамика изменения цен на физические и виртуальные испытания. Эта динамика принципиально разная, по мере накопления данных и уточнения модели цифровое моделирование становится все более экономичным, в то время как для проведения физических испытаний затраты постоянно растут.

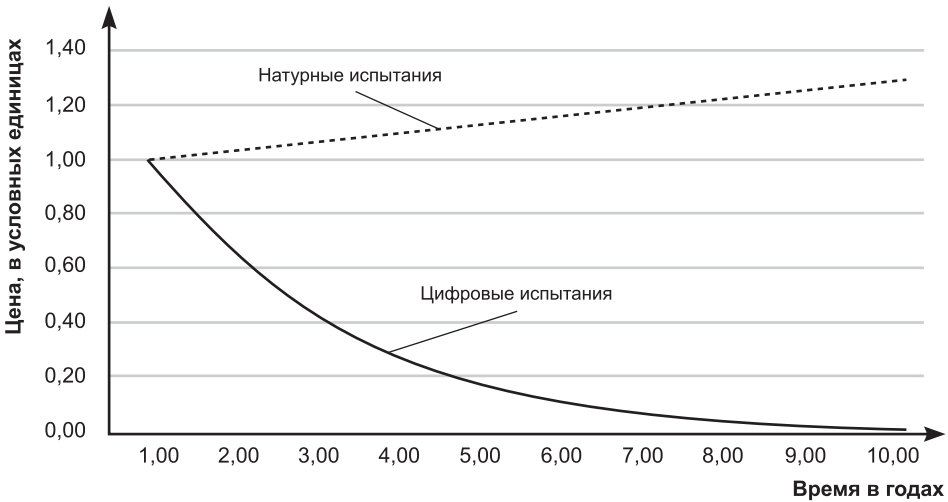


Рис. 1.15. Соотношение стоимости реальных и виртуальных испытаний во времени. Источник: статья «Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems»

Как было отмечено выше, одна из задач, стоящих перед современными разработчиками, заключается в удешевлении продукта и сокращении времени его вывода на рынок.

Для того чтобы наглядно пояснить, как ЦД позволяет решить обе эти задачи, рассмотрим типовой процесс создания нового продукта (рис. 1.16). По ходу проектирования и разработки системы гибкость (легкость, связанная с внесением изменений в конструкцию) уменьшается (кривая 1), соответственно, стоимость внесения этих изменений увеличивается.

В начале процесса концептуального проектирования возможности внесения изменений максимальны, но по мере фиксирования

технологических и архитектурных решений они снижаются. То есть, чем позже вносятся изменения в конструкцию изделия, тем большие издержки несет компания. Кривая 2 показывает процент принятых решений, определяющих выбор технологии, конфигурации, производительности и стоимости решения. В начале процесса кривая резко растет, а затем рост замедляется, – то есть основные инженерно-технологические решения фиксируются именно на начальном этапе, и они диктуют логику дальнейшего проекта. Кривая 4 (рост затрат) носит s-образный характер, так как на этапе проектирования затраты минимальны, но они резко возрастают в момент передачи изделия на производство. Кривая 3 (объем знаний о системе) тоже имеет s-образный характер, хотя стадия быстрого роста на этой кривой менее выражена. Кривая 1 (легкость внесения изменений) имеет обратный s-образный характер, так как на начальном этапе изменения вносятся легко, а с течением времени это становится все труднее.

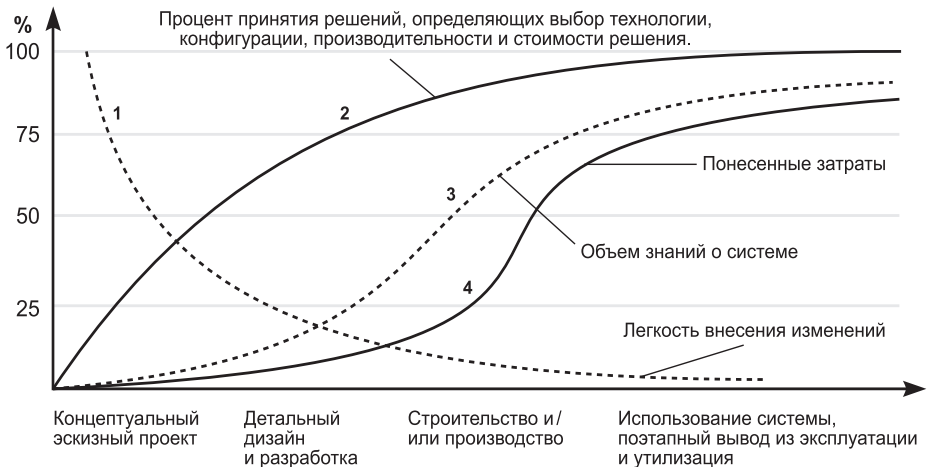


Рис. 1.16. Процесс создания продукта на разных этапах жизненного цикла. Источник: Blanchard and Fabrycky "Systems Engineering and Analysis"

В условиях низкой степени цифровизации процесс проектирования и создания продукта идет методом последовательных доводок. Объект проектируют, потом изготавливают детали опытного образца, затем идет сборка, выявляются недостатки, и процесс возвращается на стадию проектирования. Чем позднее обнаруживается необходимость перепроектирования, тем больше затраты. Если изделие приходится перепроектировать, возвращая его со стадии массового

производства, то затраты на внесение изменений в конструкцию могут увеличиться на порядки. Самые неприятные ситуации возникают, если дефекты обнаруживаются на стадии, когда продукт попадает клиентам, и его приходится отзываться из-за рекламаций со стороны пользователей.

Рисунок демонстрирует, что перенос испытаний в стадию проектирования и возможность провести их в виртуальном пространстве (с помощью ЦД) позволяют удешевить изделие и создать его быстрее.

Сравнительная иллюстрация традиционной схемы производства нового изделия (без использования технологии ЦД) и процесса с использованием ЦД (нижняя часть) приведена на рис. 1.17. В традиционной схеме проектирования используется несколько циклов доводки изделия до уровня, когда удовлетворяются все требования заказчика, что увеличивает длительность испытаний и себестоимость продукции. Причем известны случаи, когда процесс доводки и адаптации изделия под существующий производственный цикл выполнялся не одним и тем же КБ, а передавался из одного в другое. В результате серийное изделие могло существенно отличаться от концептуальной версии.

Внедрение ЦД позволяет перенести основную часть виртуальных испытаний на начальный этап проектирования, внести максимальное число необходимых изменений на этой же стадии и тем самым сократить время, необходимое для запуска продукта при существенно меньших материальных затратах, увеличить рентабельность, что в итоге и дает возможность победить в конкурентной борьбе (рис. 1.17, нижняя часть).

В традиционном (нецифровом) производстве при использовании примерных расчетов конструктор вынужден давать повышенный запас прочности, точно не зная, какие максимальные эксплуатационные нагрузки возникают в изделии при сложных схемах нагружения. Такой подход приводит к тому, что материалоемкость изделий получается завышенной, стоимость такой конструкции растет, а конкурентоспособность всего изделия падает.

Подход, связанный с использованием ЦД, позволяет задавать оптимальный запас прочности, проверенный на очень большом числе виртуальных испытаний и достаточный для обеспечения механической прочности, но не приводящий к избыточной прочности, избыточной массе и повышенным издержкам при изготовлении.

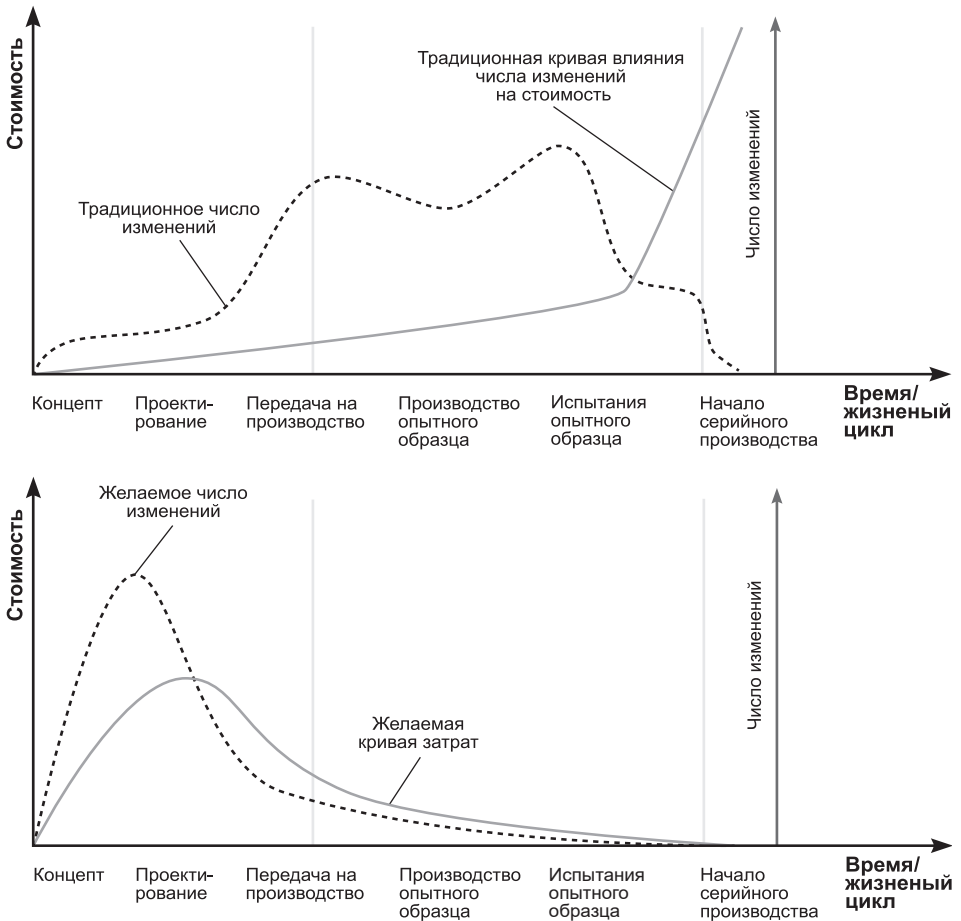


Рис. 1.17. Традиционная схема производства нового изделия (верхняя часть) в сравнении с концепцией цифрового производства. Источник: CIMdata, Dassault Systèmes [28]

ЦД позволяет быстрее получать информацию о свойствах будущего изделия и конструкции, сокращает объем натурных испытаний за счет проведения виртуальных, а также за счет использования накопленных и аналитически обработанных исторических данных о проектировании и эксплуатации аналогичных изделий.

Являясь инструментом быстрого прототипирования, ЦД ускоряет инновации и сокращает расходы. Производители могут тестировать, исправлять и улучшать детали изделия еще до его реального производства.

Виртуальные эксперименты, виртуальный дизайн, виртуальное тестирование, виртуальные модификации занимают меньше времени и обходятся значительно дешевле, гарантируя экономию на каждой стадии.

Наличие полномасштабных ЦД позволяет пройти натурные испытания (например, такие дорогостоящие, как краш-тест) с первого раза. Это возможно только в том случае, если подобные испытания были многократно пройдены в виртуальном пространстве.

По данным Центра компетенций Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Центр НТИ СПбПУ), в мировом автопроме, который является лидером процесса цифровизации и внедрения ЦД, происходит резкое сокращение натуральных испытаний: в 2007 г. проводилось примерно по 100 виртуальных и натуральных испытаний, но уже через 10 лет необходимых натуральных испытаний стало всего 6, а для того, чтобы они проходили с первого раза, проводится более 10 тысяч предварительных виртуальных испытаний.

Таблица 1.1

Эволюция концепции применения моделирования в разные временные периоды. Источник: [29]

Стадия отдельных ученых исследователей	Инструменты моделирования	Системная инженерия на основе моделирования	Цифровой двойник
1960+	1985+	2000+	2015+
Моделирование ограничено решением отдельных узких задач и кругом ученых, экспертов в определенной научной области (например, в области механики)	Инструменты моделирования становятся отчуждаемыми продуктами, предназначенными для ответа на вопросы проектирования и инженерного анализа (например, инструменты для решения задач механики или гидродинамики и т. п.)	Средства проектирования и моделирования обеспечивают системный подход к проектированию на базе интегрированного использования моделей разного масштаба и из разных дисциплин (мультифизическое моделирование)	Моделирование – это основа для проектирования, создания и эксплуатации изделий на протяжении всего жизненного цикла, основанная на постоянной связи с операционными данными об эксплуатируемом объекте

Важно подчеркнуть, что внедрение технологии ЦД не предлагает полностью заменить натурные испытания на виртуальные. Нет, прак-

тика остается критерием истины, и ЦД не заменит натурные испытания, он лишь позволяет проводить необходимые для сертификации испытания с первого раза. И если для сертификации автомобиля нужно 6 типов натурных испытаний, то столько испытаний и должно проводиться. Успехи цифровизации в автомобильной промышленности постепенно меняют менталитет заказчиков, формируют понимание, что практика, при которой тратятся огромные средства на натурные испытания, это не неизбежное условие для обеспечения надежности, а устаревший подход, свидетельствующий о низкой цифровой культуре проектирования, который ведет к напрасной трате средств и времени.

Завершая рассказ об эволюции концепции применения моделирования в разные временные периоды, уместно привести таблицу 1.1.

ЦД и оптимизация изделия, аддитивные технологии

Ряд возможностей, которые открывают ЦД в плане оптимизации свойств проектируемых изделий, не были реализованы до недавнего времени, в первую очередь, в связи с тем, что далеко не все оптимизированные изделия можно было изготовить методами традиционных субтрактивных технологий²⁸. Возможности топологической оптимизации существовали и ранее, но, после того как проект доходил до технологов, оказывалось, что на имеющемся парке станков оптимизированное изделие изготовить просто невозможно.

Традиционная конструкторская школа предполагала подход к проектированию деталей и узлов, исходя из опыта и знания технологических возможностей оборудования (использующего, как правило, субтрактивные методы обработки), что и накладывало ограничения на форму конечного изделия²⁹. После того как распространение получили аддитивные технологии, ситуация изменилась, – появилась возможность производить изделия практически любой формы.

История развития аддитивного производства насчитывает уже около 40 лет, однако возможность заменить ответственные детали

²⁸ Субтрактивный производственный процесс предполагает, что цельная заготовка приводится в нужную форму путем удаления части материала. Например, с помощью токарных, фрезерных и многоцелевых станков.

²⁹ В принципе топологическая оптимизация позволяет изменить традиционную геометрию на геометрию, специально адаптированную под определенную технологию. И это может быть и традиционная технология (например, литье), и аддитивный процесс. Но именно аддитивные технологии делают процесс топологической оптимизации наиболее эффективным.

в машиностроении на детали, выполненные аддитивными методами производства, появилась сравнительно недавно.

Первые 3D-принтеры, основанные на технологии лазерной стереолитографии (лазерное отверждение жидких фотополимеров), появились в конце 80-х гг. прошлого века. Печать методом послойного наплавления микрокапель расплавленного термопластика вышла на рынок десятью годами позднее, примерно в 1990 г. Еще несколько позже появились методы 3D-печати металлами.

Технология селективного лазерного сплавления (Selective Laser Melting, SLM) была впервые разработана в 1995 г., в Институте лазерных технологий им. Фраунгофера (ILT) в Аахене (Германия). На сегодняшний день существует целый ряд подобных технологий: селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS), прямое лазерное спекание металла (Direct Metal Laser Sintering, DMLS), селективное лазерное плавление (Selective Laser Melting, SLM), прямое энергетическое осаждение (Direct Energy Deposition, DED), лазерное осаждение металла (Laser Metal Deposition, LMD), струйное связывание металла (Metal Binder Jetting, MBJ).

Себестоимость 3D-печати постоянно падала, качество росло, и в наши дни появились примеры использования технологии даже в высокоответственных изделиях.

Появилась возможность перепроектирования изделий с использованием топологической оптимизации, которая позволяет численно определить наилучшее распределение материала в той или иной конструкции при известных типах нагружения. Инженер-проектировщик ставит требования обеспечения необходимой жесткости и прочности, минимизации концентраторов напряжений, которые повлияют на долговечность изделия, и на основе данных параметров компьютер рассчитывает форму детали, в которой были бы учтены все эти факторы.

На рынке представлен целый ряд программных продуктов для проведения топологической оптимизации. Данную возможность предоставляют CAD/CAE-пакеты от Siemens, Dassault Systèmes и Autodesk. Среди недорогих решений можно выделить продукт топологической и топографической оптимизации Inspire американской компании solidThinking, входящей в Altair Group. Программа позволяет находить оптимальный дизайн различных конструкций с точки зрения массы, жесткости и прочности. Аналогичными системами зани-

мались производители продуктов для параметрической оптимизации (Heeds, P7, IOSO, ANSYS Design Explorer), но вне PLM-платформ, в отрыве от ЦД их эффективность весьма ограничена.

Сегодня разработаны методы многокритериальной оптимизации, в рамках которой в число параметров оптимизации, помимо технических, включаются также и стоимостные показатели. Такой подход позволяет разработчикам получить множество решений, из которых можно выбирать несколько потенциально конкурентоспособных вариантов.

Например, можно параллельно выводить на рынок дорогое решение, с высокими техническими показателями, и дешевое, с более скромными техническими характеристиками.

На рисунке 1.18 показаны детали, спроектированные под разные технологии изготовления: левая спроектирована под изготовление стандартными методами металлообработки, а форма правой детали получена методом топологической оптимизации под аддитивное производство. Правая деталь при существенно меньшем весе имеет меньшие максимальные напряжения и меньшие деформации под нагрузкой.

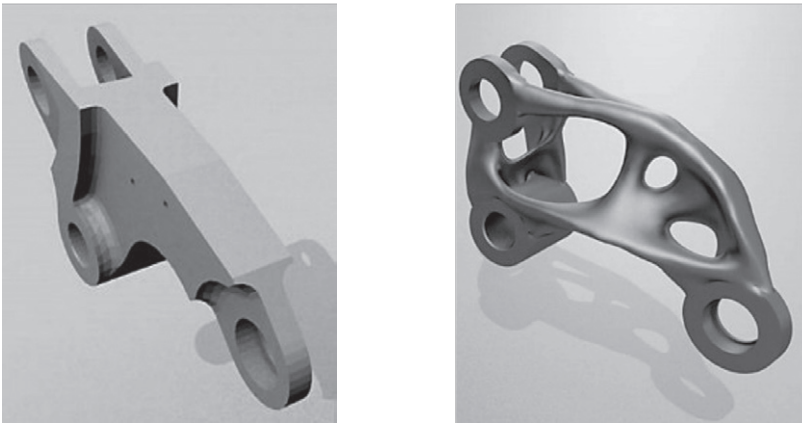


Рис. 1.18. Сравнение формы изделия, оптимизированного под традиционную металлообработку и аддитивное производство. Источник: [30]

На рисунке 1.19 показаны результаты выполнения задачи перепроектирования кронштейна для космического аппарата под аддитив-

ное производство на основе топологической оптимизации. Проект выполнен с использованием «Интегрированной системы компьютерного проектирования и инжиниринга» (ИСКПИ, облегченный вариант системы CML-Bench) в Инжиниринговом центре CompMechLab СПбПУ [31].

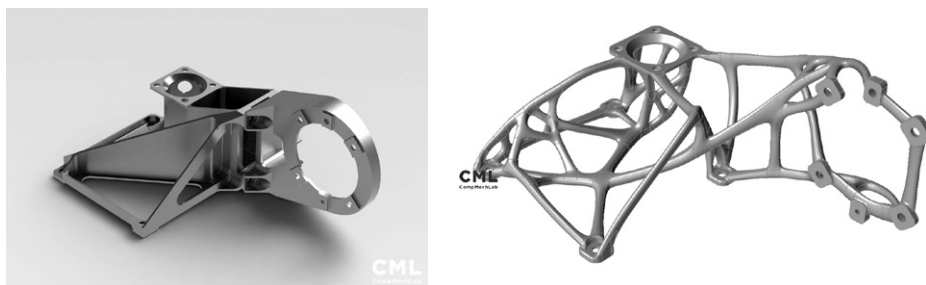


Рис. 1.19. Сравнение формы изделия, оптимизированного под традиционную металлообработку и аддитивное производство. Источник: ИЦ CompMechLab СПбПУ

В результате перепроектирования изделия на основе топологической оптимизации удалось на 43% снизить его массу по сравнению с исходным вариантом.

Интересно отметить, что изделия с оптимизированной формой напоминают «конструкции» живой природы, в которых природа «заботилась», чтобы оптимально переместить материал именно в те зоны, где он «работает», «несет нагрузку». В оптимальных изделиях (как и в объектах живой природы) нет плоских элементов и профилей постоянной толщины.

Кроме того, топологическая оптимизация дает возможность создавать решетчатые, ячеистые и пенные структуры, которые также распространены в живой природе, например, встречаются в костной ткани. Тот факт, что детали, созданные на основе методов оптимизации (обеспечивающие механическую прочность при минимальном весе), напоминают объекты живой природы, привел к формированию термина «бионический дизайн».

Бионический дизайн – это смежное понятие по отношению к понятию «генеративный³⁰ дизайн». Технология генеративного дизайна меняет характер взаимодействия человека с программой, которая

³⁰ Генеративный или порождающий дизайн (Generative Design) – подход к проектированию (деталь, анимация, изображение и т. д.), при котором человек делегирует часть процессов компьютерным платформам.

становится участником творческого процесса. Некоторые генеративные системы позволяют пользователю переформулировать, корректировать и уточнять задачу по промежуточным результатам, а также самообучаются в процессе поиска решений³¹.

Более широкое толкование термина «генеративный дизайн» позволяет утверждать, что ЦД – это инструмент, который использует методы генеративного дизайна в том смысле, что деятельность разработчика, оснащенного технологией ЦД, все в большей степени опирается на интеллектуальные функции средств разработки и возможности многомерной оптимизации изделия под набор формализованных целевых показателей и ресурсных ограничений.

Следует отметить, что возможность применения 3D-печати ограничивается не только возможностями создания изделия определенного качества, но и коммерческими соображениями.

Если методами аддитивной технологии напечатать тот же самый элемент, который был спроектирован под неаддитивные технологии, то это решение будет практически всегда дороже, чем традиционное, поскольку производство на основе традиционных станков с ЧПУ уже оптимизировано под минимальную себестоимость. Однако, чем больше разработчики могут включить в пространство проектирования элементов для оптимизации, тем больше вероятность того, что переход на аддитивную технологию будет экономически оправдан. Так что если взять несколько десятков элементов, которые соединяются с помощью традиционных технологий, включая болтовые, сварные и прочие соединения, то ту же конструкцию с помощью аддитивных технологий можно сделать не на базе 100 деталей, а на базе 10, то есть использовать на порядок меньше компонентов. Такой подход уже может дать существенную экономию.

Таким образом, речь идет не столько о том, чтобы имеющуюся традиционную деталь выполнить с помощью аддитивных технологий, сколько о том, как перепроектировать конструкцию под аддитивные технологии. И здесь уже поднимается вопрос о смене парадигмы, о переходе на новые принципы проектирования. «Инженер-

³¹ Согласно трактовке, принятой в Центре НТИ СПбГУ и ГК CompMechLab, мы скорее склонны считать, что генеративный дизайн является частью бионического дизайна. Бионический дизайн – это проектирование и производство персонализированной продукции на основе применения технологий компьютерного инжиниринга, оптимизации (многопараметрической, топологической, многокритериальной и др.) и передовых производственных технологий, в первую очередь, аддитивных, когда получаемые оптимальные изделия напоминают структуры, встречающиеся в живой природе (прим. научного редактора).

конструктор с большим опытом, проектируя изделия, держит в голове ограничения оборудования, которым он привык пользоваться, и автоматически вводит ограничения на конструкцию, но в случае аддитивного производства многие ограничения снимаются, форма может быть практически любая, и, как правило, она находится за гранью интуиции, опыта и знаний генерального конструктора» [32].

Если ранее мы говорили о возможностях расчетным путем определять остаточные напряжения в конструкциях, подвергаемых технологическим операциям (таким, как, например, сварка или термообработка), то сегодня с помощью 3D-печати металлами можно решать обратную задачу – задавать благоприятный характер распределения внутренних напряжений в процессе печати. Более того, управляя параметрами процесса 3D-печати (например, такими как скорость охлаждения металла), можно влиять на формирование микроструктуры в процессе кристаллизации металла, влиять на склонность к образованию таких микродефектов, как холодные и горячие трещины.

Принципиально новые возможности складываются на пересечении технологий ЦД, 3D-печати и ИИ. А именно – открываются возможности практически в реальном времени печатать реальный объект (физическую часть двойника) по цифровой модели (виртуальной части двойника) и тут же, анализируя ее свойства с помощью датчиков, корректировать эти свойства (рис. 1.20) [33].

На рисунке 1.20 присутствуют все элементы цифрового двойника: математическая модель формирования физического объекта (модель процесса), статистическая модель, основанная на машинном обучении на базе данных, полученных с датчиков от реального физического объекта, и сам физический объект, формируемый в процессе 3D-печати. А главное, что в процессе печати может создаваться не только желаемая форма физического объекта, но и внутренняя структура, и требуемое поле внутренних напряжений (рис. 1.21).

Подходы, которые использовались для создания ЦД процесса 3D-печати металлами (рис. 1.20), основаны на моделировании воздействия движущихся источников тепла (лазерный луч, электронный луч и электрическая дуга) на применяемые для печати металлы. В расчетах использовался анализ температурных полей с помощью метода конечных элементов, расчетным путем оценивались микроструктуры, формирующиеся в соответствии с разными скоростями охлаждения расплава, численным путем также анализировалось

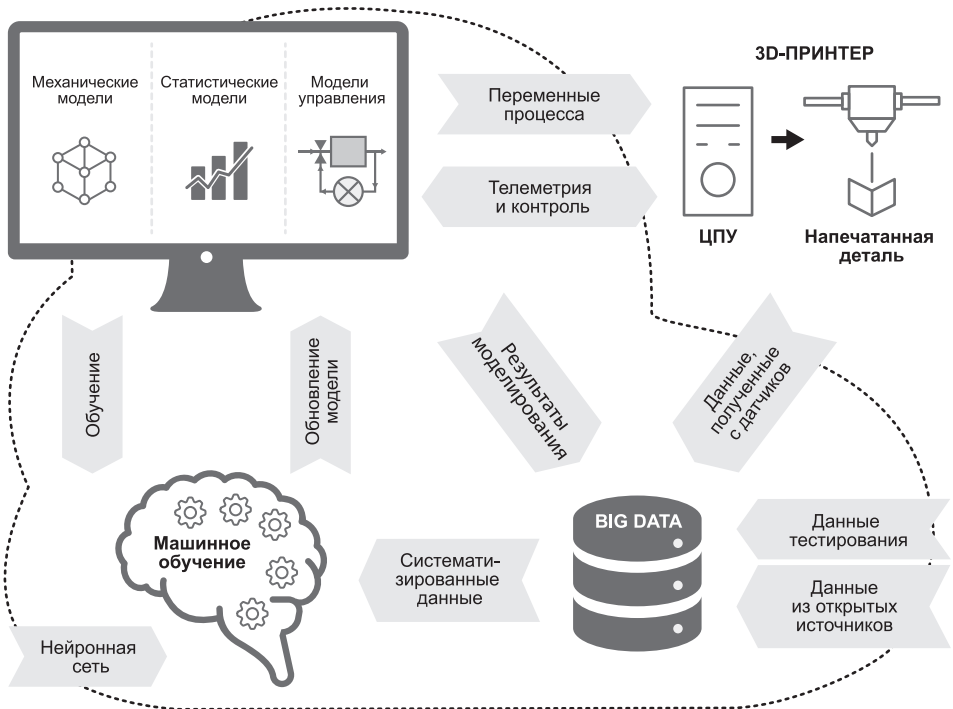


Рис. 1.20. ЦД в управлении процессом 3D-печати металлами. Источник: Applied Materials Today, 2019

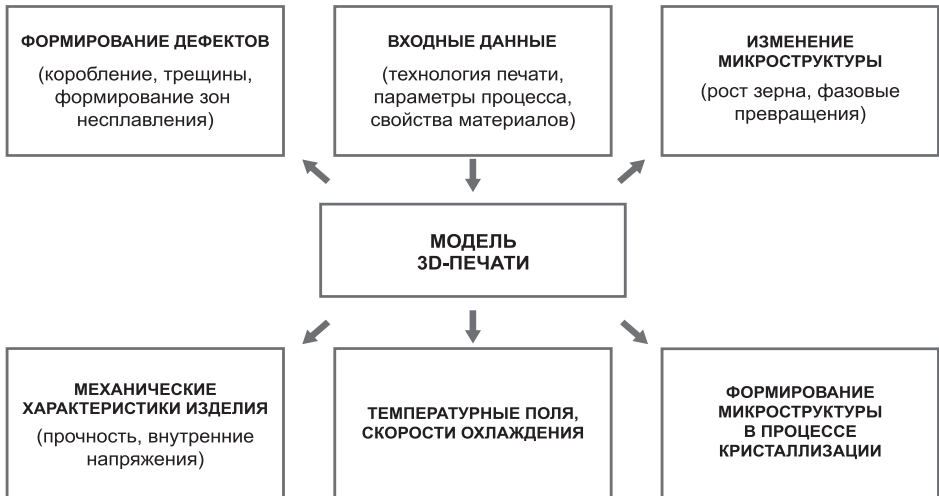


Рис. 1.21. Используемые модели. Источник: Applied Materials Today, 2019

напряженно-деформированное состояние изделия. В качестве датчиков использовались инфракрасные камеры для дистанционного измерения температур, для оценки наличия внутренних дефектов использовались средства акустико-эмиссионного контроля.

Аддитивные технологии развиваются, возникают все новые возможности математического моделирования и программирования свойств будущих физических изделий. Сравнительно недавно появились такие новые термины, как 4D- и 5D-печать.

Технологии 4D-печати предполагают, что к трем координатам прибавляется четвертая – время, то есть напечатанные трехмерные изделия в будущем могут специальным образом изменяться под влиянием тех или иных внешних факторов. Определенные материалы могут изменяться под влиянием воды, тепла, света, механического воздействия и могут быть запрограммированы на заданные действия.

Например, исследователи из лаборатории Self-AssemblyLab Массачусетского технологического института разработали двумерную поверхность определенной формы, которая при погружении в воду складывается в куб. Специалисты лаборатории ведут исследования в области создания материалов с программируемыми свойствами, которые могут найти применение в области медицинских имплантатов.

В технологии 5D-печати (3D-печать на платформе, способной качаться по двум осям), используя ту же CAD-модель, можно получить готовое изделие намного прочнее, если изменить способ нанесения материала таким образом, что наплавленные слои из ровных превращаются в извилистые. Подобные технологии открывают новые возможности по управлению физической частью цифрового двойника.

Аддитивные технологии активно развиваются в России и, в частности, наряду с цифровым проектированием и моделированием, являются одним из направлений дорожной карты «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы (НТИ).

В индустрии отечественного двигателестроения уже есть компании, которые применяют технологию трехмерной печати для изготовления отдельных деталей.

Начинают внедрять технологии 3D-печати в производство и предприятия атомной отрасли. В частности, в 2019 г. ГНЦ РФ АО «НПО

«ЦНИИТМАШ» начал применять свои разработки при изготовлении оборудования для АЭС. В том же году запущен в опытную эксплуатацию первый российский двухпорошковый двухлазерный 3D-принтер, созданный специалистами Госкорпорации «Росатом». Принтер запущен в опытную эксплуатацию на предприятии топливной компании Госкорпорации «Росатом» АО «ТВЭЛ» (НПО «Центротех»).

Аддитивные технологии в сочетании с технологией ЦД позволяют создавать изделия под индивидуальные требования в максимально короткий срок.

Технологии развиваются по спирали (рис. 1.22), и на сегодняшнем витке перед разработчиками стоит задача создания высоко кастомизированных изделий, чтобы на новом уровне вернуться к возможностям ремесленного производства, когда мастер мог изготовить индивидуальный товар для каждого из своих заказчиков.

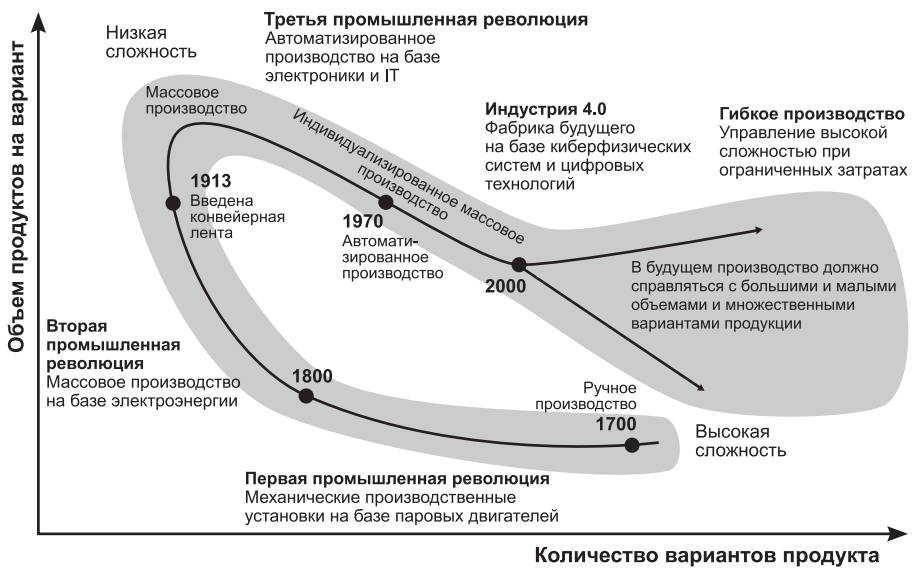


Рис. 1.22. Временной цикл изменения массовости и вариативности производимых изделий. Источник: Fraunhofer Institute

В начальный период ремесленного производства (рис. 1.22) кастомизация товаров была максимальной (1700 год на кривой), затем развитие шло по направлению увеличения массовости производства и создания продуктов «которые подходят для всех». Максимум кри-

вой (исходя из объема продуктов на вариант изделия) приходится на массовое конвейерное производство автомобилей, время, когда родилась знаменитая фраза Генри Форда: «Цвет автомобиля может быть любым, при условии, что он черный». Начиная с 60-х гг. прошлого века, растет кастомизация – увеличивается число моделей, преднастроенных под предпочтения небольших групп потребителей. В 2000 г. кривая подходит к развилке: наблюдается рост сложности массовых товаров, с одной стороны, и рост кастомизации изделий, с другой.

Технологии сбора и обработки данных для создания ЦД

В предыдущем разделе мы говорили преимущественно о развитии технологий проектирования и математического моделирования и концентрировались на стадии создания изделия.

В этом разделе обратим внимание на технологии, которые ответственны за получение информации от физического двойника об обработке этих данных и создании моделей, на них основанных. В частности, речь пойдет о технологиях IoT, Big Data, ИИ и их эволюции.

Чтобы ЦД оперативно отображал текущее состояние физического объекта, необходимо разместить датчики в этом объекте и обеспечить постоянный сбор данных.

Для того чтобы обеспечить функционал сбора и обработки информации о состоянии и эксплуатационных характеристиках наблюдаемых объектов, еще в конце 60-х гг. были разработаны специальные измерительные комплексы, состоящие из аналоговых датчиков и специальных контроллеров, включающих аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и средства предварительной обработки. С появлением простейших процессоров, такие контроллеры стали логически-программируемыми (ПЛК) (Programmable Logic Controller, PLC) и позволили обрабатывать информацию прямо на контроллере, а также изменять, дорабатывать, оптимизировать алгоритмы обработки информации, не внося изменения в физический конструктив, включая измерительные комплексы, что в свою очередь существенно удешевило процесс измерений, аналитики и существенно развязало руки инженерам в сфере возможности получения и обработки информации с измерительных комплексов (рис. 1.23).

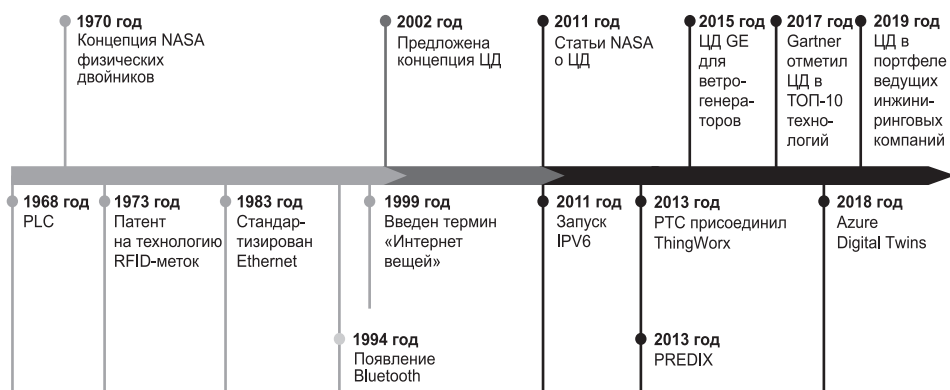


Рис. 1.23. Эволюция технологий ЦД на фоне развития технологий сбора и обработки измерений параметров физических объектов. Источник: авторы

Контроллер собирал аналоговые сигналы с разных датчиков, непосредственно подключаемых к нему. Например, принимаемый сигнал мог переводиться на более высокую частоту для агрегации с другими подобными аналоговыми сигналами. Совокупность данных в виде суммы импульсов от периферийных устройств проходила первичную обработку с помощью цифрового приемника, который передавал сигнал в общую шину, в соответствии с логикой, реализованной с помощью сетевого протокола передачи данных. Транспортная шина использовалась для доставки данных разных PLC на сервер обработки и хранения полученных данных. В частности, по такому принципу работают системы SCADA. Поначалу эти дорогостоящие системы использовались преимущественно для промышленной эксплуатации. Постепенно эволюционировала технология передачи данных от PLC до сервера SCADA. Был разработан промышленный Ethernet, что позволило снизить стоимость и перейти на увеличение объема сбора и обработки данных. Параллельно совершенствовались датчики. Появились датчики разных форм и размеров, способные быстро измерить практически любую физическую величину (датчики температуры, движения, ускорения, прикосновения, атмосферного давления, влажности и т. п.). Помимо усовершенствования самих датчиков, были решены многие задачи по улучшению схем резервирования датчиков в критически важных системах, разработаны схемы оптимизации расположения распределенных датчиков,

минимизации стоимости измерительных систем, выбора оптимальной технологии для передачи информации, ее хранения, обработки и так далее.

С развитием протоколов интернета и беспроводных технологий, таких как RFID, Bluetooth, WiFi, а также по мере снижения стоимости элементной базы удалось выйти на уровень бытовых устройств.

По мере увеличения потребности в сборе и обработке данных росла необходимость масштабирования и унификации предоставления данных, чтобы в конечном итоге предоставлять их по запросу как от непосредственных пользователей, так и от приложений, использующих их в целях аналитики.

Ответом на эти требования стал класс программно-аппаратных платформ промышленного интернета вещей IIoT (Industrial Internet of Things), причисляемых к компонентам IoT.

Функциональность, предлагаемая системами типа SCADA, органично продолжает вливаться в более общую концепцию промышленного интернета вещей, где компоненты SCADA-системы становятся подсистемами промышленного интернета вещей по сбору и хранению промышленных данных предприятий.

Эволюция платформ пошла по пути миграции в облака. Можно сказать, что современный тип IoT-платформы – это совокупность IT-технологий, реализуемых в облаке. Однако в настоящее время ряд предприятий проявляет определенный скепсис по поводу размещения платформ и своих промышленных данных во внешних системах и облаках по причинам информационной безопасности. Интерес к облачным платформам проявляется в силу того, что последние имеют существенно меньше ограничений в плане вычислительных возможностей и объема хранимых данных, а также способны обрабатывать и хранить разные модели данных, разные их структуры, заложенные разработчиками, поскольку есть возможность поддерживать одновременно различные среды разработки и тестирования.

Таким образом, IoT-платформа должна обладать двумя главными признаками: во-первых, она должна быть реализована как программно-аппаратное обеспечение, предназначенное для подключения и управления датчиками, контроллерами и другими внешними устройствами сбора данных, во-вторых, IoT-платформа должна выполнять ряд пост-процессинговых и аналитических функций, зависящих от специфики производственных задач, которые она призвана решать.

ЦД, базирующийся на IoT-платформе, обладает способностью принимать и обрабатывать огромное количество данных от датчиков, обеспечивает масштабирование по требованию, предполагает долгосрочное хранение данных и на основе их анализа (в том числе с использованием систем машинного обучения в продвинутых решениях) позволяет осуществлять «умное» прогнозирование оптимальных графиков обслуживания оборудования, сокращения общего времени простоя и увеличения срока службы оборудования.

Компании, лидирующие в области разработки ЦД, проявили интерес к IoT-платформам. На рисунке 1.23 отмечен 2013 г., когда General Electric запустил платформу Predix, а PTC присоединил ThingWorx. В качестве примеров IoT-платформ следует назвать такие продукты, как Microsoft Azure IoT, AWS IoT, Google Cloud, IBM Watson IoT, Cisco IoT Cloud Connect, Salesforce IoT Cloud.

Область применения IoT-платформ в промышленном секторе (сбор данных с датчиков оборудования и их анализ в реальном времени) получила отдельное сокращенное название IIoT, однако термин IoT также используется для обозначения обеих областей – промышленной и B2C³².

Большинство современных IoT-платформ поддерживает аналитику в реальном времени. Платформы отличаются масштабируемостью (количество конечных устройств, которые могут подключаться к платформе), простотой использования, вариантами облачного развертывания (публичное или частное), вариантами хранения данных, получаемых с устройств, уровнем безопасности (защита данных путем шифрования, контроля доступа пользователей и т. д.).

Можно сказать, что технологии IoT и ЦД являются взаимодополняющими. Резкое увеличение числа IoT-устройств и снижение их стоимости стимулируют рост использования цифровых двойников. Совершенствование «умных» IoT-датчиков позволяет ЦД применять все более компактные решения.

Кроме того, ЦД позволяет решить ряд задач, возникающих внутри IoT-проектов. По мере того как вводится все больше взаимосвязанных интернет вещей, организация данных, систем и устройств становится все более сложной.

ЦД позволяет структурировать и упорядочить IoT-систему. ЦД сложного изделия – это, как правило, совокупность двойников ряда

³² B2C – от Business-to-Consumer, Бизнес для Потребителя, термин, обозначающий коммерческие взаимоотношения между частными лицами, так называемым «конечным» потребителем.

физических подсистем. Вместо того чтобы связываться с каждой подсистемой отдельно, физический объект (например, станок) отправляет все данные своему цифровому двойнику. ЦД агрегирует и обрабатывает эти данные, и те подсистемы, которым требуется информация, подключаются непосредственно к ЦД, где последние могут получить доступ к данным.

Принципиальная схема размещения датчиков и передачи данных в IoT-сеть показана на рисунках 1.24 и 1.25. Датчики размещаются в контрольных точках изучаемого объекта. На рисунке 1.24 показан пример размещения датчиков в ветрогенераторе. Обычно на подобных объектах устанавливают сотни датчиков разного типа.

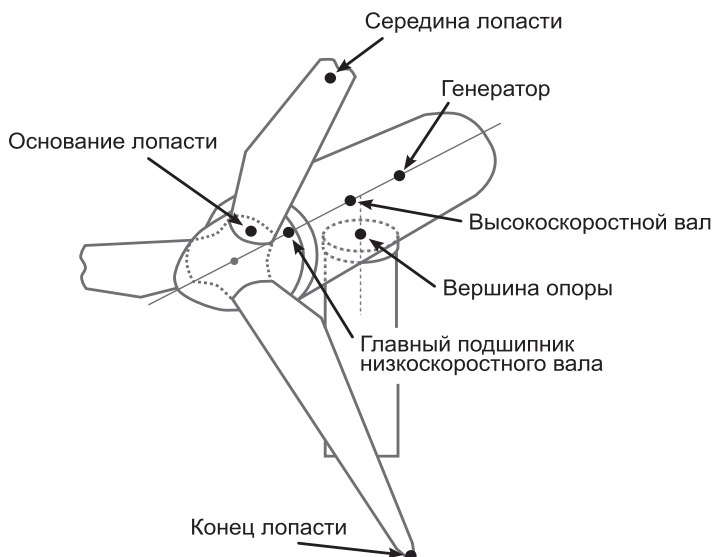


Рис. 1.24. Пример расположения датчиков в ветрогенераторе.
Источник: [34]

Датчики собирают данные в режиме реального времени, каждый датчик реагирует на изменения измеряемой физической величины, преобразовывает данные в цифровой формат, и они отправляются на микроконтроллер, отвечающий за обработку этих данных, а затем данные передаются в IoT-сеть (рис. 1.25).

Цены на датчики продолжают снижаться, по данным [35], в период с 2004 по 2014 г. средняя стоимость IoT-датчиков снизилась более чем вдвое, а к 2020 г. – еще на 37%.

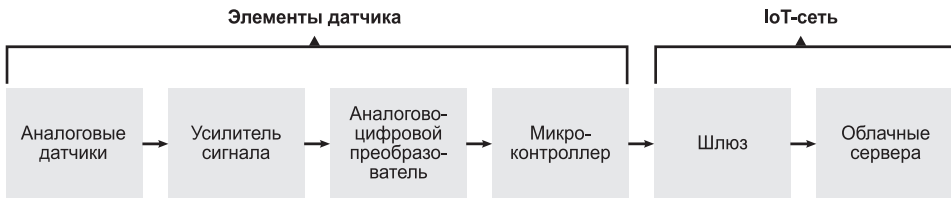


Рис. 1.25. Схема, показывающая связь между датчиком и IoT-сетью. Источник: [36]

Технологии математического моделирования и цифровых теней

Выше мы рассмотрели процесс совершенствования средств построения все более адекватных моделей создаваемых сложных изделий, а также эволюцию технологий автоматизации сбора и анализа данных на ИТ-платформах и формирования так называемых цифровых теней. В существенной мере объединение именно этих технологий определило создание решений класса ЦД.

На рисунке 1.14, приводимом в лекциях профессора А.И. Боровкова, мы рассмотрели процесс создания ЦД как процесс последовательного совершенствования математических моделей и роста уровня их адекватности. На рисунке 1.26 показана следующая стадия жизненного цикла ЦД, на которой появляется реальный объект и цифровой двойник как отражение данного реального объекта. На рисунке отмечено, что адекватность ЦД отличается от 100% на некоторую величину (дельта ЦД), которая не превышает 5%.

После того как создан реальный объект, начинается его эксплуатация, и в процессе эксплуатации собираются данные с различного рода датчиков, формируются так называемые цифровые тени, полученные с помощью датчиков от реальной физической системы или ее цифрового двойника.

Наличие цифровых теней позволяет более точно описывать поведение конкретного реального объекта и формировать прогнозы его поведения на основе цифровых двойников. Например, оценивать остаточный ресурс изделия.

Цитируя профессора А.И. Боровкова, отметим, что на этапе эксплуатации цифровой двойник «на основе «умной» модели «порождает» «умную» цифровую тень (Smart Digital Shadow, SDS) за счет по-

лучения оперативной информации о функционировании конкретного объекта/продукта при помощи технологий промышленного интернета и диагностики (в классическом случае – с помощью Health Monitoring System, HMS)» [37].

Дополнительная информация, полученная на этапе эксплуатации, повышает уровень адекватности, то есть «обучает» цифровой двойник и позволяет в дальнейшем с его помощью прогнозировать уровень возможных повреждений или остаточный ресурс.

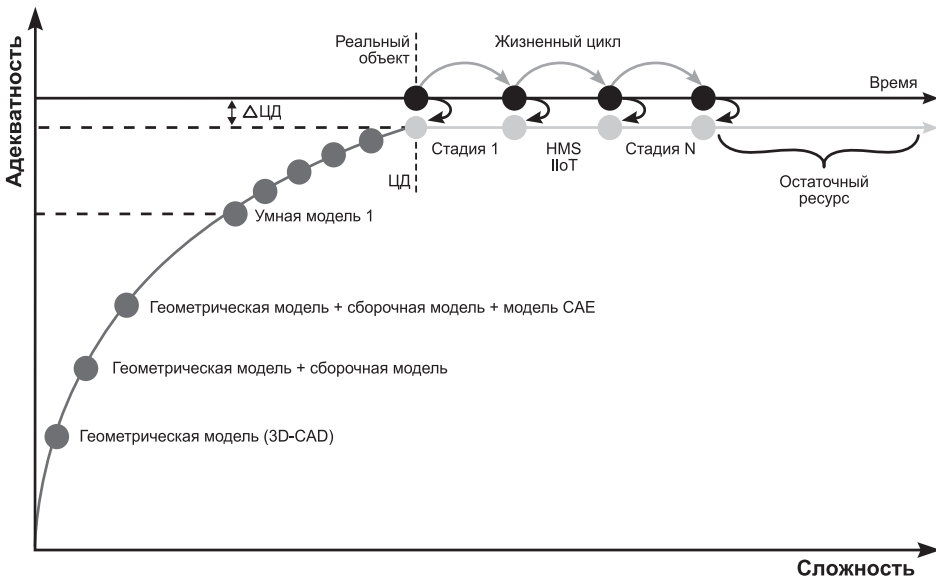


Рис. 1.26. Семейство физических и математических моделей. Цифровой двойник, цифровая тень. Источник: Центр НТИ СПбПУ

На рисунке 1.26 рассмотрен случай, когда уровень адекватности модели с момента изготовления изделия не изменяется. Однако, если идет успешное обучение ЦД на основе данных, получаемых в процессе эксплуатации, можно представить случай, когда параметр (дельта ЦД) удастся уменьшить, то есть дополнительно увеличить уровень адекватности цифрового двойника (степень адекватности «умной» математической модели, лежащей в его основе).

Более подробно о достижениях Центра НТИ СПбПУ, Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга»

(CompMechLab) СПбПУ и ГК CompMechLab, а также проектах, выполненных их специалистами, речь пойдет в главе 3.

На рисунке 1.26 был рассмотрен случай, где разработка ЦД начинается с этапа моделирования физико-механических процессов (по такому пути идет большинство проектов подобного рода). Однако на практике встречаются ситуации, когда проект начинается с внедрения операционной аналитической модели (модели, основанной на данных). Именно такой пример показан на рисунке 1.27. Проект начинается с разработки аналитической системы, которая используется для решения задач невысокой сложности – планирования ремонтов и мониторинга состояния контролируемой системы. Для того чтобы решать более сложные задачи (такие, как прогнозирование отказов и анализ первопричин данных отказов), все равно требуется разработка математической модели, описывающей физико-механические процессы. Сочетание аналитической и математической модели позволяет решать на порядок более сложные задачи.

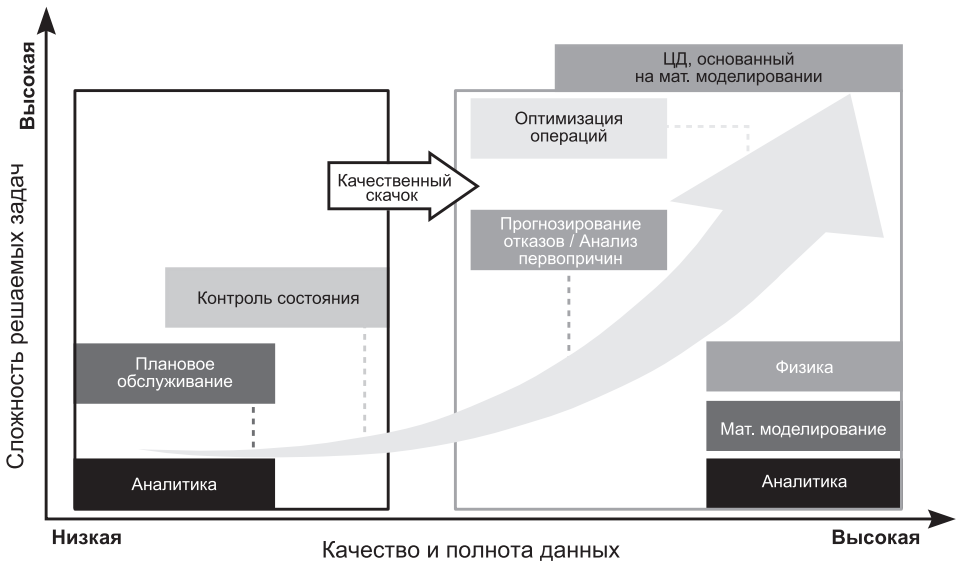


Рис. 1.27. Переход от модели, основанной на данных, к модели, основанной на математическом моделировании физических процессов. Источник: ANSYS

Следует отметить, что каждый из методов – и модели, основанные на данных, и подходы, основанные на математическом модели-

ровании физических процессов, имеют свои слабые и сильные стороны (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Достоинства и требования/сложности для реализации аналитических и математических моделей физико-механических процессов. Источник: [38]

	Достоинства	Требования / сложности
<p>Основа – математическое моделирование физических процессов</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Модели строятся на физических законах, определяющих поведение объекта в широких границах • На основе моделирования физических процессов удастся выявить глубинные причинно-следственные связи и важные закономерности в поведении конкретной системы • Неопределенность контролируется входными данными и точностью моделирования • Модель позволяет делать прогнозы в широких пределах, покрываемых моделью 	<ul style="list-style-type: none"> • Требуются глубокие знания в области физических процессов, описывающих поведение изучаемого объекта • Даже при больших вычислительных ресурсах требуется существенное время на расчет, что затрудняет использование модели в схемах, где необходима обратная связь в режиме реального времени • До начала моделирования должны быть известны все зависимости между входными и выходными параметрами
<p>Основа – аналитические подходы/машинное обучение</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Модель создается только из данных, – не требуя от исследователя наличия глубоких знаний предметной области • Обобщенный гибкий подход – обработка неоднородных потоков данных • Модель совершенствуется с течением времени (reinforcement learning – обучение с подкреплением) • Хорошо выявляет взаимосвязи и шаблоны 	<ul style="list-style-type: none"> • Для создания модели необходимо наличие качественных обучающих данных • Основа – это корреляции, а не причинно-следственные связи • Низкий уровень интерпретируемости результатов (например, при глубоком обучении) • Методы аппроксимации, без уравнений математической физики процесса • Предсказательные возможности быстро ухудшаются за пределами области действия обучающего набора • Трудно предсказать экстремальные/критические условия поведения моделируемого объекта при ограниченном числе наблюдений

На фоне маркетинговых предложений по внедрению Big Data решений, у ряда исследователей создается впечатление, что подход, основанный на данных, более прост, – понятны шаги: закупка датчиков, IoT-платформ, сбор «больших данных».

Однако стоит напомнить, что использование «больших данных» имеет свои ограничения, связанные с неполными или зашумленными данными, трудностями в предсказании редких событий. Методы экстраполяции не позволяют сделать такие предсказания. Установка и обслуживание датчиков стоит недешево, датчики подвержены ошибкам и сбоям, могут давать неправильные показания, а результаты могут перегружать пользователей терабайтами потоковых данных и избыточной информации, в некоторых случаях – «мусорной» информации.

Не имея модели физико-механических процессов (например, представление о напряженно-деформированном состоянии конструкции), трудно определить зоны, где целесообразно располагать датчики. Сбор данных – это только часть проекта. На этапе, когда появляется обратная задача, то есть когда необходимо на основе данных, полученных с датчиков (расставленных на основе интуиции исследователя), восстановить картину происходящего, то без наличия математической модели эта задача оказывается, согласно выражению А.И. Боровкова, сродни задаче «поиска иголки в стоге сена», – собрано огромное количество данных, 95% из которых являются мусорными и выделить из них содержательную часть очень сложно. Причем важно понимать, что искать «иголку в стоге сена» придется ежедневно, с учетом того, что каждый день будет сформирован новый стог сена.

Разработчики, которые следуют принципу – «мы не знаем, чего мы не знаем», и собирают избыточный объем данных в надежде найти корреляции в большом объеме данных, часто сталкиваются с тем, что поиск содержательных корреляций оказывается сложным и более затратным процессом, чем предполагалось в начале проекта. Известны проекты, где разработчики столкнулись с тем, что объем ежедневно собираемых данных оказывается намного больше, чем ежедневно способны обработать аналитики.

Только ЦД, основанный на моделировании физики процесса, может показать, где необходимо измерять тот или иной параметр, где функция может достигать экстремума, где будут критические зоны, что и где нужно измерять на разных этапах жизненного цикла изделия. А это означает, что до того как устанавливать датчики, нужно промоделировать весь жизненный цикл изделия, увидеть критические зоны, посмотреть, где достигается максимум той или

иной функции, после чего становится ясно, где именно должен быть поставлен датчик.

Следует отметить, что на разных этапах создания цифровой модели объекта существует разный объем данных о поведении физического объекта (рис. 1.28). На этапе «концепция» и «прототип» (см. рис. 1.28) данных от реального объекта нет вообще, поскольку нет самого физического изделия, и данные об объекте могут быть получены только на основе моделирования физических процессов, определяющих создание и функционирование будущего изделия. По мере накопления данных об изделии, последние все в большей мере могут использоваться для построения аналитических моделей. То есть «цифровая тень» появляется на этапе тестирования и эксплуатации готового изделия, в то время как математическая модель на базе физических процессов может создаваться до этапа создания реального объекта и предсказывать его поведение в широких пределах при изменении краевых условий задачи численного моделирования.

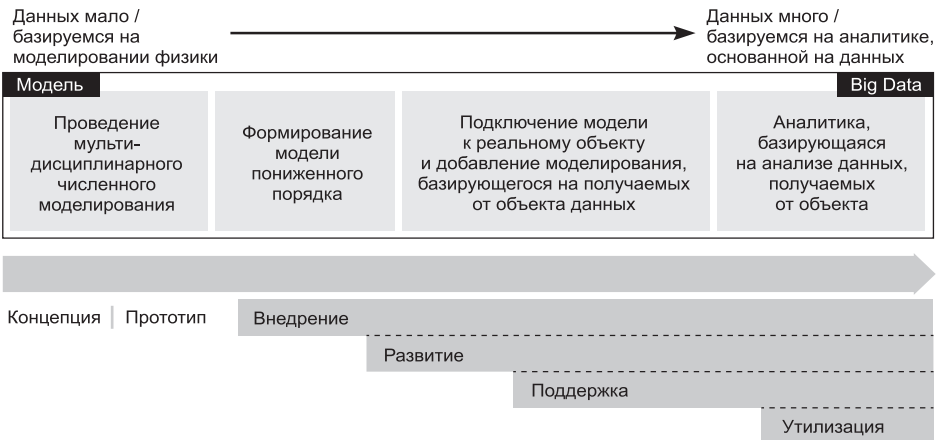


Рис. 1.28. Эволюция цифровой модели на разных этапах жизненного цикла изделия. Источник: [39]

Целесообразность использования того или иного способа построения ЦД при наличии различного объема экспериментальных данных иллюстрирует рисунок 1.29. При этом следует отметить, что полноценный ЦД предполагает, что модель физических процессов совмещается, а не уступает место модели, основанной на данных, получаемых от реального объекта [40].



Рис. 1.29. Схема условий применимости моделирования физических процессов и моделирования, основанного на данных, получаемых с датчиков. Источник: [41]

Математическое моделирование физических процессов в сочетании с моделями, основанными на данных, дает больше возможностей для прогнозирования, чем модели, основанные только на базе технологий машинного обучения. Моделирование, основанное на данных, как правило, ограничено лишь этапом эксплуатации изделия. Математические модели, основанные на физических процессах, более перспективны в задачах, отвечающих на вопрос «что, если?» и могут использоваться в неповторяющихся ситуациях, когда нет достаточных данных для применения статистических подходов.

Вопрос о правомерности называть решения, построенные на базе цифровых теней, цифровыми двойниками, безусловно, остается открытым. Дискуссию о том, являются ли решения, построенные на основе цифровых теней, цифровыми двойниками, можно найти также в статье [42], где говорится о необходимости отличать цифровые тени от концепции «цифрового двойника». Подчеркивается, что цифровые двойники, как правило, основаны на сложных математических моделях, описывающих некую совокупность физических процессов.

Наряду с этим такие признанные профессионалы в области построения ЦД, как специалисты компании ANSYS, используют такое

понятие, как Analytics based DT и Simulation based DT, то есть цифровой двойник, основанный на данных, и цифровой двойник, основанный на численном моделировании физических процессов.

ЦД, основанный на данных (Analytics based DT), работает по схеме: датчики + IIoT-платформа -> сбор данных -> аналитика (рис. 1.30, левая часть). В трактовке ANSYS – это подход «снизу-вверх». Создание двойника идет от экспериментальных данных, от IIoT-платформы, через обработку этих данных с помощью аналитических технологий, включая средства машинного обучения, и на базе полученной модели делается прогноз о состоянии оборудования в определенной перспективе.

Напротив, ЦД, основанный на численном моделировании физических процессов (Simulation-Based DT), реализует схему «сверху-вниз». Подход «сверху-вниз» – это когда исследование идет от объекта, – процесс сводится к математическому моделированию, к численному решению дифференциальных уравнений в частных производных.

При этом также используются данные от реального объекта, которые дополняют математическую модель, служат для определения краевых условий для решения систем дифференциальных уравнений. То есть схема выглядит таким образом: численное моделирование физических процессов + датчики -> сбор данных -> IIoT-платформа (рис. 1.30, правая часть).

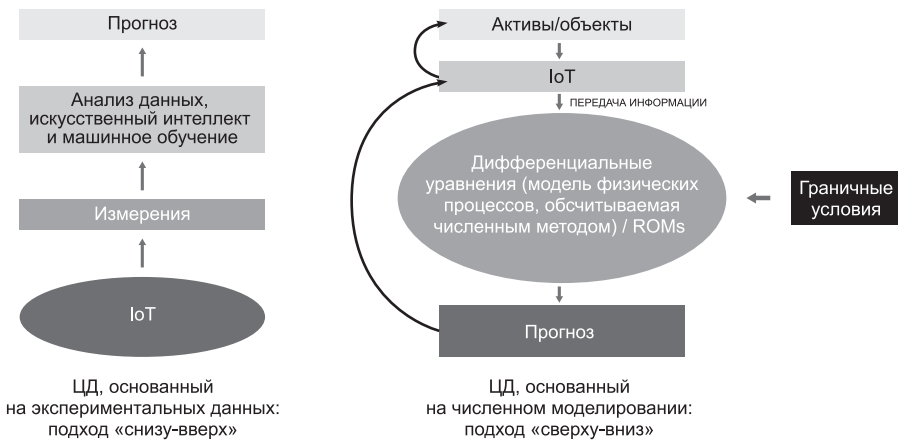


Рис. 1.30. Сравнение схемы построения аналитического ЦД и ЦД, основанного на численном моделировании физических процессов. Источник: ANSYS

Система дифференциальных уравнений в частных производных решается с помощью численных методов, как правило, – метода конечных элементов. Численное решение этих задач при мелкой (подробной) расчетной сетке (используется достаточно большое количество конечных элементов) может требовать существенных временных ресурсов даже при наличии мощных вычислительных систем. Поэтому возможно использование (отмеченных на рисунке) так называемых моделей уменьшенного порядка (Reduced Order Models, ROM), которые являются упрощением высокоточных сложных моделей и которые могут использоваться в задачах анализа режимов в реальном времени. Модели уменьшенного порядка позволяют экономить вычислительные ресурсы и ускорять расчеты³³ при определенной потере уровня адекватности описания конструкции и ее поведения.

И, наконец, «гибридный ЦД» (Hybrid Digital Twin) работает по схеме: математическое моделирование + датчики -> сбор данных -> IoT-платформа -> аналитика.

По сути, ANSYS выделяет те же типы двойников, что и компания Elementanalytics.com (рис. 1.6), хотя терминология у компаний несколько отличается.

В качестве примера проекта по созданию ЦД на основе аналитической модели и модели, основанной на численном решении дифференциальных уравнений, можно назвать проект по анализу прочности лопастей ветрогенератора (рис. 1.31). Проект реализован специалистами Института ветроэнергетических систем (Fraunhofer IWES). В нем используется сбор данных о внутренних дефектах исследуемых лопастей, проводится численный анализ распределения внутренних напряжений с учетом дефектов, и даются рекомендации по ремонту исследуемых объектов.

В данном проекте разрабатывались 40-метровые лопасти, которые анализировались на прочность в ходе экспериментальных испытаний и на предмет принудительного разрушения в контролируемых условиях.

Цель проекта – разработать методологии проектирования, эксплуатации и технического обслуживания лопастей ветровых турбин

³³ Хотя большинство ROM являются упрощениями сложных моделей, их создание может быть весьма дорогостоящим, поскольку требует накопления большого количества откликов системы на входные возмущения. Часто ROM обладают ограниченной надежностью в отношении изменений параметров и, следовательно, должны быть перестроены под новый набор физических параметров или параметров модели.

с использованием цифрового двойника каждой изготовленной лопасти. Цифровой двойник создавался для отслеживания текущего и прогнозирования будущего состояния каждой лопасти в течение всего жизненного цикла, позволяя улучшить понимание поведения лопастей ротора при их нагружении.

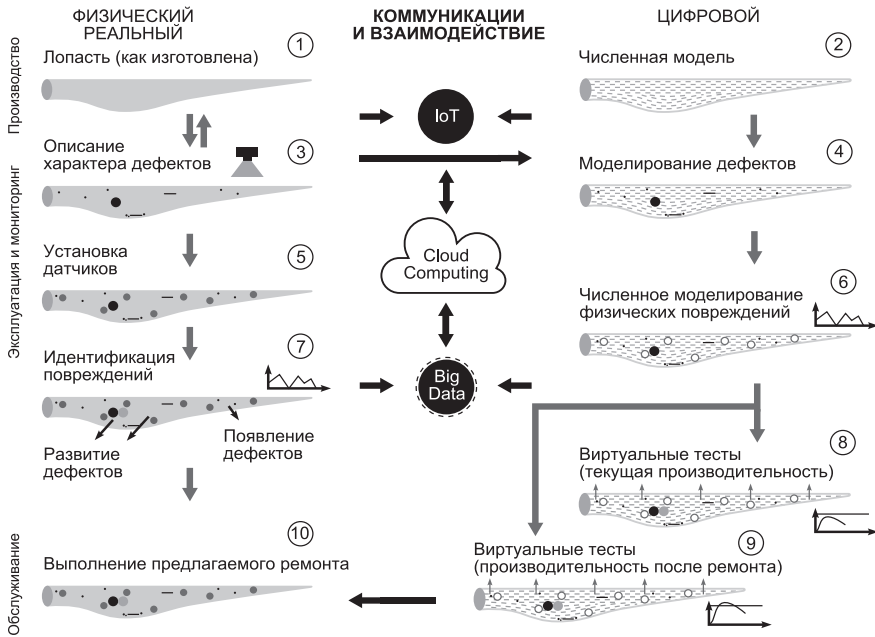


Рис. 1.31. Схема использования ЦД лопастей ветрогенератора. Источник: [43]

Испытания позволяют контролировать конструкцию лопасти, ее производство и тестирование, а также исследовать процесс повреждения в течение всего срока службы лопасти с помощью современных численных и экспериментальных методов на основе сложных моделей развития повреждений.

С помощью того или иного метода внутреннего контроля выявляются внутренние дефекты, затем создается численная модель с учетом выявленных дефектов, рассчитывается поле напряжений, анализируются зоны концентрации напряжений. Исходя из понимания расположения критических зон, устанавливаются датчики. Во время нагружения конструкции идет развитие внутренних дефектов, – эти процессы тоже анализируются с помощью моделирования напря-

женно-деформированного состояния. Проводятся виртуальные тесты, в которых выявляются дефекты, которые могут привести к разрушению конструкции и аварии, и предлагается схема ремонта.

До сих пор мы говорили о цифровых двойниках без обратной связи. То есть о таких двойниках, которые осуществляют пассивный мониторинг – собирают данные о состоянии объекта; данные обрабатываются, они доступны для анализа и могут быть переданы другим системам, например, другим ЦД или операторам. Такой вариант двойника относится к самому верхнему элементу в схеме (рис. 1.32).

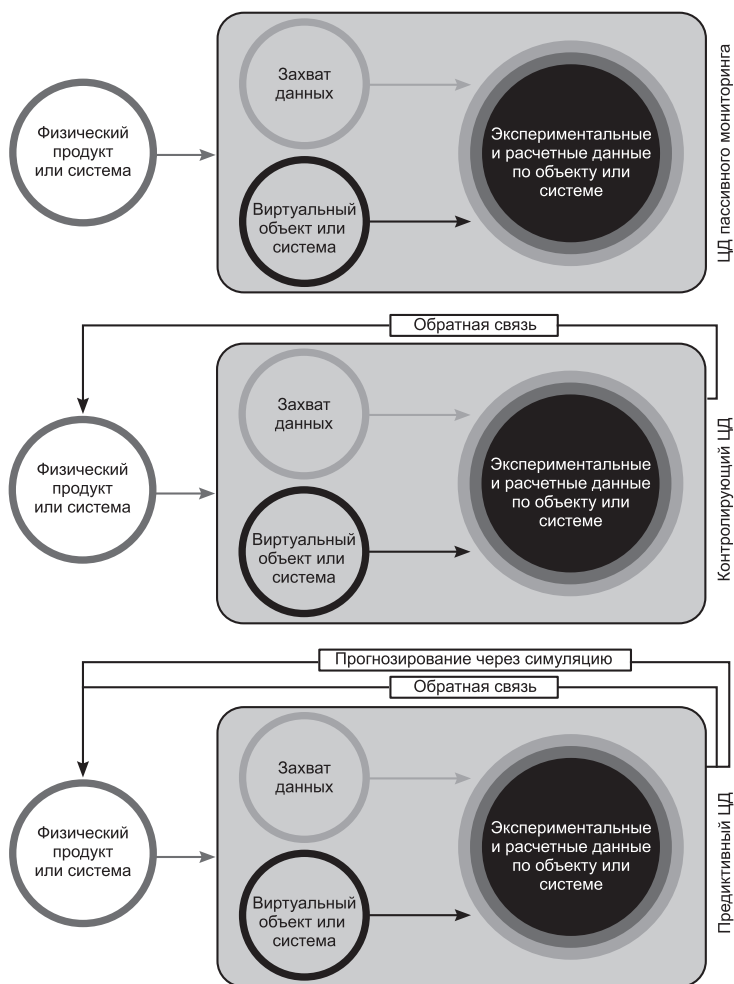


Рис. 1.32. Обратная связь в ЦД. Источник: Catapult

Возможен также вариант, когда на основании получения оперативных данных и анализа исторических данных ЦД может выработать некоторые управляющие воздействия, например, сформировать сигнал о необходимости остановки системы. Это уже – так называемый интерактивный двойник, который предполагает некоторую степень управления физическим объектом. На рисунке 1.33 это средний вариант.

И, наконец, третий вариант подразумевает сочетание модели, основанной на данных, и математического моделирования физических процессов, позволяющих прогнозировать управляющие действия для выбора оптимальной работы оборудования, например, настройки лопастей ветрогенератора при текущих параметрах состояния оборудования, скорости ветра и других условий, и передавать это управляющее воздействие на исполнительный элемент.

В общем случае схему ЦД с обратной связью можно представить в виде рисунка 1.33, где показан ЦД, который осуществляет мониторинг и управление оборудованием.

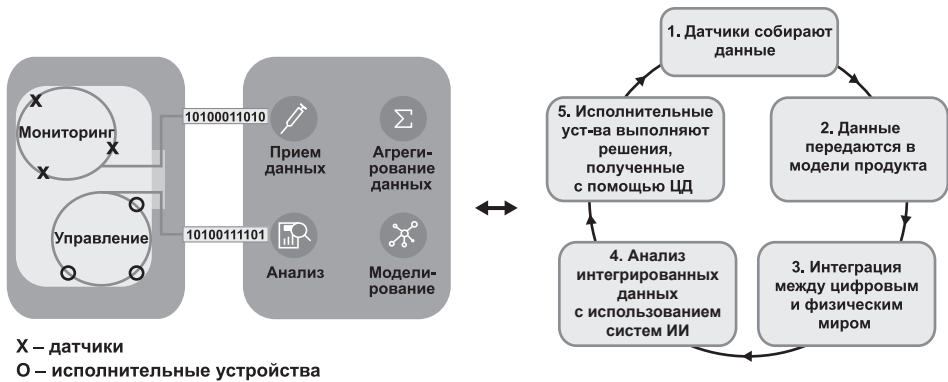


Рис. 1.33. ЦД с обратной связью, выполняющий функции мониторинга и управления. Источник: [44]

Говоря о ЦД с обратной связью, следует упомянуть концепцию киберфизической системы (Cyber-Physical System, CPS). Согласно [45] киберфизическая система – это система, в которой интегрированы физические и цифровые объекты, при этом физические объекты влияют на цифровые, и одновременно встроенные цифровые объекты (компьютеры и сети) контролируют физические объекты с помощью контуров обратной связи.

В CPS данные с датчиков собираются и анализируются для контроля физического процесса (Alam & El Saddik, 2017, pp. 2050–2051). Согласно (Autiosalo, 2018, p. 243) ЦД можно рассматривать как «цифровую часть киберфизической системы». При этом большинство авторов полагает, что под ЦД в данном случае следует рассматривать ЦД с обратной связью, где цифровая модель двойника используется физическим объектом для выполнения определенных действий, например, выбора оптимального режима работы или запуска механизма самовосстановления.

Говоря об этапах построения математической модели цифрового двойника, полезно также обратить внимание на подходы китайских ученых [46], которые предлагают рассматривать четыре этапа в построении математической модели цифрового двойника: построение геометрической модели (Geometry model), модели физических процессов (Physical model), поведенческой модели (Behavior model) и модели, основанной на правилах (Rule based model) (см. рис. 1.34).

Модели являются «вложенными» в том смысле, что геометрическая модель является базисом для последующих моделей, и каждая новая стадия дополняет возможности предыдущих. Геометрическая модель строится на основе CAD-инструментария, физическая модель описывает процессы, определяющие состояние материалов изделия, на базе использования численных методов решения соответствующих дифференциальных уравнений. На этой стадии широко применяется метод конечных элементов.

Поведенческая модель описывает поведение многокомпонентных объектов, описывает механизмы реагирования этих объектов на изменения (изменение состояния, изменение производительности) под воздействием определенных факторов (например, команд управления) или помех (например, воздействие внешней среды). На этом этапе используются методы моделирования, основанные на теории конечных автоматов, цепей Маркова, модели, основанные на онтологиях.

Модели, основанные на правилах, оперируют набором правил, извлеченных из исторических данных, накопленных при измерении параметров поведения физического двойника (реального объекта). Данные в сочетании с правилами позволяют оптимизировать работу систем, используя алгоритмы машинного обучения, такие как нейронные сети.

То, какие программные продукты могут использоваться на каждой из перечисленных стадий построения модели (рис. 1.34), будет рассмотрено в главе 3.

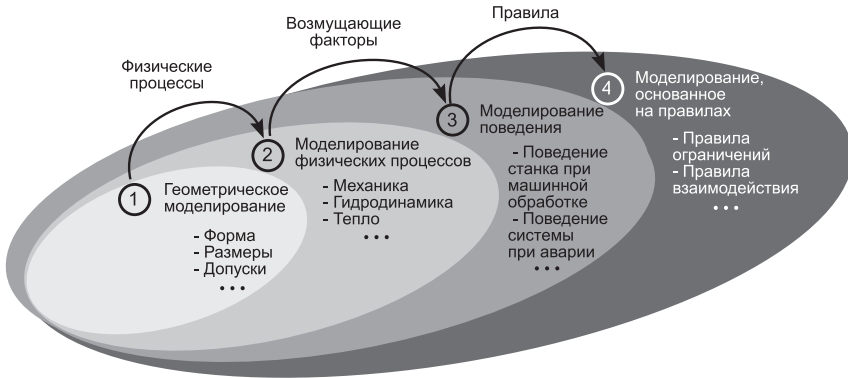


Рис. 1.34. Четыре этапа в построении математической модели цифрового двойника. Источник: Упрощенная схема по данным Fei Tao и Meng Zhang



Рис. 1.35. Замкнутая схема создания и использования ЦД. Источник: [47]

Выше были проанализированы модели ЦД, отражающие различные этапы жизненного цикла изделия. При этом этапы жизненного цикла рассматривались как последовательные этапы на временной прямой. Однако наиболее полное использование ЦД может быть при реализации замкнутой схемы (рис. 1.35).

Эта схема является непрерывной: создается виртуальная модель, затем она дополняется данными от реального физического изделия, ЦД обнаруживает закономерности в работе изучаемого реального объекта (в том числе выявляются различного рода проблемные места), полученные закономерности закладываются в разработку новой версии изделия, вместе с которым появляется модифицированный ЦД, и далее процесс развивается по спирали.

ЦД, облака и периферийные вычисления

Как было отмечено выше, объектами моделирования в решениях класса ЦД могут быть большие сложные объекты, генерирующие огромное количество данных. А это означает, что разработка, поддержка и использование цифровых двойников требуют дорогостоящих ресурсов по обработке и хранению информации. Облачные вычисления позволяют предоставить инфраструктуру и инструменты моделирования по запросу, делают эти ресурсы более доступными, освобождают потребителей от необходимости закупать элементы инфраструктуры и дают возможность переложить управление инфраструктурой на провайдера.

Провайдеры могут предоставить не только суперкомпьютерные вычислительные ресурсы по требованию, но также доступ к инструментам математического моделирования в форме SaaS³⁴, к платформенным ресурсам для разработчиков и базам данных по предметной области; таким образом, к услуге может получить доступ любой пользователь, подключенный к интернету. Эта функция может быть особенно полезна для высокопроизводительных вычислений, требующих суперкомпьютерных ресурсов, поскольку облако устраняет для пользователей необходимость управлять и обслуживать специализированное вычислительное оборудование. Проблема, которая препятствует более широкому использованию сервисов облачных вычислений в задачах моделирования, связана с задержкой переда-

³⁴ SaaS (Software as a Service) – программное обеспечение как услуга.

чи информации по телекоммуникационным сетям, однако этот недостаток нивелируется по мере роста скорости передачи информации.

В целом можно сказать, что облачные технологии сделали предложение ЦД более экономически эффективным. Благодаря постоянно падающей стоимости вычислительной мощности и хранилищ крупные сети центров обработки данных (ЦОД) с доступом, предоставляемым с помощью бизнес-модели Software as a Service, теперь позволяют компаниям приобретать именно те вычислительные ресурсы, которые им необходимы, и в то время, когда они им нужны, сохраняя при этом расходы под контролем. Возможность объединения в облаке данных, принадлежащих нескольким компаниям, участвующим в создании двойника или группы цифровых двойников, еще более упрощает задачу.

Одна из тенденций облачного рынка последних 20 лет заключается в строительстве все более крупных ЦОД, что дает существенную экономию и на закупках больших партий серверов, и на нивелировании неравномерностей потребления от отдельных клиентов из разных часовых поясов (суточные колебания) и различных организаций (с разными циклами отчетности и потребления ИТ).

В последнее время действует другая, в существенной мере противоположная тенденция, когда внедряется так называемая технология периферийных вычислений – Edge computing. Она отвечает за первичную обработку данных и передачу агрегированной информации в облако, где происходит накопление, хранение и аналитическая обработка информации. Edge computing (граничные или периферийные вычисления) – это система обработки информации, где сбор и анализ данных проводится не в централизованной вычислительной среде, такой как ЦОД, а в тех местах, где происходит генерация потоков данных (панели управления, датчики, удаленные рабочие станции).

Эта технология особенно актуальна в системах, где задержка является критичной. Например, в приложениях беспилотных автомобилей. Автопилот должен принимать решения (о торможении, начале движения, поворотах и т. д.) намного быстрее, чем могут позволить устройства, которые ведут загрузку информации из удаленного центрального облака. Использование технологии периферийных вычислений с технологией ЦД может помочь транспортным средствам ориентироваться на местности и избегать столкновений путем сканиро-

вания потенциальных препятствий (например, других транспортных средств, пешеходов и т. д.).

Периферийные вычисления осуществляются вне облака, на краю сети, в точках, приближенных к пользователю, и в приложениях, где требуется обработка данных в реальном масштабе времени. Периферийные вычисления, как правило, сосредоточены на обработке данных, генерируемых датчиками или контролируруемыми системами, то есть на обработке данных, которые находятся ближе к пользователю.

IoT-устройства на местах генерируют огромные массивы данных. Передать эти массивы для переработки в центральный ЦОД затратно, а периферийные вычисления позволяют обработать эту информацию там, где она создана. Edge computing отвечает за первичную обработку данных и передачу агрегированной информации в облако, где происходит накопление, хранение и аналитическая обработка информации.

Периферийные вычисления снижают время задержки, нагрузку на сеть и ЦОД, экономят время и ресурсы, и благодаря тому, что меньший объем данных передается через интернет, косвенно повышается безопасность. Задача архитекторов решений состоит в том, чтобы найти идеальный баланс между тем, что должно быть обработано в облаке, и тем, что лучше всего держать на периферии.

Применение периферийных вычислений актуально в промышленном производстве и при использовании автоматических транспортных средств, таких как дроны и беспилотные автомобили, где задержка передачи информации критична для управления.

Принципиальная схема периферийных вычислений показана на рисунке 1.36.

На уровне периферии (edge) на рисунке показаны промышленные компьютеры, которые сочетают в себе функционал платформы Edge computing с достаточным количеством вычислительной мощности для поддержки логики управления обработки информации от датчиков и некоторой визуализации процессов. Например, они могут осуществлять параметрический контроль определенного типа данных с заданием пороговых значений.

Вычислительная мощность на границе растет, в результате чего становится все более целесообразным располагать расширенные интеллектуальные модули в непосредственной близости к устройствам

с целью минимизации задержки обработки событий и обеспечения лучшего управления локальными операциями. Задача состоит в том, чтобы определить, как разделить логику приложения между облаком и границей и, в частности, как легко перенести функциональность на периферию. ЦД на базе IoT является решением этой проблемы.

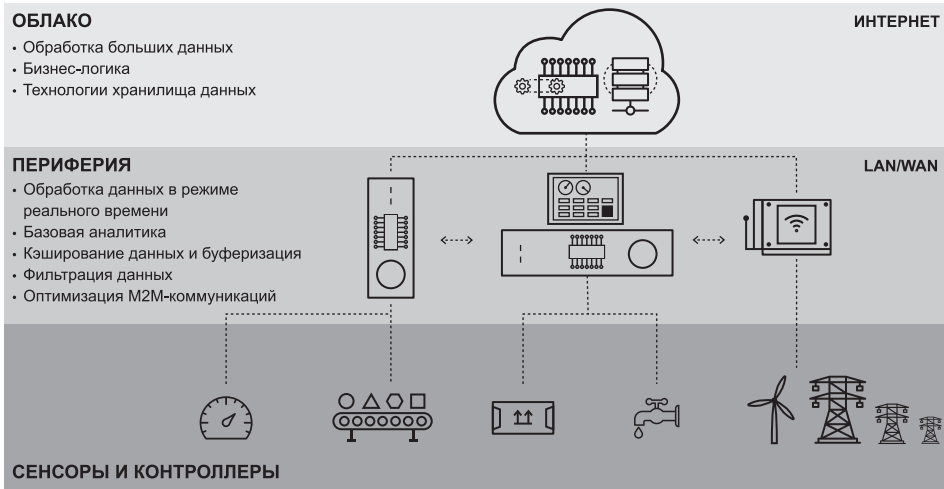


Рис. 1.36. Схема, поясняющая концепцию периферийных вычислений. Источник: [48]

IoT, как правило, подразумевает распределенную архитектуру, то есть построение всей системы имеет как минимум два уровня: центральное облако, где находится основная аналитическая обработка, и периферия, на которую приходится первичная обработка.

Концепция ЦД подразумевает наличие нескольких уровней вложенности двойников, которые могут взаимодействовать между собой. Например, если рассматривать модель ветрогенератора, то программный код, эмулирующий всю многокомпонентную систему, целесообразно поддерживать централизованно, в то время как часть кода, отвечающую за анализ состояния отдельных частей (например, лопасти ветрогенератора), целесообразно вынести ближе к источнику данных. В этом случае сигнал о появлении трещины в лопасти может быть обработан на уровне периферии, и у периферийного программного кода должно быть достаточно полномочий для перевода всей системы ветрогенератора в аварийный режим работы.

Если в случае IoT требуется разработать унифицированный подход – архитектуру ПО, обеспечивающую бесшовную работу между периферийными объектами и центром, то ЦД по сути дела и формирует данную функцию. Цифровые двойники предоставляют разработчикам приложений удобный способ взаимодействия с отдельными узлами в системе простым, однозначным способом. В отличие от облачных вычислений, которые предполагают хранение данных удаленно, периферийные вычисления размещают модуль хранения данных локально, что позволяет передавать данные намного быстрее [49].

ЦД и новые человеко-машинные интерфейсы

Система визуализации имеет огромное значение для построения эффективных ЦД как на этапе проектирования и разработки будущего продукта, так и на этапе мониторинга работы готовых эксплуатируемых систем.

Уровень визуализации для пользователя в существенной мере определяет качество ЦД-решений.

Человек не может прочитать за пять минут 100-страничный отчет. Однако скорость восприятия – это не только вопрос объема информации, но и вопрос удобства интерфейса. С помощью видео оперативность восприятия увеличивается, а наличие виртуальной и дополненной реальности дает возможность еще более увеличить скорость осмысления информации, уменьшить количество ошибок и сэкономить время.

Переходя к описанию роли виртуальной и дополненной реальности, вкратце напомним содержание терминов. Дополненная реальность (Augmented Reality, AR) – это интерактивное восприятие среды реального мира, в которой объекты, находящиеся в реальном мире, уточняются (дополняются данными) с помощью компьютерной информации.

Если дополненная реальность изменяет текущее восприятие реального мира, то виртуальная реальность полностью заменяет среду на имитацию. Дополненная виртуальность (Augmented Virtuality, AV) – это виртуальная реальность (Virtual Reality, VR), в которой присутствуют объекты из настоящего мира. Смешанная реальность (Mixed Reality, MR) охватывает дополненную реальность и виртуаль-

ную реальность и подразумевает еще и взаимодействие между физической и цифровой реальностью.

Помимо виртуальной реальности, различают также конструктивную реальность. В виртуальной реальности реальные люди взаимодействуют с виртуальной реальностью. В конструктивной реальности виртуальные люди (аватары реальных людей) взаимодействуют с виртуальной реальностью. Например, в дизайнерской программе (так же, как в компьютерной игре) могут присутствовать виртуальные люди, которые взаимодействуют между собой и с элементами оборудования, а наблюдатель оценивает, насколько виртуальным сотрудникам удобно работать в том или ином сборочном цехе или иной среде. Конструктивную реальность могут населять объекты, управляемые искусственным интеллектом.

Появление смешанной реальности позволило пользователю не только управлять объектами виртуальной реальности из физического мира (управление объектами на экране монитора), но также и наоборот, находясь ментально внутри виртуальной реальности и работая с виртуальными объектами, управлять реальными удаленными объектами. Так, например, имея в распоряжении виртуальные элементы управления экскаватором, реальные работы могут выполняться удаленно, вне пределов видимости реального объекта, если информация о физической и цифровой части синхронизируется в реальном времени.

Такой проект был например реализован в лаборатории СПбПУ для обучения машинистов карьерных экскаваторов и поддержан Фондом содействия инновациям.

Работа с подобными манипуляторами дает возможности управления удаленными объектами в опасных средах, таких как, например, вредное химическое производство или атомный реактор.

Концепция VR существенно старше концепции ЦД. Первый дисплей виртуальной реальности был создан в 1968 г. уже упомянутым в книге ученым-программистом Айвенгом Сазерлендом [50].

Устройство Сазерленда (он назвал его «идеальным дисплеем») представляло собой шлем со стереоскопическим дисплеем, в который передавались компьютерные изображения (каркасные формы объектов), которые меняли перспективу, когда пользователь двигал головой. Поскольку изображения накладывались поверх реального фона, это также можно рассматривать как рождение «дополненной реальности».

В разное время ряд компаний создавал гарнитуру для работы с VR: вначале преимущественно для развлекательных приложений, а чуть позднее – для инженерных. В 1993 г. компания Sega анонсировала гарнитуру Sega VR для консоли Sega Genesis. В 1995 г. появилась Nintendo Virtual Boy – игровая 3D-консоль, способная отображать настоящую 3D-графику. Примерно в это же время виртуальная реальность стала применяться и в задачах промышленного проектирования (рис. 1.37).

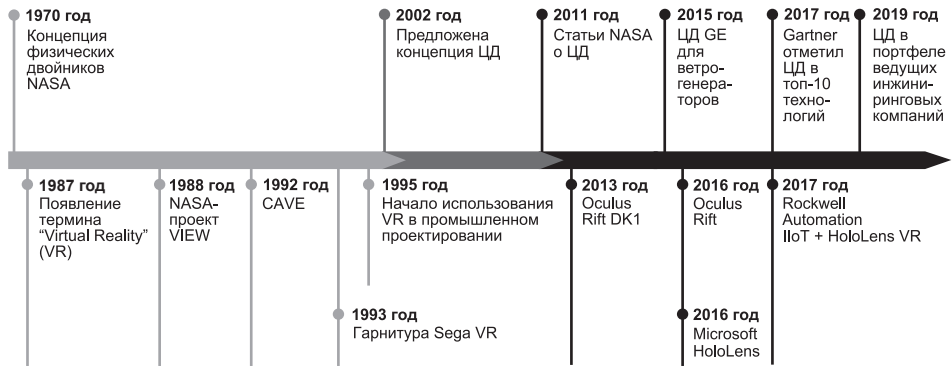


Рис. 1.37. Эволюция технологий ЦД на фоне развития технологий AR/VR. Источник: авторы

В 1988 г. NASA запустило проект "Virtual Interface Environment Workstation (VIEW)". В рамках проекта был разработан шлем, на который можно было передавать компьютерные или видеоизображения с удаленных камер. В проекте также были разработаны киберперчатки DataGlove и киберкостюм DataSuit. В 1992 г. появилась технология CAVE (Computer-Aided Virtual Environment) – комната виртуальной реальности, которая представляла собой многогранную проекционную систему 3D-визуализации, позволяющую нескольким пользователям совместно манипулировать сложными 3D-моделями.

В 2013 г. Google запустила проект Google Glass – гарнитуру для смартфонов на базе Android, а в 2014 г. создала устройство Cardboard – ультрадешевую систему виртуальной реальности, давшую толчок распространению технологии VR. Вместо того чтобы создавать гарнитуру с нуля, Google разработала устройство на базе смартфона и деталей стоимостью 15 долл., включая короб и пласти-

ковые линзы. Смартфон помещался в передней части коробки и служил как экраном, так и вычислительной частью гарнитуры.

В 2014 г. компания Facebook за 2 млрд долл. приобрела компанию Oculus VR, а спустя два года, в 2016 г., выпустила потребительскую версию очков виртуальной реальности Oculus Rift.

В 2016 г. Microsoft разработала очки смешанной реальности Microsoft HoloLens, использующие 64-разрядную операционную систему Windows Holographic, – устройство стоимостью около 3000 долл., которое автономно и не требует подключения к ПК, смартфону или игровой консоли. Голограммы выводятся в высоком разрешении, а звуки позиционируются в пространстве. Управлять очками можно при помощи жестов и голоса. Владельцы устройств имеют возможность использовать Skype и общаться с удаленными абонентами. Microsoft HoloLens – это мощный инструмент, который позволяет вывести визуализацию, предоставляемую цифровыми двойниками, на новый уровень, быстрее организовать процесс проектирования, согласования и мониторинга изучаемых объектов, решать более сложные задачи, снизить простои на производстве и сократить затраты. По утверждению Microsoft, основной целевой аудиторией HoloLens являются бизнес-пользователи. Партнеры Microsoft разрабатывают приложения для разных вертикальных отраслей. В частности, компания CAE Healthcare представила Microsoft HoloLens на рынке медицинского моделирования. Испанская медицинская технологическая компания Exovite объявила о том, что гарнитуры Microsoft Mixed Reality используются хирургами, что позволяет им быстро просматривать данные КТ, УЗИ и многое другое через очки Microsoft HoloLens. Boeing свидетельствует, что применяет Microsoft HoloLens для использования трехмерной визуализации в процессе обучения сотрудников.

Rockwell Automation сообщает, что использовала свою платформу разработки Studio 5000 с гарнитурой Microsoft HoloLens VR для создания приложений на основе смешанной реальности нового поколения для дизайнеров.

Microsoft приводит примеры, когда сервисные инженеры используют HoloLens для удаленного доступа к экспертам при проведении полевых работ. Цифровые двойники с функциями VR и AR представляют новые возможности для обучения и совместной работы, особенно в экстремальных ситуациях, – например, техник, работающий в поле, может не иметь всех необходимых данных или навыков для

критического ремонта сложного оборудования. Используя цифровой двойник, инженер компании производителя может диагностировать проблему и подать инструкции на AR-дисплей полевого техника, то есть организовать новый тип удаленно-командной работы.

Целый ряд компаний уже продемонстрировал возможности ЦД в сочетании со средствами виртуальной реальности на базе Microsoft HoloLens. В 2016 г. вице-президент General Electric, директор исследовательского центра «Software Research Global Center», провел демонстрацию управления цифровым двойником с помощью распознавания жестов с выводом результатов работы ЦД на устройство Microsoft HoloLens [51].

Компания Lockheed Martin Corporation информирует [52], что в корпорации используют технологию ЦД в сочетании с технологией COMITS-AR (Computerized Object Manipulation In Three-dimensional Space-AR – компьютеризированная манипуляция объектами в трехмерном пространстве на базе Microsoft HoloLens для использования возможностей дополненной реальности). Технология позволяет отображать модели, имеющие до 80 тысяч полигонов, и показывать видео с частотой 60 кадров в секунду. Для генерации изображения для правого и левого глаза (1268 x 720 пикселей на каждый глаз) используется графический процессор, и затем оба изображения отправляются на устройство HoloLens с помощью технологии Wi-Fi.

Еще один пример – решение, созданное в лаборатории «Industry 4.0 Collaboration Lab» Института управления информацией в области машиностроения (Information Management in Engineering, IME) при Технологическом институте Карлсруэ (KIT), Германия [53]. Там разработан ЦД фрезерного станка, который используется для оптимизации рабочих процессов в среде виртуальной реальности, что, по свидетельству разработчиков решения, позволяет увеличить производительность более чем на 20%.

На конференции «Digital Twin Conference – 2019» в Эйндховене (Нидерланды) компания Controllab представила доклад «How a digital twin emerged during the design of a wind turbine lifting tool» («Как был создан ЦД в процессе проектирования подъемника для лопастей ветрогенератора»). Подъем лопасти для установки на ветрогенераторе, находящемся в море, – это весьма трудоемкая задача. Подъем лопасти краном, установленным на корабле, сопровождается не только качкой, но и ветром, который воздействует на лопасть, имею-

щую большую парусность. В проекте Controllab был создан ЦД подъемной установки, а также разработан тренажер с использованием VR на базе шлема Okulus, с помощью которого можно было отработать управление установкой в условиях, приближенных к реальным.

Об эффективности технологии ЦД с использованием VR технологии сообщает Caterpillar – одна из ведущих корпораций по производству тяжелой спецтехники. С помощью технологий дополненной реальности сервис-инженеры компании, опираясь на математическую модель с предиктивной аналитикой, могут осуществлять точечный ремонт в полном соответствии с актуальным состоянием запросившего обслуживания грейдера. Цифровой двойник помогает также решить задачи маркетинга. По свидетельству специалистов Caterpillar, благодаря технологии ЦД компания сильно экономит на логистике крупного оборудования. Например, чтобы показать заказчику из ОАЭ (с целью последующей продажи), как работает грейдер, уже не нужно везти его в Эмираты, достаточно передать 3D-модель грейдера в свое представительство, где в очках виртуальной реальности можно провести презентацию для потенциального покупателя.

В 2019 г. компании Ericsson и Comau продемонстрировали в Ганновере на Hannover Messe цифровой двойник, снабженный средствами виртуальной реальности и подключенный с помощью технологии 5G. Проект выполнялся в рамках сотрудничества двух компаний по созданию решений класса Industry 4.0.

Comau и Ericsson продемонстрировали цифровую сборочную линию на автомобильном заводе, используя специальные очки для приложений виртуальной реальности. Проект позволял посетителям «погружаться» в процесс демонстрации сборочной линии, «перемещаться» по ней, отслеживая основные параметры процессов и машин. 5G-подключение позволяет получать массивный поток данных в реальном времени. Цифровая панель управления позволяет выявлять ситуации, которые могут привести к замедлению или прерыванию процесса, предоставляя инструкции для решения проблемы. Анализ данных дает возможность оперативно предвидеть неисправности и определять, какой компонент должен быть отремонтирован или заменен, предлагая действия, которые необходимо предпринять для эффективного устранения проблем.

На этапе контроля работы оборудования, когда ЦД собирает и генерирует большой объем данных об изделии или процессе, эффек-

тивность предоставления данных наблюдателю – это важный элемент в извлечении новых закономерностей в данных и оперативной реакции на полученную информацию.

Возможность наблюдения работы будущего изделия в трехмерном виде, возможность использования дополненной реальности для того, чтобы показать инженерам, занятым ремонтными работами, где произошла авария, показать техническим специалистам, где находится искомая подсистема, какие работы должны быть выполнены, оценить удаленно качество выполненных работ – все это новые возможности, которые предоставляет ЦД с помощью технологий AR и VR. На любом этапе жизненного цикла изделия или оборудования (проектирование, создание, обслуживание, устранение неполадок и т. д.) использование ЦД в сочетании с дополненной и виртуальной реальностью дает значительное повышение производительности.

Способность визуализировать разрабатываемую систему и обмениваться информацией с заинтересованными сторонами на этапе проектирования позволяет не только осуществлять обмен визуальной информацией среди проектировщиков, но и привлекать будущих клиентов на самых ранних этапах проектирования системы, которые могут предоставить ценную обратную связь в момент, когда изменения все еще могут быть сделаны дешево. Маркетинговые визуальные прототипы продукта могут быть разработаны до появления физического прототипа, и продажи с помощью ЦД могут привлечь новых клиентов.

Решения для смешанной реальности позволяют совершенно по-новому просматривать и взаимодействовать с данными. Весь жизненный цикл оборудования – проектирование, создание, обслуживание и устранение неполадок, становится значительно более производительным благодаря ЦД. Возникает возможность сравнить в виртуальном мире большое количество итераций виртуального проектирования, тестирования и перепроектирования, что происходит намного быстрее, чем в мире реальном. Можно сказать, что ЦД позволяют связывать мир физический и виртуальный, а приложения смешанной реальности позволяют переместить человека в мир виртуальный, чтобы работать с ЦД.

Говоря о важности и перспективности систем AR и VR, следует отметить, что компьютерное зрение по распознаванию изображений во многих задачах превосходит человеческое. А кроме того, визуа-

лизировать в виртуальном пространстве можно не только видимые в физическом мире объекты и параметры.

Сегодня средства VR позволяют воздействовать практически на все органы чувств человека (рис. 1.38).

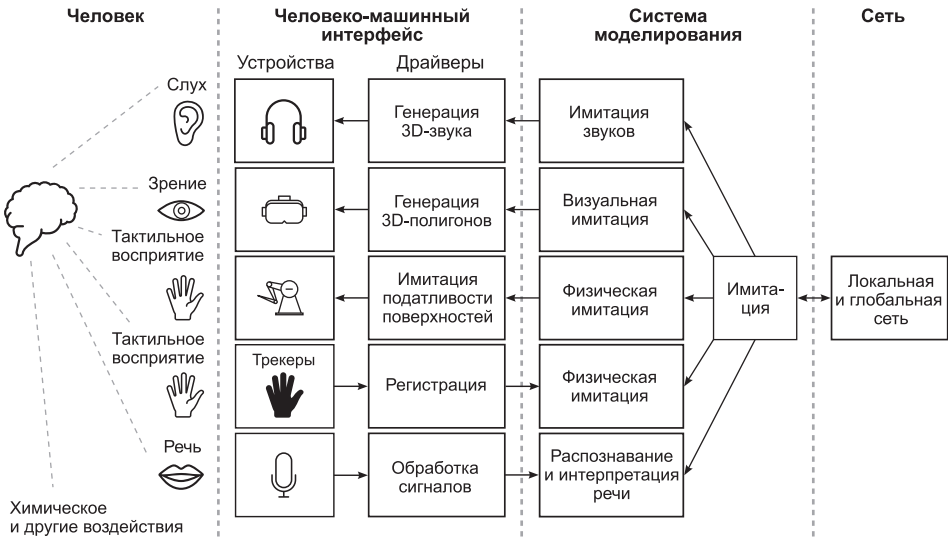


Рис. 1.38. Схема работы приложений виртуальной реальности.
Источник: [54]

Для большинства читателей все эти устройства хорошо знакомы. Возможно, некоторого пояснения требуют устройства передачи тактильных ощущений. Первое устройство – это система, имитирующая прикосновение к объекту (передает степень податливости поверхности виртуального объекта, – выглядит, как стилус на шарнирном приводе, эмулирующем сопротивление). Второе устройство – это киберперчатка, система, отслеживающая движения руки.

На сегодняшний день перечень, представленный на рисунке, следует признать неполным, – существуют уже отдельные устройства, которые позволяют передавать по сети запахи. Вернее, передается код, который на стороне клиента переводится в соответствующий запах путем смешивания в устройстве соответствующих компонентов в нужной пропорции, по такой схеме можно передавать и вкус. Кроме того, может имитироваться воздействие на вестибулярный аппарат путем передачи различных ускорений платформе, на которой нахо-

дится человек. Такая технология, в частности, используется в авиатренажерах с обратной связью, например, компании TFT Aero.

ЦД и Блокчейн

Процесс сбора данных о машинах в какой-то мере схож с процессом сбора данных о людях. Компании, обрабатывающие данные о гражданах, получают уникальные возможности по созданию новых сервисов. Несмотря на то, что существуют нормы обработки персональных данных, нередки случаи, когда данные о больших группах подписчиков разных сервисов просачиваются в интернет, подвергая риску их владельцев. Машины и люди все в большей степени зависят от данных. По мере того как данные становятся все более ценным активом, необходимость защиты последних становится все более актуальной.

Появление баз данных с информацией о все большем числе пользователей увеличивает риски утечки информации и масштабы потерь при утечках. То же справедливо и для цифровых двойников, которые могут аккумулировать информацию о критичных инфраструктурных объектах. Набор цифровых двойников может хранить информацию о целом парке машин, и утечка такой информации чревата большими потерями.

Учитывая, что ЦД разрабатываются для сложных, высокоответственных изделий и систем, часто расположенных в труднодоступных районах, становится очевидно, насколько актуален вопрос об обеспечении надежности и безопасности этих систем. Технология блокчейн может заполнить бреши в системе безопасности решений на базе ЦД.

С помощью этой технологии могут быть защищены данные, собираемые с IoT-устройств, обеспечены надежная аутентификация источника и механизм передачи данных. ЦД, использующие технологию блокчейн, могут гарантировать не только неизменность получаемых данных, но и тот факт, что все операции, проведенные с физическими объектами, воспроизведены в модели.

Очень актуальна задача проверки подлинности частей при комплектации изделия, ее решение помогает избежать поставки подделок при сборке высокоответственных узлов. ЦД с использованием технологии блокчейн обеспечивает возможность создания цифровых

сертификатов (не могут быть скопированы, изменены, подделаны, повреждены или украдены), которые подтверждают идентичность и подлинность любых активов.

После краткого обзора технологий, на которых базируется цифровой двойник, имеет смысл перейти к более подробной схеме ЦД.

Схема ЦД и роль составляющих технологий

Выше был рассмотрен целый ряд технологий, которые лежат в основе построения цифрового двойника и его окружения.

Возникает вопрос, – какое место каждая из них занимает в структуре ЦД и как представить его структурную схему?

Среди схем, отображающих цифровой двойник, традиционно использовались схемы, где выделяются: физический объект, цифровой объект и связь между ними. В рамках данной концепции представлено множество схем. В частности, интересную схему взаимосвязи ключевых технологий, используемых для создания ЦД, представила компания PTC (рис. 1.39). Здесь показан физический и виртуальный мир как две стороны единого целого (неслучайно использован символ Инь и Ян³⁵), и по границе двух миров, цифрового и физического, показаны технологии, которые осуществляют переход между ними. Так, например, 3D-печать создает физический объект как физическую копию цифрового, а виртуальная реальность из набора единиц и нулей создает виртуальную копию цифрового объекта, воспринимаемую человеком как физическую сущность.

Подробную (с точки зрения отображения технологий создания ЦД) трехэлементную модель ЦД можно найти в статье «Digital Twin & Machine Learning – The Differentiator in Oil and Gas IIoT» («Цифровые двойники и машинное обучение – дифференциатор в IIoT в нефтегазовой отрасли») [55] (рис. 1.40).

В данной модели показаны технологии, которые в основном относятся к созданию виртуальной части двойника. Это уже упоминаемые нами CAD-модели, которые несут информацию о геометрии изделия (внешнем виде и структуре объектов), информацию о материалах, процессах, размерах и прочее; это средства моделирования физических процессов в материалах объекта, например, на базе метода

³⁵ Символ изображает две противоположности Инь и Ян, которые образуют целое лишь в единой комбинации.

конечных элементов (Finite Element Analysis, FEA); это также модели, созданные на основе анализа видов и последствий отказов (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA), основанные на прогнозе надежности систем, которые могут объединять математические модели отказа со статистической базой данных о режимах отказа, а также данные об истории обслуживания и эксплуатации изделия. На схеме также отмечена возможность использования данных, измеряемых в процессе эксплуатации целого парка объектов, и проведения анализа на основе агрегированных данных.



Рис. 1.39. Технологии связи виртуального и физического мира. Источник: PTC

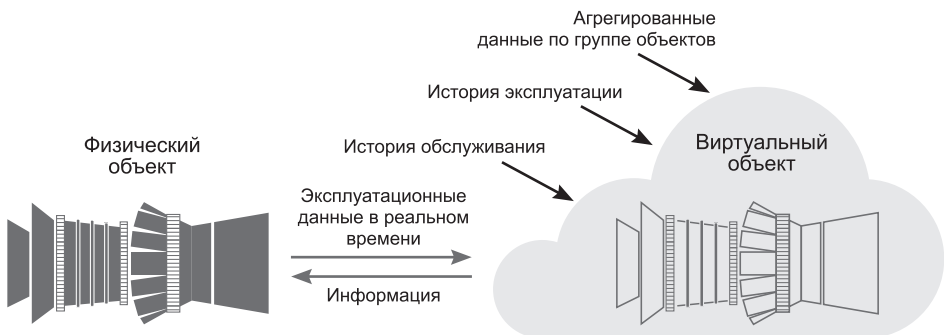


Рис. 1.40. Перечень технологий, лежащих в основе концепции «Цифровые двойники». Источник: General Electric, 2017

Комбинируя данные из различных источников информации, цифровой двойник может прогнозировать техническое состояние физического объекта. ЦД также может быть использован для прогнозирования реакции системы на критические события безопасности. Возможны решения, когда ЦД генерирует управляющие воздействия, способные смягчать повреждения или деградацию систем, активируя механизмы самовосстановления или рекомендуя изменения в профиле рабочей миссии (например, выбирая режим с меньшей нагрузкой на проблемный участок, тем самым увеличивая как продолжительность жизни, так и вероятность успеха миссии).

Цифровой двойник связывает виртуальную и физическую среду. Физическая среда (реальный объект, встроенные и внешние датчики) постоянно передает данные об эксплуатации и обслуживании для обновления виртуальной модели в цифровом двойнике. Таким образом, ЦД становится точным представлением физической системы в реальном времени, при любых ее изменениях.

Цифровой двойник использует данные измерений в реальном времени. Эта информация дополняется метаданными, свойствами и документами, такими как отчеты или рабочие процедуры, сгенерированными на всех этапах жизненного цикла объекта. На разных этапах в ЦД могут быть использованы разная информация и разные технологии (см. табл. 1.3).

Выше мы привели несколько примеров трехэлементной схемы ЦД. По мере эволюции цифрового двойника и предоставления услуг на его базе появилась пятиэлементная модель ЦД (рис. 1.41).

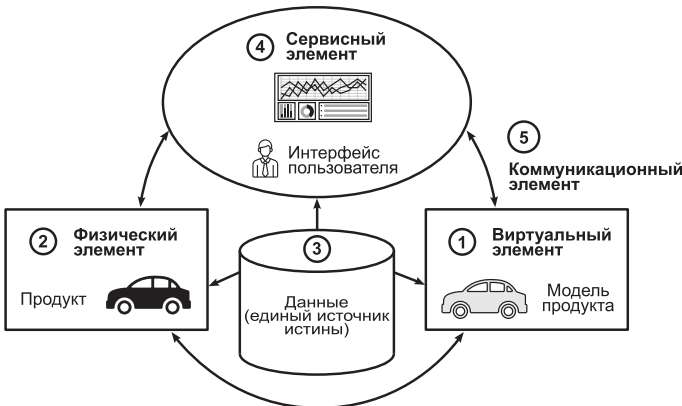


Рис. 1.41. Схема пятиэлементной модели ЦД. Источник: Fei Tao

Таблица 1.3

Информация и технологии, которые могут быть использованы в ЦД на разных этапах. Источник: АВВ

	Планирование	Создание	Эксплуатация	Поддержка
Информация о продукте на разных этапах жизненного цикла	PLM	PLM	Операционные инструкции	Записи об оказании сервиса
3D-представление	Проектные чертежи	Производственные инструкции	Визуализация объекта	Сервисные инструкции, дополненная реальность
Моделирование	Предсказание поведения	Виртуальный ввод в эксплуатацию	Контроль производительности	Диагностика
Численное моделирование	Проектное моделирование	Программно-аппаратное моделирование	«Что, если?», сценарии	Прогнозирование
Данные модели	Инженерные данные	Производственные данные	Эксплуатационные данные	Сервисные данные
Связанная аналитика	–	–	Эксплуатационные KPI	KPI состояния объектов
Визуализация	Средства разработки	Средства разработки	Визуальное отображение эксплуатационного состояния	Визуальное отображение технического состояния объекта

Пятиэлементный ЦД в отличие от трехэлементного дополнительно содержит сервисный элемент и центральное хранилище информации, так называемый «единый источник истины». В таблице 1.4 показаны основные функции каждого из перечисленных элементов и соответствующие этим функциям технологии.

Таблица 1.4

Технологии для построения ЦД согласно пятиэлементной модели. Источник: [56]

Элемент	Описание элемента	Используемые технологии и методы
Виртуальный элемент ЦД	Цифровая модель объекта, способная воспроизводить геометрию, физические свойства, поведение и правила, позволяющие оптимизировать поведение системы	<ul style="list-style-type: none"> • 3D твердотельное моделирование • Моделирование физических процессов • Моделирование поведения объекта • Модели, основанные на правилах • Анализ согласованности моделей • Интеграция моделей • Верификация, валидация и сертификация моделей
Физический элемент ЦД	Физические подсистемы и датчики	<ul style="list-style-type: none"> • Датчики • Софт-датчики^{<?>} • WSN (wireless sensor networks – беспроводные сенсорные сети) • Системы видеонаблюдения • Встроенные системы^{<?>} • Системы оптимизации расположения датчиков
Центральное хранилище информации	Объединяет данные от физического и виртуального двойников, производит обработку данных, предоставляет необходимую информацию	<ul style="list-style-type: none"> • Хранение данных • Моделирование данных • Очистка данных • Преобразование данных • Интеграция и слияние данных • Анализ и визуализация данных • Дейтамайнинг • Проверка целостности данных • Обеспечение безопасности данных
Сервисный элемент	Оказывает услуги для физической и виртуальной части ЦД, предоставляет интерфейс для пользователей. Осуществляет управление ЦД	<ul style="list-style-type: none"> • Управление ресурсами и сервисами • Описание услуг • Инкапсуляция услуг • Предоставление человеко-машинного интерфейса • Визуализация данных • Системы поиска и сопоставления результатов • Мониторинг работы оборудования • Оптимизация потребления ресурсов

Элемент	Описание элемента	Используемые технологии и методы
Коммуникации между элементами ЦД	Обеспечение связи между всеми элементами ЦД	<ul style="list-style-type: none"> • Анализ совместимости протоколов связи для внутренних элементов ЦД и связи с внешними системами • Согласование режимов работы интерфейсов • Дополнительные устройства связи в случае разнообразных типов «последней мили» • Обеспечение беспроводной связи • Дизайн интерфейса прикладного программирования (API): реализует связь между различными программными модулями с помощью протокола прикладного уровня • Разработка стандартов и согласование спецификаций протоколов связи между компонентами ЦД и внешними системами

ЦД как способ преодоления сложности инженерных систем

Для того чтобы полнее раскрыть функции ЦД, следует посмотреть на данную технологию как на средство решения проблемы роста сложности многокомпонентных инженерных систем. Действительно, атомные станции, «умные» города, автономные транспортные средства, беспилотные летательные аппараты – это лишь отдельные примеры сложнейших систем, которые появились на наших глазах за очень короткое время. Инженерные системы становятся все более взаимосвязанными и взаимозависимыми, что приводит к потенциальному росту уязвимостей, которые все труднее просчитывать, предвидеть и планировать.

ЦД и концепция MBSE

Концепция MBSE (Model Based System Engineering) исходит из того, что достижения в области цифрового моделирования должны помочь преодолевать вышеуказанную сложность, повысить эффективность новых и появляющихся вычислительных технологий для разработки все более сложных систем без снижения уровня их безопасности.

Рост сложности систем – это не новая проблема. Сложность изделий, которые создает человек, растет постоянно, однако изделия, содержащие миллионы деталей, – это явление нашего времени (рис. 1.42).

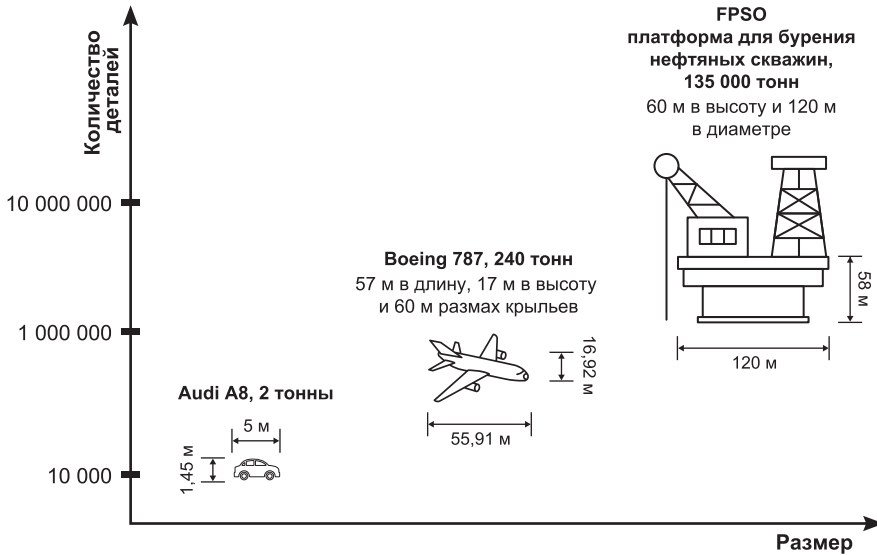


Рис. 1.42. Рост сложности инженерных сооружений. Источник: по материалам [57]

Отметим, что рост сложности определялся не только ростом числа подсистем, но и ростом разнообразия технологий, на которых они основаны³⁶. Двести лет назад практически все рукотворные изделия были механическими, и их проектирование/моделирование осуществлялось на основе законов механики.

Затем механические изделия сменили электромеханические, потом к ним добавились электронные компоненты, возникли бортовые компьютеры, для которых стало появляться все больше программного обеспечения, затем добавились механико-электронные системы с встроенным программным обеспечением, так называемые MESS-системы (Mechanical Electronic Software Systems). Программное обеспечение, внедренное в MESS-системы, стало со временем обращаться к внешним хранилищам данных. Системы стали не только

³⁶ Еще нужно отметить, что при создании сложных продуктов используются десятки разных материалов, которые ведут себя по-разному в разных условиях (прим. научного редактора).

«умными», но и подключенными (MESS + Network). Отдельные подсистемы стали сами по себе сложными системами. Далее сложные системы стали связываться в системы систем, так, например, бортовой компьютер автомобиля получил возможность связываться с системой спутников для обеспечения навигации (рис. 1.43), самолет связан со службами диспетчеризации, с аэропортом и т. п.³⁷.

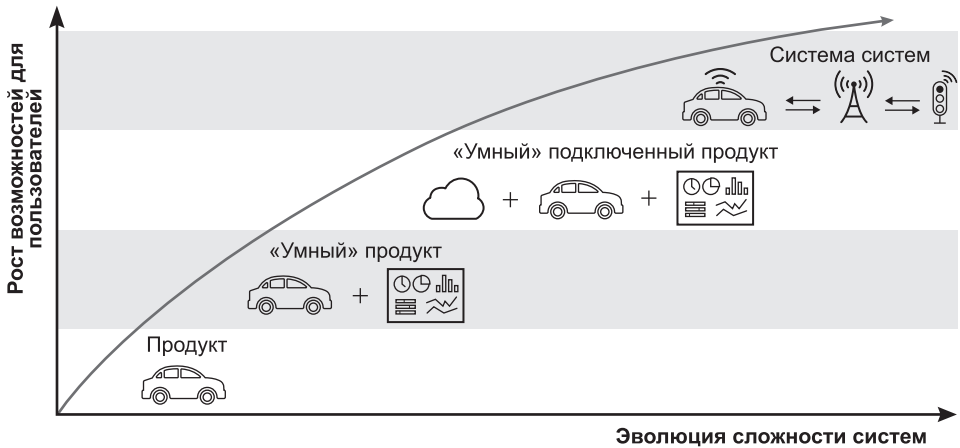


Рис. 1.43. Эволюция – от сложных систем к системам систем.
Источник: РТС

Рост сложности можно изобразить следующей цепочкой: система механическая → электромеханическая → система, управляемая компьютером → подключенные сервисы → смарт продукт → интерактивное решение → «умные» системы.

Увеличение технической сложности приводит к новым проблемам в архитектуре проекта, аппаратном и программном обеспечении, а также в организации коллективной работы.

Сбой в системе наступает тогда, когда неожиданное событие приводит к непредсказуемому взаимодействию элементов в системе, непромоделированному на стадии тестирования. Чем больше элементов в сложной системе, тем больше вариантов этих взаимодействий и тем больше проблема.

Количественно сложность систем стали измерять с помощью индекса сложности CI (Complexity Index), который включает два пара-

³⁷ Следует отметить, что данная упрощенная классификация не учитывает сложность систем с точки зрения протекающих в них процессов (т. е., с точки зрения возможности описания этих процессов) (прим. научного редактора).

метра – число деталей в системе NOC (Number Of Components) и количество строк кода SLOC (Source Lines Of Code) (рис. 1.44).

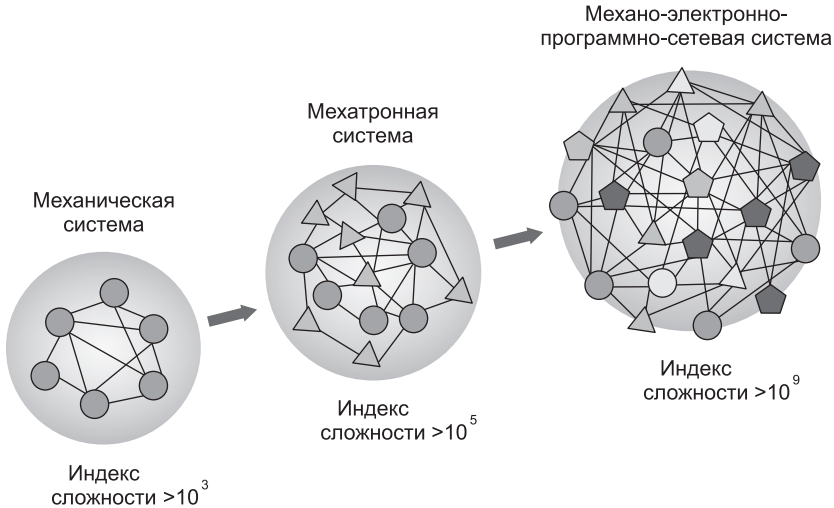


Рис. 1.44. Эволюция сложности систем, индекс сложности.

Источник: [58]

Задача преодоления роста сложности (увеличение сложности систем без снижения уровня надежности и безопасности и без увеличения сроков выхода подобных изделий на рынок) накладывается на еще одну проблему, которую мы упомянули ранее. Сегодня невозможно минимизировать число сложных объектов, делая их максимально массовыми и, следовательно, многократно тестируемыми. Конкуренция ныне определяется не только качеством проектирования и изготовления изделия, но и возможностью гибкой кастомизации под индивидуального клиента. Дополнительную степень сложности диктует глобализация.

При создании изделий высокой сложности задача состоит в таком изготовлении компонентов, чтобы они бесшовно интегрировались с другими деталями и узлами, произведенными в любой точке мира.

Чтобы оставаться конкурентоспособными, предприятия должны приспосабливаться к возрастающей сложности. Разные отрасли производства по-разному справляются с этой проблемой. Некоторые уже продвинулись в этом направлении, другие существенно отстают.

Рисунок 1.45 иллюстрирует время вывода на рынок новых изделий в зависимости от возрастания их сложности на примере автомобильной, электронной и аэрокосмической промышленности.

По оси ординат отложено время вывода изделия на рынок, а по оси абсцисс – индекс сложности выводимого на рынок изделия.

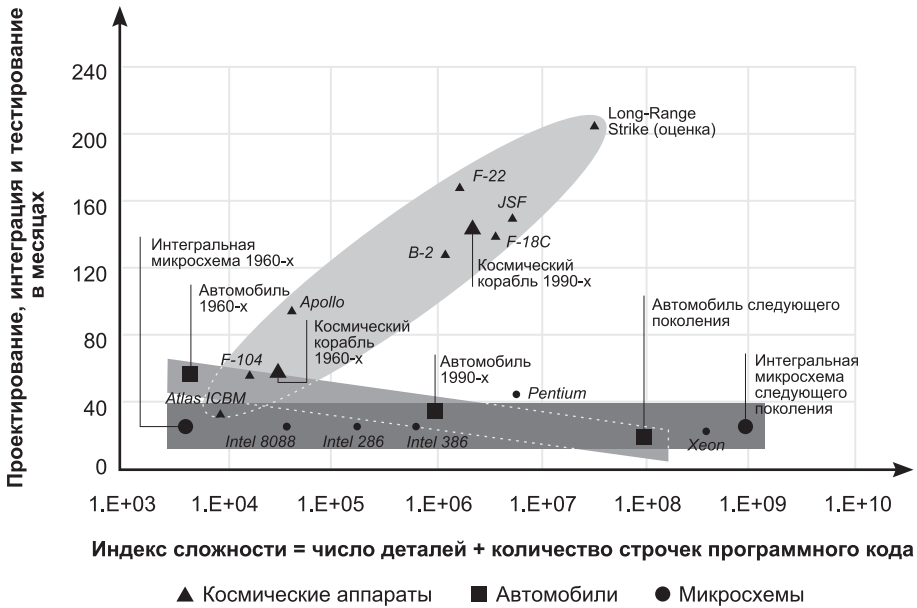


Рис. 1.45. Проектирование, интеграция и тестирование изделий в авиакосмической, электронной и автомобилестроительной промышленности. Источник: [59]

Как следует из рисунка, в аэрокосмической отрасли (которая из трех упомянутых отраслей является наименее массовым производством) время вывода новых продуктов на рынок постоянно увеличивается по мере роста их сложности. Разработчики, занятые в индустрии интегральных микросхем, оказались в состоянии внедрять новации без увеличения времени выхода на рынок постоянно обновляемых продуктов, а представители автомобильной промышленности успешно преодолевают рост сложности проектирования новых изделий и даже сокращают время выхода на рынок новых продуктов.

Преодоление роста сложности проектируемых систем невозможно без современных подходов системной инженерии. Можно сказать,

что рост сложности изделий и способов организации деятельности по их созданию и привели к возникновению новой прикладной дисциплины – системной инженерии, позволяющей установить связь между стратегическими целями, конкретными задачами и измеримыми результатами инженерной деятельности по созданию систем различного назначения.

Приведем еще несколько определений системной инженерии. Согласно [60] – это «наука о создании крупных комплексных систем, которые соответствуют определенному набору экономических и технических требований». Согласно другому определению, системная инженерия – это «междисциплинарный подход к переводу потребностей пользователей в определение системы, ее архитектуры, проектирование с помощью итеративного процесса, который приводит к эффективной системе, отвечающей нуждам пользователей. Системная инженерия применима ко всем этапам жизненного цикла, от разработки концепции до утилизации системы» [61].

Этапы жизненного цикла системной инженерии могут быть наглядно представлены с помощью так называемой V-модели (рис. 1.46), которая используется для определения единой процедуры разработки сложных систем.

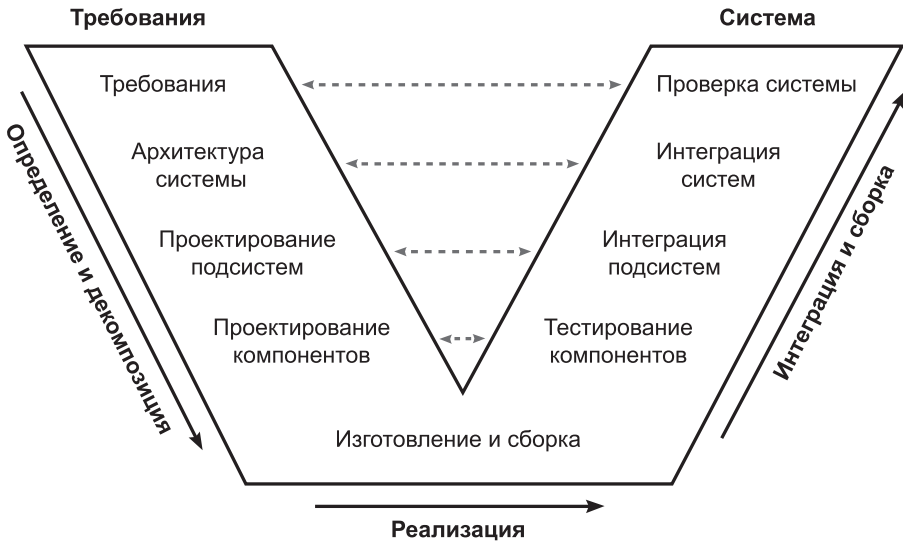


Рис. 1.46. V-модель процесса системной инженерии. Источник: Aras corp.

V-диаграмма является моделью разработки систем и используется для демонстрации разбиения этапов жизненного цикла системы на практики ее определения и воплощения (левая и правая ветви V-модели), каждая из которых в свою очередь разбивается на дополнительные подэтапы.

Левая часть V-модели представляет декомпозицию требований заказчика на функции будущей системы, включает в себя архитектуру системы, проектирование подсистем, компонентов, а также изготовление и сборку.

Правая часть отражает последовательность создания объекта гарантированной производительности, которая обеспечивается посредством тестирования компонентов, интеграции подсистем и проверки работоспособности интегрированной системы.

Детализация проекта увеличивается при движении слева направо. Горизонтальные линии, показывают, как результаты каждой из фаз разработки (на левой части диаграммы) влияют на этапы каждой из фаз тестирования (на правой части).

Концепция V-образной модели была разработана в Германии и США в конце 1980-х гг. независимо друг от друга. Немецкая V-модель была разработана аэрокосмической компанией IABG для Министерства обороны Германии и с 1992 г. была принята для гражданских нужд. Американская V-Model была разработана национальным (а с 1995 г. – международным) советом по системной инженерии для спутниковых систем, включая оборудование, программное обеспечение и взаимодействие с пользователями.

V-диаграмма иллюстрирует уже рассмотренный нами процесс уточнения требований к проекту (рис. 1.16), когда идет последовательный процесс определения требований к системе: потребности заказчиков фиксируют требования к системе, требования определяют архитектуру, архитектура – рабочую документацию, при этом свобода в выборе инженерных решений на каждом уровне уменьшается.

Одной из современных методологий системной инженерии является MBSE (Model Based System Engineering – системная инженерия на основе моделей) [62]. MBSE в качестве концепции обсуждается с конца 1990-х гг., как инициатива INCOSE³⁸ – с 2006 г.; можно ска-

³⁸ Международный совет по системной инженерии – INCOSE (International Council on Systems Engineering) – некоммерческая организация, ставящая своей целью развитие системной инженерии и профессиональный рост системных инженеров.

зять, что ее современное толкование сформировалось на международной конференции по MBSE, которая состоялась в 2010 г.

В самом общем плане MBSE – это инженерия, опирающаяся на единую согласованную модель проектируемой системы, которая объединяет все данные и свойства о создаваемой системе. Это концепция формализованного применения моделирования для поддержки формирования требований к системе, поддержки проектирования, анализа, верификации и валидации системы на всех фазах ее жизненного цикла.

Анализ системных катастроф (Hollenstein, Klien и Komes, 2006) позволил выявить ряд проблем, возникающих при проектировании сложных многокомпонентных объектов, включая такие проблемы, как недостаточная коммуникация (особенно во время переходов и переключений между разными моделями), устаревшие спецификации или неполные требования к изделию, слабый контроль над конфигурацией, недостаточное качество тестирования на наличие ошибок и, кроме того, неспособность обеспечить постепенную деградацию системы в случае отказа.

Концепция MBSE является ответом на перечисленные вызовы и призвана обобщить модели знаний, улучшить коммуникации, обеспечиваемые моделями, лучше оценивать модели на предмет их согласованности, полноты и корректности; увеличить способность анализировать последствия изменений в системе; улучшить преодоление сложности и повысить качество создаваемой системы; усовершенствовать извлечение знаний и их повторное использование (что приводит к сокращению времени производственного цикла и снижению затрат на обслуживание), а также позволяет минимизировать потери знаний после ухода членов команды (Friedenthal, Griego and Sampson 2007) [63].

Системное проектирование на основе моделей – это применение моделирования для обеспечения реализации предъявляемых к системе требований на всех этапах жизненного цикла изделия. MBSE подразумевает концепцию непрерывного моделирования и переход на открытый обмен данными на всех этапах формирования изделия.

Цифровой двойник опирается на наличие согласованного и непротиворечивого набора мультidisциплинарных и мультимасштабных моделей объекта на всех этапах жизненного цикла, то есть, по

сути, внедрение MBSE подхода – это один из необходимых этапов для построения ЦД-решения.

Согласно рисунку 1.47 MBSE появляется на верхней ступени развития инструментов системной инженерии.

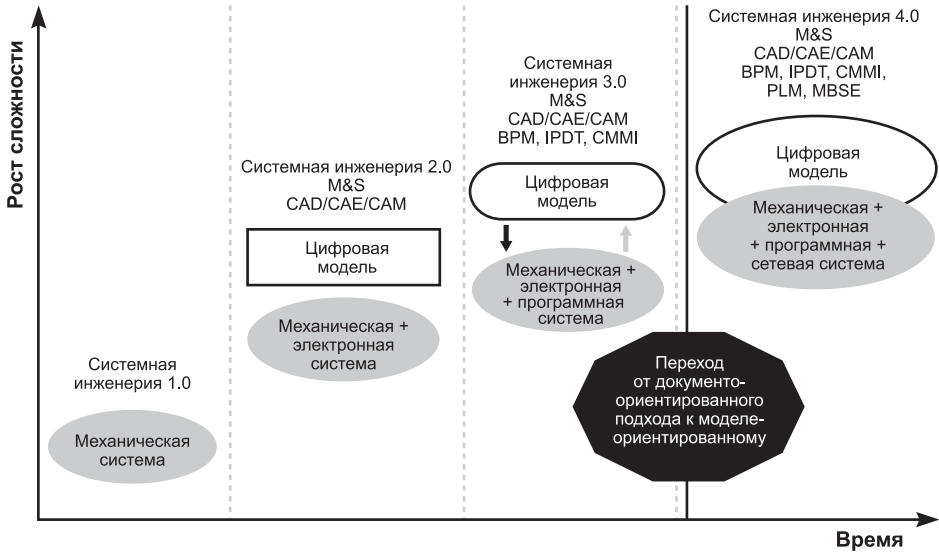


Рис. 1.47. Переход от документоориентированного подхода к модели-ориентированному. Источник: [64]

В определенной степени рисунок 1.47 является развитием рисунка, с которого началась эта книга (рис. 1.1). Здесь показаны те же исторические этапы сближения цифровой модели и физического объекта, с той разницей, что на рисунке 1.47 продемонстрировано усложнение физических систем (механические, мехатронные и т. п.), а также показаны типы программного обеспечения, используемого для создания цифровых моделей на соответствующих этапах.

На первом этапе (цифровой модели еще нет) практически все продукты были механическими и проектировались они на основе инструментов докомпьютерной так называемой «системной инженерии 1.0» с помощью мало кому сегодня знакомых листов ватмана и кульманов. Второй этап – «системная инженерия 2.0» или стадия M&S (Modeling and Simulation) – проектирование и моделирование на основе инструментов CAD/CAE. Третий этап – «системная инженерия 3.0», где в дополнение к CAD/CAM/CAE добавляются различные кон-

цепции и методики управления бизнес-процессами, такие как, например, BPM³⁹, IPDT⁴⁰, CMMI⁴¹.

Ключевым событием в процессе перехода на MBSE является переход от документоориентированного подхода к модели-ориентированному.

В чем суть данного перехода? Большинство организаций давно полагаются на обмен документами в электронной форме. Это могут быть текстовые документы, таблицы Excel или чертежи в формате PDF. Но тот факт, что данные хранятся в электронных файлах, не означает, что они доступны в разных подсистемах проектирования изделия, поскольку для извлечения из этих файлов необходимой информации все еще требуется человек.

Документ на естественном языке не предполагает извлечения однозначно определяемой информации (рис. 1.48).

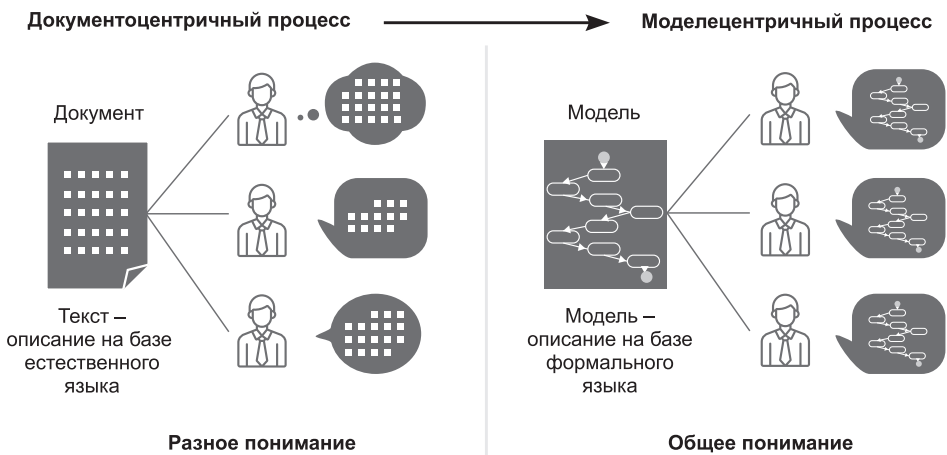


Рис. 1.48. Сравнение документоцентричного и моделицентричного процессов. Источник: Zhang, X.

³⁹ Business Process Management, управление бизнес-процессами – концепция процессного управления организацией, рассматривающая бизнес-процессы как особые ресурсы предприятия, непрерывно адаптируемые к постоянным изменениям.

⁴⁰ Integrated Product Development Teams – интегрированный набор функциональных групп, общая команда, состоящая из нескольких групп, обладающих соответствующими ресурсами, полномочиями и компетенциями по разработке/поддержке продукта процесса или услуги.

⁴¹ Capability Maturity Model Integration – набор моделей (методологий) совершенствования процессов в организациях. Определяет уровни зрелости для процессов (начальный, управляемый, определенный, количественно управляемый и оптимизирующий).

Переход к модели-ориентированной инженерии как ключевой в развитии системной инженерии выделяют разные авторы. Например, в книге А. Левенчука «Системноинженерное мышление» данный переход представлен как третий этап развития системной инженерии (рис. 1.49).

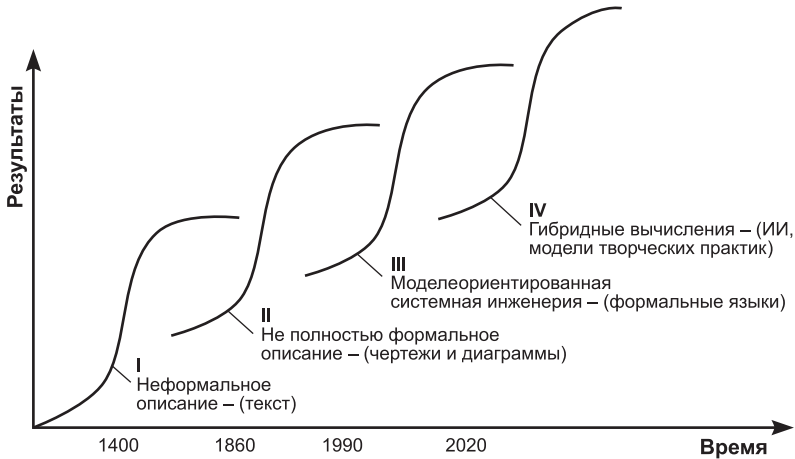


Рис. 1.49. Эволюция методов системной инженерии.

Источник: А. Левенчук

Согласно рисунку 1.49 эволюция методов системной инженерии проходит 4 этапа. Первый – неформальное описание (чертежей на этом этапе еще не было – обходились эскизами, макетами и пространственными текстовыми описаниями). Второй – не полностью формальное описание, его нельзя формально проверить, оно предназначено для чтения и интерпретации людьми, а не компьютерами. Третий – модели-ориентированная системная инженерия, предусматривает использование формальных моделей, которые могут быть обработаны компьютером. На данном этапе применяют не только физические, но и логические модели, использующие аппарат дискретной математики и алгоритмические модели на языках программирования. Четвертый – это этап, на котором появляется упомянутый нами ранее генеративный дизайн, когда моделируется творческая практика в процессе итерационного взаимодействия человеческого и компьютерного интеллекта. Особенностью рисунка 1.49 является то, что этапы даны в виде s-образных кривых, которые описывают закономерности появления на рынке новых технологий. На начальном

этапе – это медленный рост (осведомленность о новой технологии невелика, и на нее переходит незначительное число пользователей), затем быстрый рост (за счет перехода большинства) и, наконец, стадия насыщения.

Концепция MBSE – это в существенной мере концепция решения проблемы роста сложности. Увеличение числа участников с определенного момента перестает добавлять преимущества в решении задачи, хотя есть и экономические соображения, согласно которым многие компании могут позволить себе увеличить штат сотрудников.

Переход к 3D-моделям не является автоматически переходом к концепции MBSE.

Предприятие, внедряющее MBSE-подход, должно полагаться на доступность данных, поэтому 3D-модель должна базироваться на параметрах и форматах, которые позволяют другим приложениям читать их. Эти параметры должны быть доступны на этапах моделирования физических процессов в изделиях, в инструментарии оптимизации продукта и в инструментах для оптимизации производства. Во всех случаях параметры обеспечивают непрерывность данных между различными приложениями (решающими разные задачи), устраняя необходимость создавать новые представления в разных форматах. Это и есть основной шаг в направлении преодоления сложности.

Пока еще на многих предприятиях процесс моделирования и проектирования разнесены по разным информационным системам и, как правило, по разным группам сотрудников. И даже если они передают друг другу данные в электронной форме, – это не значит, что эти данные доступны в единой непрерывной цифровой среде.

Совмещение процессов моделирования физических процессов и проектирования геометрии, о котором шла речь выше, – это первый шаг в направлении цифровой непрерывности.

В основе концепции MBSE лежит идея создания единой модели проектируемой системы, объединяющей все характеристики и свойства системы в рамках одной модели.

Эта модель должна быть способна генерировать все документы, все свойства, все представления об изделии из этой объединенной модели, которая является «единым источником истины». Иными словами, изменения в одной системе должны автоматически отражаться в других, обеспечивая единую картину, «единую истину».

Из данного «источника истины» конкретные представления для различных нужд могут генерироваться автоматически в любой момент времени, на любом этапе эволюции модели. Если нужны последние версии каких-либо документов, они генерируются из модели как определенный «срез данных», основываясь на этом «источнике истины» (рис. 1.50) [65].

Это идеальная концепция, которая лежит в основе MBSE-подхода. Реальность состоит в том, что большинство современных разработчиков имеет дело с большим числом приложений от разных вендоров. Под разные задачи подбираются лучшие в классе решения, которые сложно интегрировать. Информация «рассыпана» по разным системам в CAD-, в Excel-файлах, в PDF-, в SysML-моделях. Это известно как «Silo problem»⁴² – проблема хранения данных в неинтегрированных системах.

Ключевая характеристика MBSE – это поддержка одновременного использования множества методов описания (viewpoints), т. е. одновременного применения множества методов моделирования для получения множества групп описаний (views) для разных задач [66].

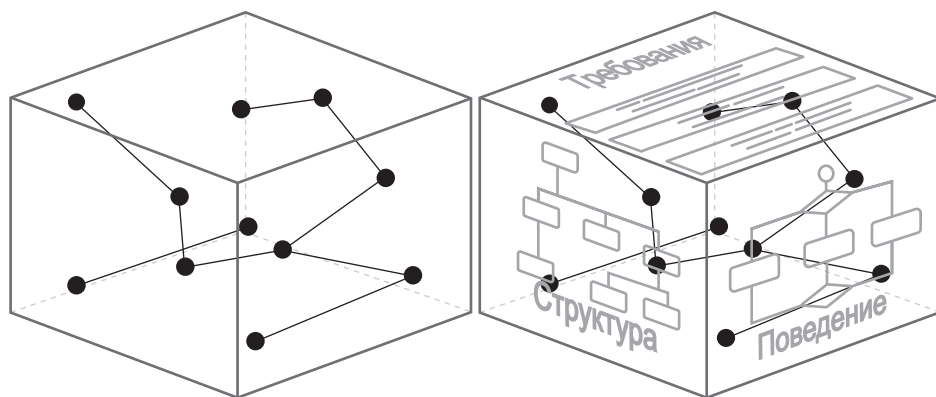


Рис. 1.50. ЦД интегрирует доступную информацию об объекте так, чтобы она соответствовала принципу «единый источник истины». Источник: Intersax

Пользуясь символикой рисунка 1.50, можно вывести сходные рассуждения по поводу ЦД. Цифровой двойник интегрирует всю доступную информацию об объекте, организует ее таким образом,

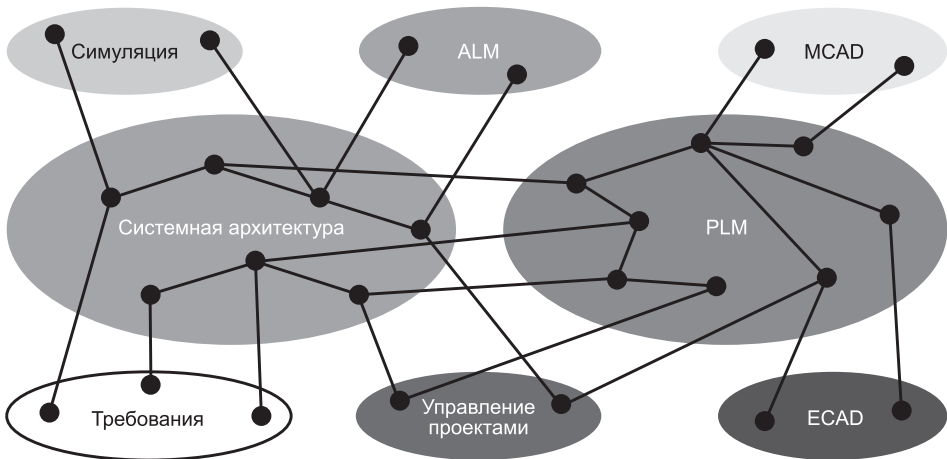
⁴² Проблема колодезев данных.

чтобы она соответствовала принципу «единый источник истины», и частные случаи практического применения ЦД задаются как отдельные информационные срезы. При этом ЦД может выступать и в виде 3D-модели для иллюстрации внешнего вида детали, и в виде AR/VR-макета CAD/CAM/CAE-модели, необходимой для производства и в виде тренажера, позволяющего обучать сотрудников на реальном процессе, и в виде справочника по ремонту изделия, и так далее.

Системное проектирование, основанное на моделях MBSE, – это практика разработки набора связанных системных моделей, которые помогают определять, проектировать и документировать разрабатываемую систему. В таком сценарии модель становится основным источником обмена информацией для системных инженеров. При этом значительно сокращается зависимость от необходимости использовать традиционную документацию.

Согласно [67] цель MBSE состоит в том, чтобы создать единую, унифицированную модель системы, из которой могли бы быть сформированы все документы и представления об объекте. Эти документы должны быть непротиворечивыми, согласованными, сгенерированными из «единого источника истины».

Концепция MBSE предполагает объединение в единой модели всех инструментов и баз данных (рис. 1.51).



**Рис. 1.51. Концепция MBSE предполагает объединение в единой модели всех инструментов и баз данных.
Источник: [68]**

Распространение концепции MBSE на все этапы жизненного цикла изделия приводит к концепции MBE (Model Based Enterprise – предприятие, основанное на моделях).

Подчеркнем, что концепция MBE предполагает не просто использование моделей на всех этапах жизненного цикла, что было известно задолго до появления этих концепций, а означает появление унифицированной модели, которая объединяет в едином цифровом пространстве все инструменты и все базы данных в рамках всего предприятия.

То есть устанавливается сеть постоянных соединений между различными элементами общей модели, которые находятся в разных подмоделях и базах данных. Это дает возможность инженерам осуществлять поиск по всем подмоделям унифицированной модели, даже если они находятся в удаленных рабочих группах. Это позволяет бесшовно передавать данные из одного инструмента в другой и синхронизировать все параметры модели по мере развития общей модели, визуализировать процесс совместной работы и отслеживать точки принятия решений на разных этапах проектирования.

Как было отмечено ранее, сложные системы содержат множество взаимодействующих компонентов, которые требуют разных типов моделирования. Некоторые подсистемы целесообразно описывать на базе моделирования непрерывных физических процессов, другие – на базе моделирования дискретных событий. Моделирование может осуществляться в разных временных масштабах. Что еще раз подчеркивает необходимость наличия интегрирующей платформы для организации взаимодействия между отдельными моделями.

MBE/MBSE-подход позволяет улучшить качество проектирования, снижает риск ошибок при внесении изменений, улучшает качество реализации и тестирования системы на этапе, когда еще не все компоненты системы доступны или внедрены, а также облегчает тестирование систем, когда тестируемые подсистемы разнесены географически.

MBE/MBSE-подход позволяет повысить производительность труда команды разработчиков, обеспечить более высокую степень согласования с требованиями различных заинтересованных сторон и, соответственно, более полно учесть потребности клиентов.

Соотношение MBSE, MBE и других понятий, относящихся к проектированию на основе моделей, представлено на рисунке 1.52.

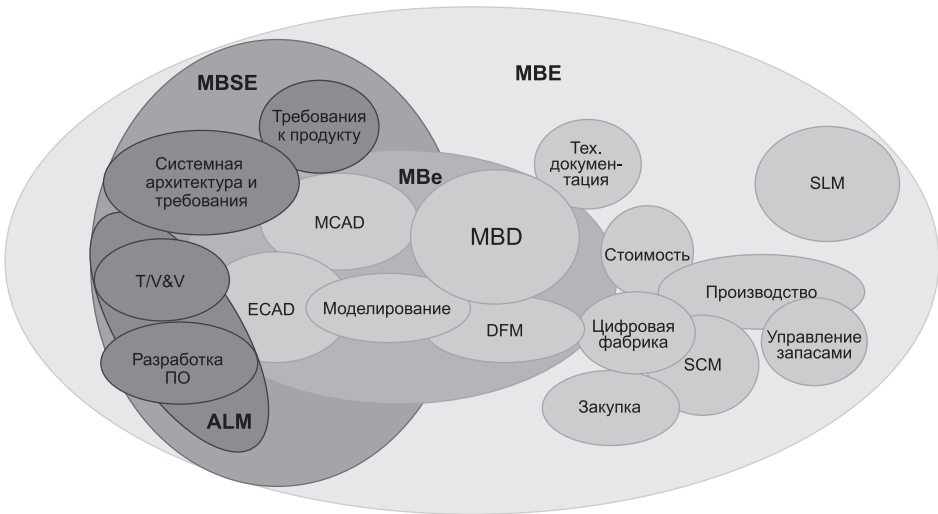


Рис. 1.52. Соотношение основных понятий, имеющих отношение к MBE и MBSE. Источник: CIMdata

Следует отметить, что в последнее время появилось достаточно много аббревиатур, связанных с понятием MBE, и все они имеют общую часть «MB – Model Based» (основанные на моделях): MBSE, MBD, MBe, MBE. Рис. 1.52 позволяет наглядно показать взаимосвязь и отличия этих терминов. На рисунке в неявном виде присутствует понятие времени, в том смысле, что в левой части диаграммы расположен инструментарий, соответствующий начальной стадии жизненного цикла (в основном, средства проектирования), в правой – инструментарий более поздних этапов жизненного цикла (производство и обслуживание). На рисунке представлено множество MBE (Model Based Enterprise) – унифицированная модель уровня предприятия, которая объединяет в едином пространстве все инструменты и все базы данных компании.

Наиболее крупными подмножествами MBE являются: MBSE (системный инжиниринг на основе моделей); MBe (Model-Based engineering) – инжиниринг на основе моделей, в рамках которого используются математические мультимасштабные модели на всех этапах жизненного цикла; ALM (Application Lifecycle Management) – система управления жизненным циклом программных приложений, которая позволяет обеспечить понимание процесса разработки при-

ложений и представить его в качестве одного из бизнес-процессов, что необходимо для автоматизации процесса разработки и интеграции различных инструментов и дает возможность производителям выполнять сбор требований и контроль постоянно растущего объема программного кода, в том числе встроенного в изделия.

Как видно из рисунка, ALM включает в себя (почти полностью) такие подмножества, как «разработка ПО», а также систему тестирования и верификации моделей T/V&V (Test/Validation & Verification).

MBD (Model-Based Definition – определение на основе модели) относится к трехмерным CAD-моделям, которые предоставляют спецификации для компонента или сборки (без дополнительных 2D-чертежей). Эти спецификации содержат описание геометрии изделия, размеры и допуски, спецификации материалов, наборы технических данных и решений.

Пояснения требуют еще некоторые сокращения, используемые на рисунке 1.52. SLM (Service Level Management) – управление уровнем обслуживания, набор инструментов для определения оказываемых услуг, согласования уровней обслуживания (SLA); SCM (Supply Chain Management) – управление цепочками поставок; MCAD (Mechanical CAD) – механический CAD, автоматизированное проектирование механических устройств; ECAD (Electronic CAD) – электронный CAD, система автоматизации проектирования электроники.

DFM (Design for Manufacturing) – комплекс мер, направленных на создание таких конструкций, услуг, процессов или систем, которые позволят производить данный продукт или услугу быстрее, дешевле и качественнее. Цифровая фабрика (Digital Factory) – набор средств управления, базирующихся на использовании технологий моделирования производственных процессов, позволяющий конфигурировать, анализировать, оценивать элементы производственной системы и удобство управления ей на ранней стадии (еще до того, как физическая фабрика будет построена).

Возвращаясь к вышеназванной проблеме возрастания сложности, можно сказать, что модели-ориентированное предприятие (МВЕ) – это также стратегия, позволяющая управлять сложным современным предприятием. Стратегия, которая формирует интегрированную среду коллективной работы, позволяя создавать, управлять и распространять однозначные цифровые определения продуктов в необходимом формате, соответствующем контексту по всему

расширенному предприятию⁴³, для обеспечения быстрого создания и сопровождения продуктов на всех этапах жизненного цикла – от проектирования до эксплуатации и утилизации, обеспечивая максимальное повторное использование данных для всех аспектов разработки, производства, обслуживания и эксплуатации.

Перспективы внедрения MBSE возрастают по мере распространения аддитивного производства, поскольку по мере сокращения производственных ограничений резко увеличиваются возможности для оптимизации изделий.

Разные авторы отмечают, что MBSE является центральной концепцией, на которой базируется построение ЦД, поэтому неслучайно авторы часто цитируемой статьи об архитектуре ЦД [69] поместили инструменты MBSE и MBSE Knowledge Base (базу знаний MBSE) в центр схемы цифрового двойника (рис. 1.53).



Рис. 1.53. Концепция ЦД как концепция, опирающаяся на MBSE-методологию. Источник: Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering

⁴³ Расширенное предприятие включает партнеров, поставщиков и заказчиков.

До внедрения концепции MBSE моделирование очень часто производилось разными малосвязанными командами, что приводило к длинным итерационным циклам согласования и долгим ожиданиям результатов моделирования. На базе единой модели процесс может быть организован намного быстрее за счет интеграции моделирования геометрии изделия, модели физических процессов, расчетов и оптимизации многокомпонентной конструкции.

ЦД как интеграция этапов жизненного цикла изделия

Мы отметили роль цифрового двойника в плане интеграции многочисленных локальных систем моделирования на предприятии. В данном разделе поговорим об интеграции моделей на разных этапах жизненного цикла создания изделия.

Интересно отметить, что эволюция технологии ЦД в рамках истории развития данной технологии и эволюция ЦД в рамках жизненного цикла отдельного изделия имеют общие черты (рис. 1.54).

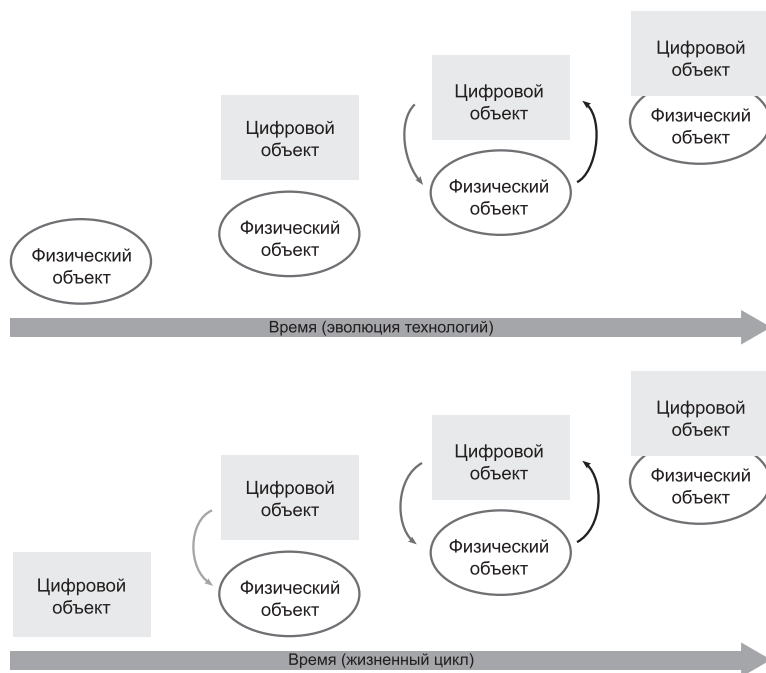


Рис. 1.54. Эволюция технологии ЦД (верхняя часть рисунка) и формирование ЦД на разных этапах жизненного цикла изделия (нижняя часть рисунка). Источник: www.seebo.com, авторы

Действительно, если мы говорим об изделиях промышленного производства, то их жизненный цикл можно представить следующими этапами (рис. 1.54, нижняя часть): сначала создается цифровая копия, потом на ее основе создается физический объект, который начинает обмениваться данными с цифровым; на дальнейших этапах функционирования объекта физический и цифровой двойники работают в связке. Нетрудно заметить, что данная схема имеет сходные черты с ранее рассмотренной диаграммой исторического развития взаимодействия цифровой и физической копии объекта (рис. 1.54, верхняя часть).

Ранее было отмечено (рис. 1.46), что для наглядного рассмотрения этапов жизненного цикла создания изделия в рамках концепции системной инженерии удобно использовать V-диаграммы.

В верхней части рисунка 1.55 со ссылкой на статью от компании Aras corp. показана V-диаграмма, соответствующая идеальной (теоретической) схеме создания изделия, где один этап бесшовно сменяет другой. А в нижней части того же рисунка представлена схема, иллюстрирующая ситуацию, возникающую на практике, когда переход с этапа на этап сопровождается определенными барьерами, которые в нижней части рисунка 1.55 обозначены горизонтальными сплошными линиями.

О каких барьерах идет речь? Например, проект, созданный конструкторами, достигает стадии технологической проработки, и оказывается, что не все то, что задано конструкторами, может быть изготовлено технологами. То есть? после внесения требований технолога, проект требует уточнения и, возможно, перепроектирования.

Таким образом, можно сказать, что в условиях отсутствия единой виртуальной модели продукта, информация о том, как будет функционировать изделие (информация о его поведении) появляется на стадии валидации системы, в самом конце исполнения этапов, обозначенных на правой ветви V-диаграммы.

Более того, «барьеры» могут также наблюдаться и между процессами создания отдельных подсистем. На рисунке 1.55 условно показаны три подсистемы – «механическая», «электрическая» и «программная» (софтверная).

Решением проблемы является переход на процесс создания изделия с использованием концепции MBSE, когда наличие единой модели позволяет проводить мультидисциплинарное мультимас-

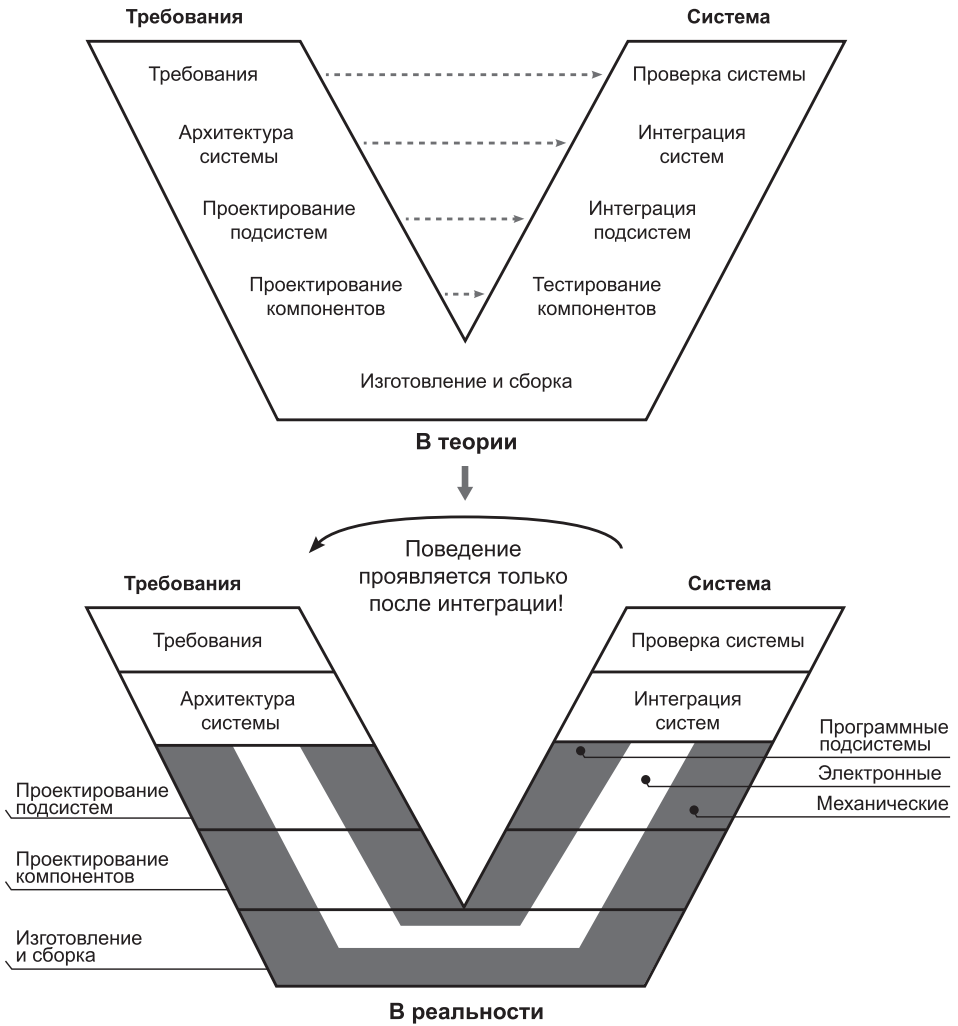


Рис. 1.55. Этапы системного инжиниринга в соответствии с концепцией V-диаграммы в теории и на практике. Источник: Aras corp.

штабное моделирование, позволяющее верифицировать работоспособность изделия на базе виртуальной модели, которая развивается на всех этапах и служит для валидации процесса создания продукта при переходе с одного этапа на другой. Подобный подход позволяет оптимизировать параметры проектируемого изделия таким образом, чтобы они соответствовали требованиям заказчика и вписывались

в ресурсные ограничения, накладываемые на проектируемый объект, а также, чтобы реализовать оптимизацию данных параметров на стадии, предшествующей изготовлению, и стадии интеграции, то есть создать оптимизированную виртуальную модель будущего изделия, удовлетворяющую требованиям заказчика на ранней стадии (рис. 1.56, левая ветвь диаграммы).

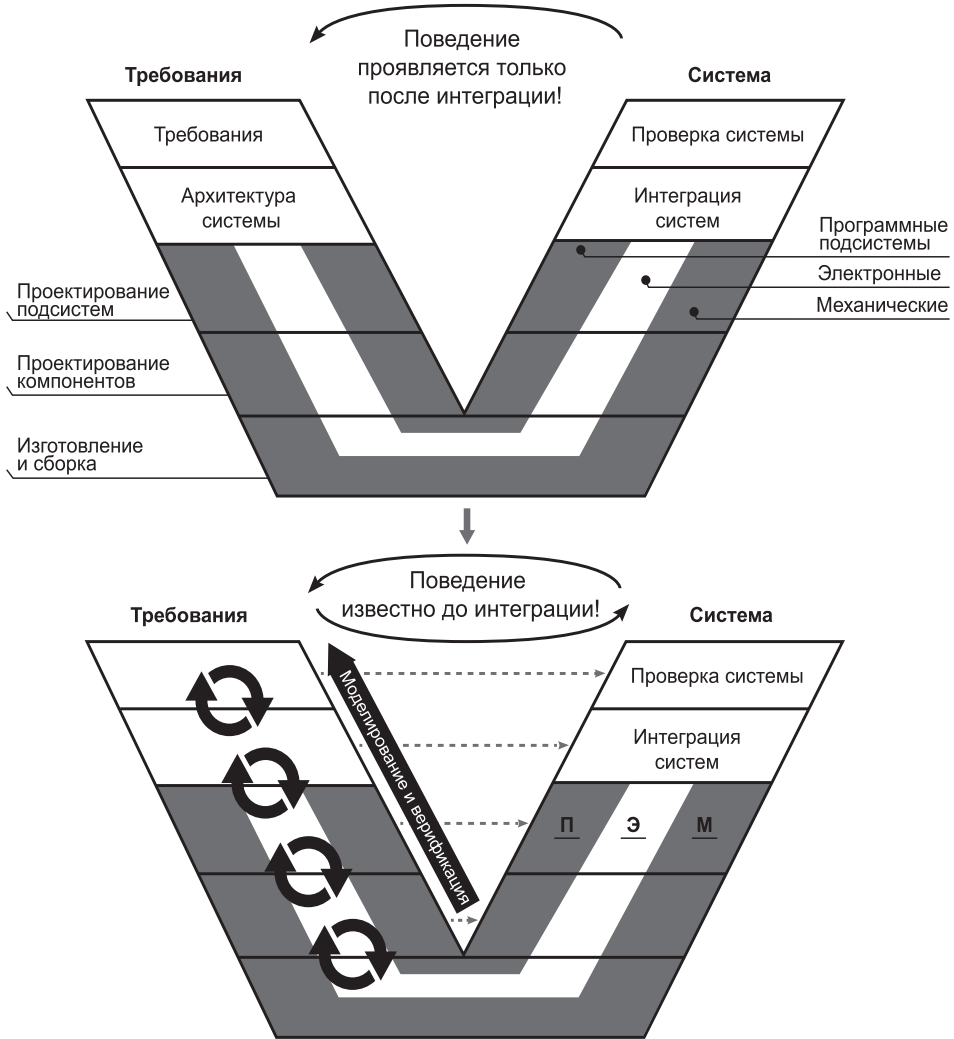


Рис. 1.56. Переход на процесс создания изделия на базе концепции MBSE. Источник: Aras corp.

Цифровой двойник функционирует как связующий элемент, который помогает инженерам, занятым на разных этапах проектирования, а также специалистам различных предметных областей (дисциплин) достичь общего понимания «миров» друг друга, разрушает барьеры между замкнутыми коллективами, работающими над своей проблематикой (механика, программное обеспечение, мехатроника, электроника и т. д.). При таком подходе проблемы обнаруживаются на более ранней стадии, и за счет вовлечения всех заинтересованных сторон и согласования всех «неувязок» можно избежать дорогостоящих ошибок.

В некоторых источниках вышеописанную тенденцию – «перенос части работ по разработке, валидации и верификации создаваемой системы с правой ветви V-диаграммы на левую», графически изображают путем изменения толщины соответствующих ветвей⁴⁴ (рис. 1.57).

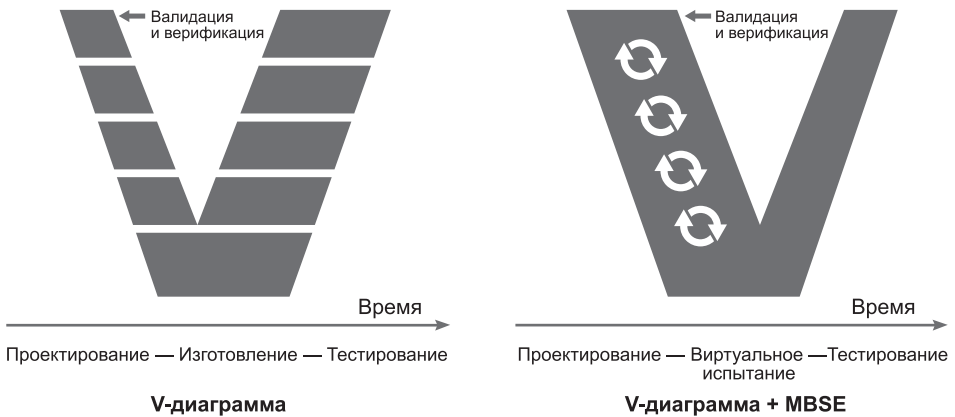


Рис. 1.57. Традиционный процесс (левая часть рисунка) и процесс на базе MBSE-подхода (правая часть). Источник: [70]

На рисунке 1.55–1.57 показано всего пять уровней создания изделия, на практике их больше, и от уровня к уровню количество показателей и ограничений, накладываемых на конструкцию изделия, возрастает. Судить об абсолютных значениях числа данных показателей можно по данным таблицы 1.5, приведенной по публикации профессора А. И. Боровкова [71].

⁴⁴ Здесь вновь речь идет о сдвиге мировой конкуренции на этап проектирования, когда именно на этапе проектирования необходимо внести изменения, чтобы не разносить их по следующим этапам жизненного цикла продукта, когда их стоимость значительно возрастает (прим. научного редактора).

Таблица 1.5

Источник ИЦ СПбПУ

	Уровни	Количество показателей и ограничений
1	Требования заказчика	<10
2	Общие требования к продукту	15
3	Экспертное описание свойств	30
4	Экспертное описание подсистем	60
5	Количественное описание подсистем	100
6	Требования к техническим системам	300
7	Требования к компонентам и архитектуре	3000

Профессор А. И. Боровков вводит понятие матрицы требований/целевых показателей и ресурсных (временных, финансовых, технологических, производственных, экологических и т. д.) ограничений [72]. Данная матрица «предназначена для рациональной «балансировки» большого количества целевых характеристик как объекта в целом, так и его компонентов в отдельности, которые, как правило, конфликтуют между собой как на одном этапе, так и на разных стадиях жизненного цикла» [73].

Важным преимуществом ЦД является то, что он позволяет одновременно эффективно разрабатывать аппаратное и программное обеспечение.

Традиционно аппаратное и программное обеспечение для системы в значительной степени разрабатывается изолированно друг от друга, интеграция этих двух частей происходит на поздней стадии жизненного цикла разработки продукта и обычно приводит к дорогостоящей переработке программного обеспечения.

Чтобы нивелировать данную проблему, разработка программного обеспечения часто начинается только тогда, когда создание аппаратного обеспечения уже достигло высокого уровня готовности, что потенциально увеличивает общее время выхода на рынок. С точки зрения программного обеспечения, виртуальное оборудование цифрового двойника идентично реальному физическому оборудованию. Это означает, что программное обеспечение системы «не видит» разницу между цифровым двойником и его физическим аналогом

и поэтому может быть разработано и введено в эксплуатацию параллельно с реальным аппаратным обеспечением, что приводит к значительному сокращению времени выхода на рынок и затрат на разработку программного обеспечения.

V-диаграмма – это интуитивно понятная и удобная основа для изображения разработки продукта. Однако это линейное представление не отображает обмен информацией в модели-ориентированном предприятии (МВЕ).

В Boeing была поставлена задача разработать новую схему, которая бы лучше отражала возросшую сложность экосистемы МВЕ, представив последнюю как многомерный итеративный процесс, охватывающий эволюцию физического изделия и его виртуальной копии. И такая схема, известная как «ромбовидная схема», была разработана в компании (рис. 1.58, 1.59).

Нижняя часть рисунка 1.58 представляет собой традиционную V-диаграмму, где отображается процесс разработки создания, испытания и обслуживания физического объекта (физический двойник), а в верхней части рисунка представлены этапы создания его виртуальной модели (цифровой двойник).

На каждом участке жизненного цикла создания изделия используются свои цифровые модели, которые отражают соответствующие этапы создания объекта физического и отвечают на вопросы: как создать конкурентоспособное изделие, какие качества изделия востребованы на рынке, как его предлагать на рынке, как спроектировать, изготовить, как провести тестирование и сертификацию, как обслуживать и, наконец, как утилизировать. Данные соответствия изображаются вертикальными линиями (рис. 1.58).

Ромбовидная схема поделена на два больших этапа: на уровне ЦД – это моделирование и виртуальные испытания, а на этапе физического двойника – это проектирование и исполнение (рис. 1.59).

На рисунке 1.59 дано наиболее полное перечисление этапов жизненного цикла изделия и соответствующих моделей, на которых может строиться цифровой двойник. Причем модели, наполняющие ЦД, выходят за рамки инженерной тематики. В частности, первая модель, заложенная в ЦД, – это модель рынка. Действительно, на стадии технико-экономического обоснования необходим анализ того, какой на рынке нужен продукт и как он будет продвигаться. Для этого нужна модель рынка и бизнес-модель продвижения товара на этом рынке.

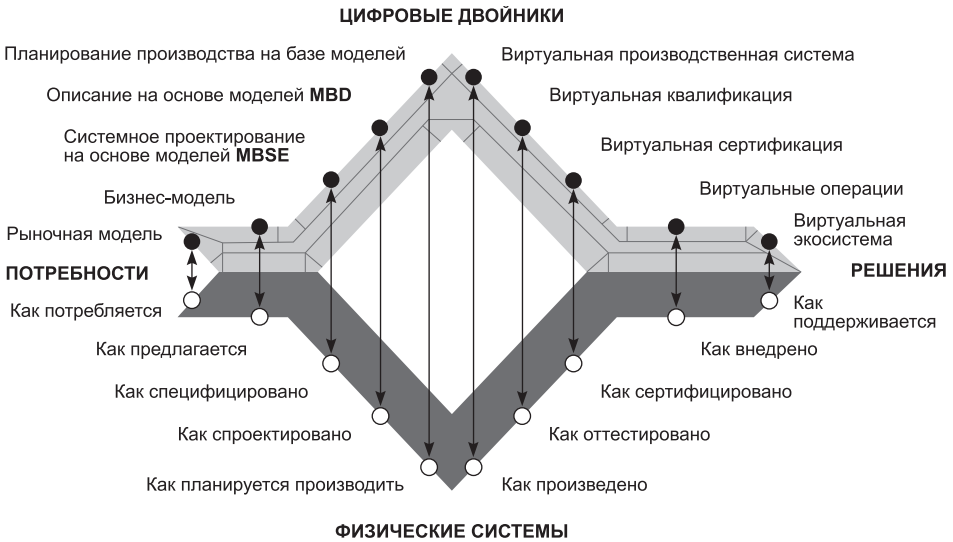


Рис.1. 58 Схема, поясняющая функции цифрового двойника на разных этапах жизненного цикла. Источник: Boeing



Рис. 1.59. Схема, поясняющая основные элементы и функции ЦД на разных этапах жизненного цикла. Источник: Boeing

На этапе разработки концепции нового изделия должны быть решены многие вопросы, включая такие, как анализ рыночной модели,

определение целевого рынка, сравнительный анализ изделий конкурентов, анализ собственных продаж предыдущих моделей, анализ исторических данных, выработка уникального торгового предложения. Разработчикам приходится иметь дело с огромным объемом информации. Чтобы ее использовать, должны быть построены эффективная рыночная модель и бизнес-модель продвижения товара на рынке. Эта модель должна помочь ответить на вопросы маркетинга: как потребляются товары конкурентов, что является наиболее востребованными функциями будущего изделия, и т. п. То есть ЦД может включать в себя, а в некоторых случаях должен включать рыночные, маркетинговые бизнес-модели.

Определив, какое изделие необходимо на рынке, можно представить требования к этому продукту. Имея бизнес-модель, можно сформулировать ограничения по ресурсам, определить, в течение какого срока имеет смысл выводить продукт на рынок при имеющемся уровне конкуренции. Исходя из бизнес-модели, можно определить ограничения по цене и понять, какими характеристиками должно обладать изделие, чтобы быть конкурентоспособным на рынке.

То есть цифровой двойник может быть не только инструментом, который отвечает на вопрос, «как создать изделие, которое отвечает требованиям заказчика?», но и помочь заказчику определить, какие у него должны быть требования к продукту, чтобы этот продукт был конкурентоспособным.

Вопросы восприятия изделия на рынке уже на этой стадии тесно стыкуются с вопросами его дизайна. Именно поэтому виртуальная модель будущего изделия может быть полезна для обсуждения как дизайнерами, так и маркетологами и потенциальными клиентами – участниками фокус-групп.

Стадии, на которой должна быть определена (на уровне физического объекта) спецификация изделия, соответствует этап (на уровне цифрового двойника), где как раз появляется аббревиатура MBSE – термин, который мы подробно рассмотрели выше и описали те типы приложений, на которых MBSE базируется (ALM, MCAD, ECAD и т. п.) (рис. 1.52).

Стадии, на которой должно быть на уровне физического объекта определено, «как спроектировано изделие» (as designed), на уровне цифрового двойника соответствует этап «описание на основе MBD-моделей».

Этапу, на котором должно быть определено, «как произведено изделие» (As-built) на уровне ЦД соответствует этап «виртуальная производственная система».

Этапу, на котором должно быть определено, «как испытано изделие» (as tested), на уровне ЦД соответствует этап «виртуальная квалификация» («virtual qualification»), которую можно определить как альтернативу физическим испытаниям. Как было отмечено ранее, современные методы мультифизического мультимасштабного моделирования могут дать высокоточный анализ работоспособности изделия при широком спектре нагрузений и с учетом анализа влияния микродефектов, что позволяет заменить дорогостоящие натурные испытания, то есть провести виртуальную оценку работоспособности изделия.

Этапы на рисунке 1.59 заканчиваются моделированием стадии поддержки эксплуатации изделия. Очевидно, что здесь не хватает стадии утилизации и переработки, важной стадии с точки зрения создания экологичного производства.

Часто на практике возникает проблема, что для грамотной эффективной утилизации и переработки ценных материалов не хватает информации о том, какие материалы содержатся в продуктах. Эта проблема также может быть решена с помощью ЦД [74]. Цифровой двойник продукта, который выводится из эксплуатации, может предоставить информацию о состоянии своего физического двойника и о том, есть ли у него потенциал для повторного использования.

В центре ромба на диаграмме (рис. 1.59) обозначена так называемая цифровая нить, обеспечивающая непрерывность цифровой среды между стадиями жизненного цикла изделия. Более подробная информация о понятии «цифровая нить» будет представлена позднее в этой главе.

Ромбовидная схема дает достаточно полное представление об этапах построения ЦД, однако она тоже имеет ограничения. На практике для описания возможностей ЦД применяются схемы разной подробности. Например, компания Catapult предлагает структурную схему цифрового двойника на разных этапах жизненного цикла, которая включает как этапы проектирования, так и ключевые технологии построения ЦД (рис. 1.60).

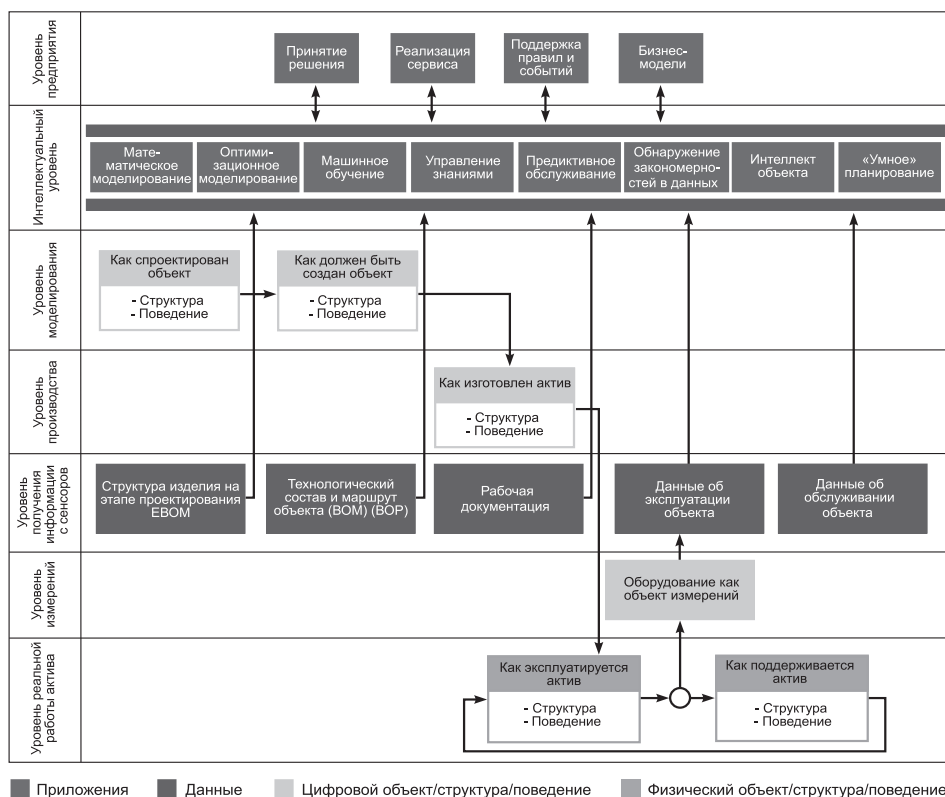


Рис. 1.60. Структурная схема цифрового двойника на разных этапах жизненного цикла. Источник: Catapult

Свой вариант представления схемы ЦД на разных этапах жизненного цикла создания изделия предлагает также компания HCL Technologies. На рисунке 1.61 изображена упрощенная версия схемы⁴⁵. Особенностью данного представления является параллельное отображение основных платформ, на которых строится ЦД (платформы цифровой нити, IoT-платформы, платформы управления цепочкой создания стоимости) на всех этапах жизненного цикла изделия. На рисунке наглядно показано, что полноценный «двойник высокой точности и полноты» формируется только на финальной стадии – на стадии эксплуатации изделия, когда модели предыдущих стадий дополняются моделями и данными этапа эксплуатации.

⁴⁵ На этом рисунке фактически показано то, как цифровой двойник «умнеет» (в нашей интерпретации – за счет обратных связей на этапах эксплуатации, производства и проектирования) (прим. научного редактора).

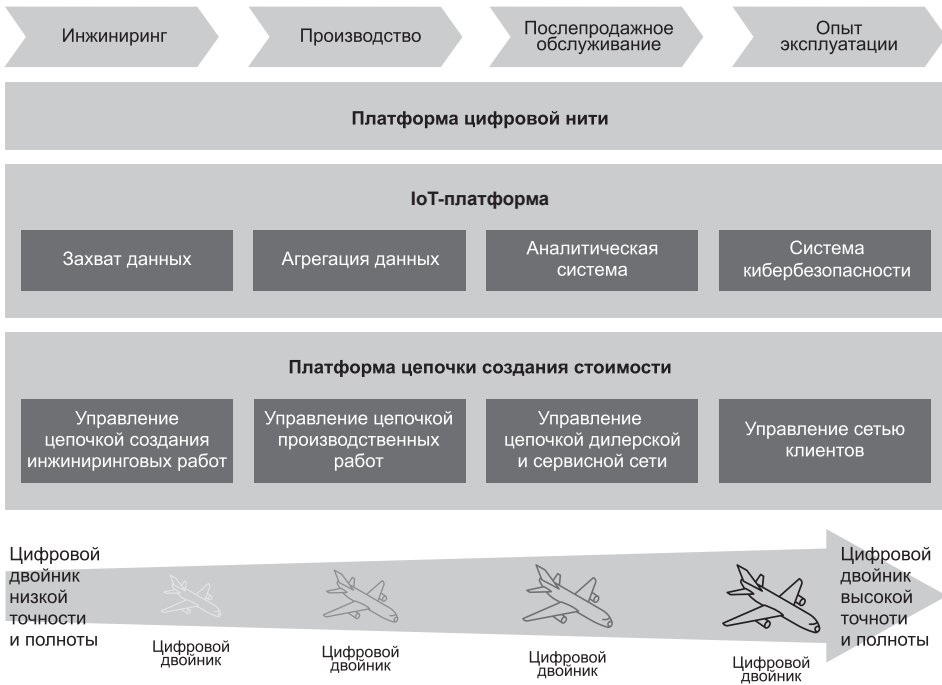


Рис. 1.61. ЦД высокой точности и полноты. Источник: HCL Technologies

Как было отмечено выше, приложения моделирования инженерных подсистем должны быть интегрированы. То же самое справедливо и для платформы управления цепочкой создания стоимости, которая должна опираться на единую цифровую среду, на интегрированные данные по всей сети поставщиков. На практике, однако, ситуация часто выглядит иначе: существует большое число игроков – разработчиков дизайна, производителей оборудования, подрядчиков и т. д. Проблема моделирования и управления данными во всей цепочке создания стоимости оказывается сложной в силу отсутствия интеграции данных. Передача данных осуществляется в сети поставщиков, каждый из которых пользуется своей учетной системой (рис. 1.62).

То есть здесь существует уже описанная проблема отсутствия единой цифровой среды и отсутствия единого «источника истины», которую и призван решить цифровой двойник путем интеграции разрозненных информационных систем.

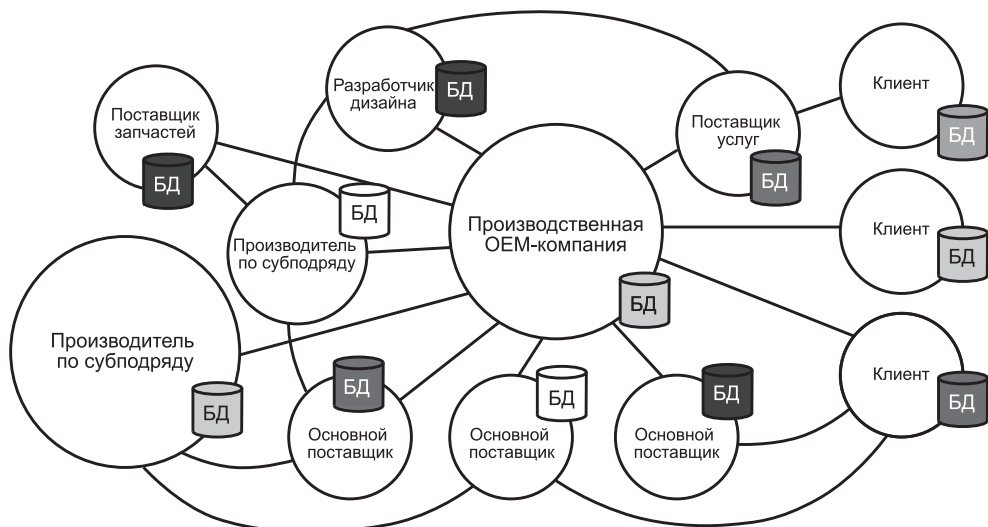


Рис. 1.62. Сложная система взаимоотношений между OEM-производителем и партнерами, возникающая на практике. Источник: [75]

Ценность ЦД состоит в том, что он позволяет привязать информацию к конкретному изделию или продукту, несмотря на то, что эта информация относится к разным этапам формирования изделия и, как правило, содержится в разных учетных системах. Например, информация о тысячах единиц оборудования, участвующих в создании изделия, сведения о материалах, из которых оно создается, и так далее (рис. 1.63).

Говоря о взаимосвязи отдельных этапов создания изделия, важно остановиться на упомянутом на рисунке 1.59 понятии «цифровая нить» (Digital Thread), которое часто упоминается как одна из технологий, лежащих в основе понятия «цифровой двойник».

Приведем несколько определений цифровой нити по мере увеличения подробности формулировки. В краткой формулировке «цифровая нить» – это технология, которая дает возможность преобразования разрозненных данных в достоверную информацию. Часто цифровую нить определяют как средство обеспечения «прослеживаемости» (traceability) причинно-следственных связей в сложных наборах разрозненных данных.

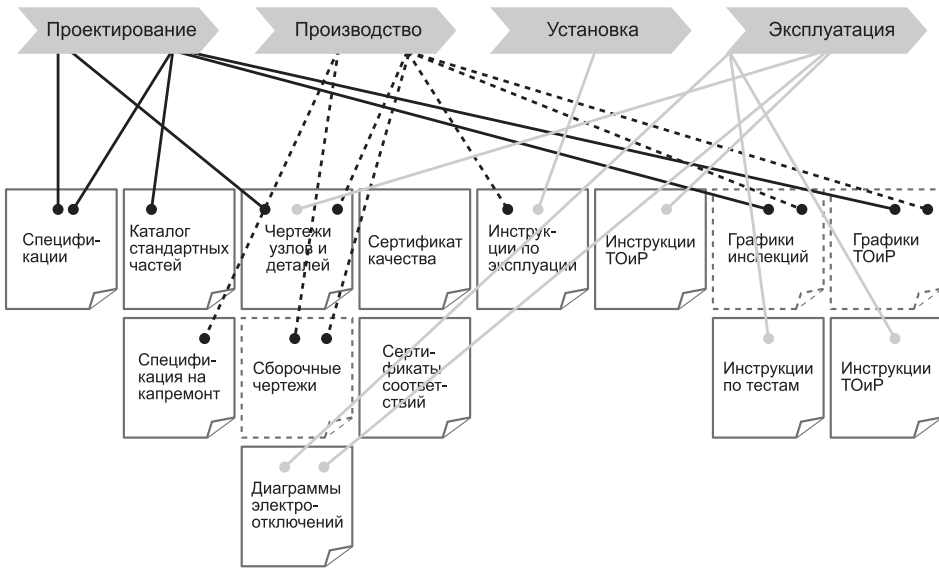


Рис. 1.63. ЦД позволяет привязать большое количество информации из разных учетных систем к конкретному изделию или продукту. Источник: SAP

В чем важность подобной функции? Ошибки в проектировании неизбежны. Для того чтобы минимизировать недочеты, отследить их на ранней стадии, разработчику важно найти причину (ошибочное решение, ненадлежащая поставка, неверный расчет), вычленив решение, которое привело к тому, что конкретный узел, конкретная деталь оказались несоответствующими тем требованиям, которые закладывались в проекте. Неспособность проследить ход принятия решений на стадии создания изделия и в период всего его жизненного цикла оборачивается миллионными потерями, приводит к проблемам нарушения безопасности клиентов, ведет к остановкам работы оборудования, нанесению урона бренду, влечет за собой наступление ответственности за аварии и, как следствие, приводит к убыточности бизнеса.

Цифровая нить призвана помочь избежать перечисленных проблем.

Приведем еще несколько определений понятия «цифровая нить» от высокотехнологичных компаний. Цифровая нить – это фреймворк, реализуемый на уровне предприятия, который упрощает взаимодей-

ствие технических данных, программного обеспечения, информации и знаний в корпоративных системах, позволяет информировать лиц, принимающих решения на протяжении всего жизненного цикла системы. Цифровая нить предоставляет возможность преобразования разрозненных данных в достоверную информацию [76]. Цифровая нить обеспечивает связь элементов модели на протяжении всего жизненного цикла, обеспечивает обновление моделей цифрового двойника на основе данных, собираемых с физических двойников (рис. 1.64) [77].

Согласно трактовке IBM цифровая нить – это набор технологий, основанный на аппарате когнитивной аналитики и семантических сетей, позволяющий интегрировать структурированные и неструктурированные данные, а также обнаруживать и поддерживать семантические и причинно-следственные связи между сущностями, которые они связывают. Этими сущностями могут быть люди, продукты, корпоративные приложения или инструменты проектирования [78].

Создание сложного объекта – это длительный процесс, который содержит целый ряд этапов: проектирование, исполнение, обслуживание, утилизация. Информация о принятых решениях в процессе проектирования может быть распределена по сотням различных систем и моделей, принадлежащих сотням компаний, участвующих в создании, например, таких сложных изделий, как самолет или атомная станция. Цифровая нить позволяет связать решения, которые были найдены и приняты на разных этапах формирования изделия, преодолевая границы этапов, приложений и рабочих групп (рис.1.64).

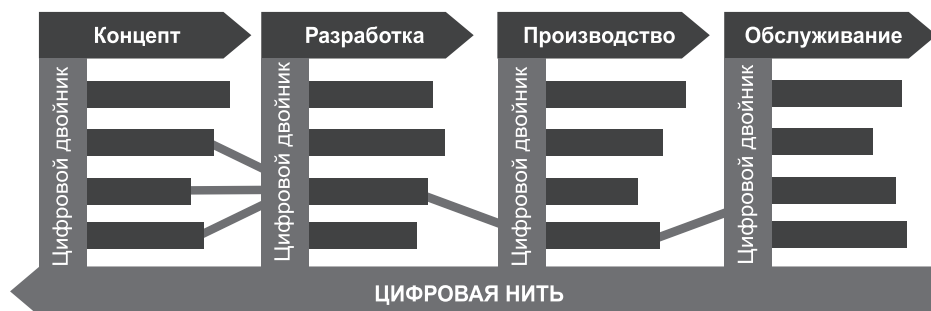


Рис. 1.64. Схема, поясняющая смысл термина «цифровая нить». Источник: IBM

Согласно определению Aras Corp. цифровая нить – это набор мультиверсионных данных (данных, относящихся к разным версиям), содержащий историю результатов и решений и пригодный для осуществления запросов к данным (рис. 1.65).

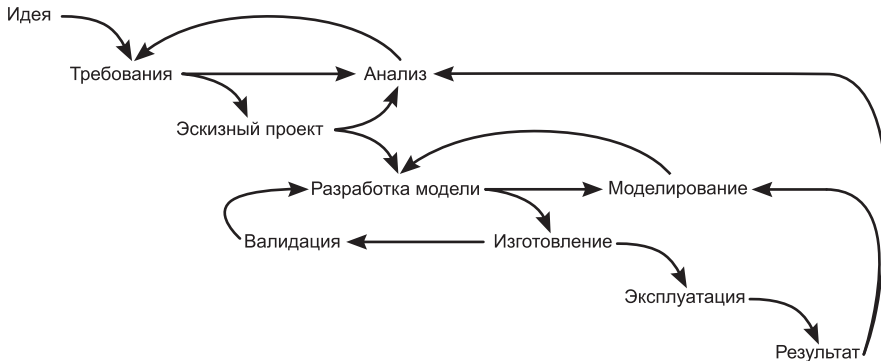


Рис. 1.65. Схема, поясняющая понятие «цифровая нить».
Источник: Aras Corp.

Тот факт, что данные переносятся в электронный вид, еще не означает создания цифровой нити на предприятии. Данные могут храниться на флеш-накопителях, в PDF- или Excel-файлах, в несвязанных между собой приложениях и базах данных, и вся эта совокупность электронных документов не позволяет осуществить прослеживаемость принятия решений по всем изменениям модели создаваемого изделия.

Наличие цифровой нити предполагает не просто перевод документов в электронный вид, но такую организацию хранения информации, когда появляется возможность ответить на вопрос: как принимались решения на разных этапах создания изделия, кто принимал эти решения, на каком наборе фактов они основывались, какие факты были доступны к моменту принятия того или иного решения. Такая организация информации позволяет проконтролировать каждый этап, понимая, какие были данные на входе и выходе, отследить, каковы были долгосрочные последствия принятия того или иного решения.

Большая часть информации, необходимой для создания ЦД, обычно уже имеется на предприятии в рамках стандартного процесса разработки продукта. Процесс реализации ЦД в значительной сте-

пени основан на интеграции этой информации. Цифровой двойник строится на базе многих существующих инструментов проектирования и не заменяет их, а вносит дополнительный слой, где происходит объединение разрозненной информации⁴⁶.

Объединение ЦД в комплексных объектах и их взаимодействие

Инженерные объекты могут существенно различаться по сложности, равно как и цифровые двойники, соответствующие этим объектам. Речь может идти о ЦД отдельной детали, отдельного узла, состоящего из нескольких деталей, сложного инженерного объекта, включающего миллионы деталей. Очевидно, что так же, как сложные физические объекты состоят из отдельных узлов, так и цифровые двойники могут состоять из нескольких ЦД-подсистем. То есть речь идет о иерархии (вложенности) ЦД. В частности, в концепции компании Xmpo [79] принята следующая схема: двойники делятся на двойники минимальной (атомарной) сложности (Atomic Twin), цифровые двойники, которые включают в себя несколько атомарных (Composite Twin), – многокомпонентный двойник, и третий тип (Composite System of Twins) – многокомпонентная система двойников» (рис. 1.66).

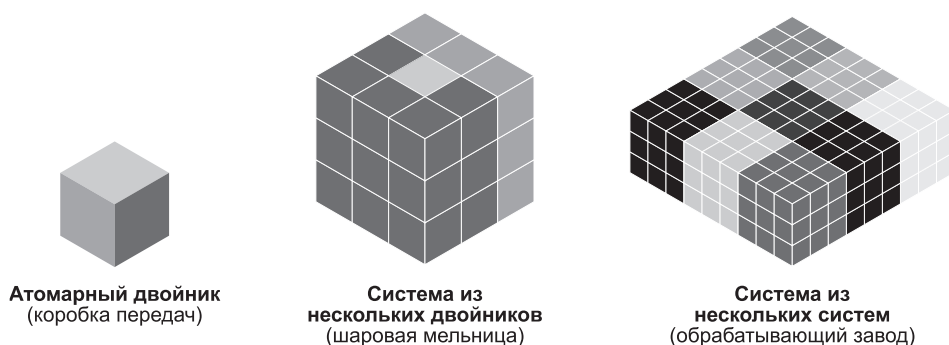


Рис. 1.66. Классификация ЦД по уровню сложности в концепции Xmpo. Источник: [80]

⁴⁶ Можно привести примеры, когда нужны специализированные инструменты, а не уже существующие. В случае с Центром НТИ СПбПУ – это цифровая платформа CML-Bench (прим. научного редактора).

При этом атомарным может быть узел, физически состоящий из многих деталей (то есть атомарным он называется в том смысле, что не состоит из других цифровых двойников).

На рисунке 1.67 показана работа сложного инженерного объекта без использования ЦД, а на рисунке 1.68 – с использованием многокомпонентного ЦД [81].

Цифровой двойник выполняет функцию, аналогичную той, что выполняет прокси-сервер⁴⁷. В частности, он принимает всю совокупность данных от периферийных устройств, применяет шаблоны и структурирует эти данные для дальнейшей передачи приложениям. Иными словами, ЦД является посредником на границе между уровнем внешнего приложения и разнообразными физическими устройствами сложной многокомпонентной системы.

Проксирование данных с помощью цифрового двойника позволяет изолировать два домена (физические устройства и внешние приложения) и развивать их независимо. На практике это дает гибкость, которая позволяет добавлять сложные физические агрегаты и параллельно, независимо от этого процесса, развивать логику приложений.

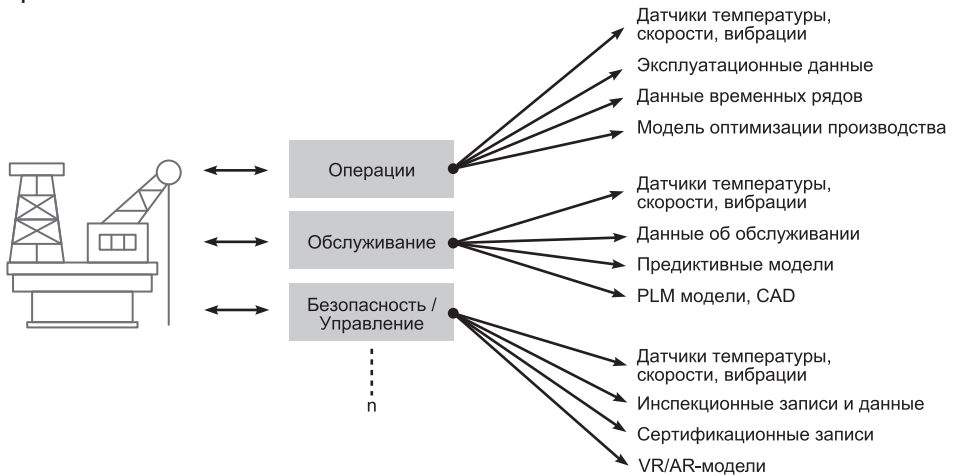


Рис. 1.67. Архитектура решения без использования ЦД.

Источник: Хпро

⁴⁷ Прокси-сервер (от англ. proxy – представитель, уполномоченный; часто просто прокси, сервер-посредник) – промежуточный сервер (комплекс программ) в компьютерных сетях, выполняющий роль посредника между пользователем и целевым сервером (при этом о посредничестве могут как знать, так и не знать обе стороны), позволяющий клиентам как выполнять косвенные запросы (принимая и передавая их через прокси-сервер) к другим сетевым службам, так и получать ответы.



Рис. 1.68. Архитектура решения с использованием ЦД.
Источник: Xmpo

Мы отметили, что цифровые двойники деталей могут объединяться в ЦД узла, а ЦД продуктов – в ЦД процесса⁴⁸. Также отметим, что цифровые двойники могут использоваться несколькими организациями одновременно. Например, ЦД автомобиля может служить нуждам производителей автомобиля и одновременно интересам обслуживающей и страховой компании. Кроме того, взаимодействие ЦД может происходить не только внутри одной организации. Цифровые двойники, принадлежащие разным организациям, могут также общаться между собой.

В частности, специалисты компании АВВ отмечают, что реальная ценность цифрового двойника проявляется именно в том случае, когда он взаимодействует с другими ЦД или программными инструментами (рис. 1.69), преодолевая границы отдельных компаний.

В то время как ЦД на стороне производителя содержит различные модели для проектирования и изготовления продукта, ЦД на стороне клиента содержит модели покупки, установки, эксплуатации, обслуживания и утилизации копий этого продукта. Обмен данными между цифровыми двойниками дополняет картину для обеих сторон.

Например, производитель станков предоставляет оборудование своим клиентам на завод (рис. 1.69), где с помощью этих станков производят автомобили, которые затем поступают в эксплуатацию. Во время эксплуатации автомобиля могут быть выявлены проблемы, которые анализируются с помощью ЦД автомобиля, а наличие связи цифровых двойников по всей цепочке позволяет донести информацию до производителя станка для принятия решений о его совершенствовании.

⁴⁸ ЦД процесса, как правило, относится к процессному производству, которое построено на отдельных узлах (ЦД продуктов).

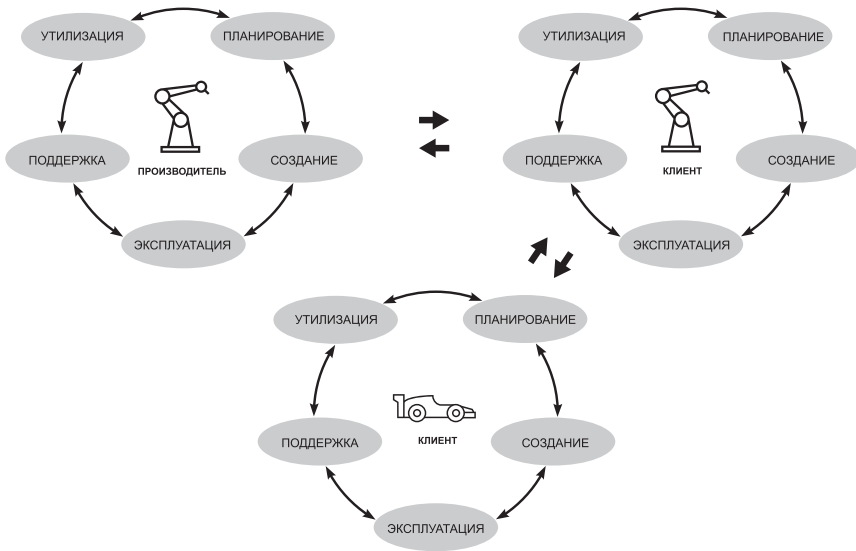


Рис. 1.69. Взаимодействие между ЦД разных организаций.
Источник: ABB

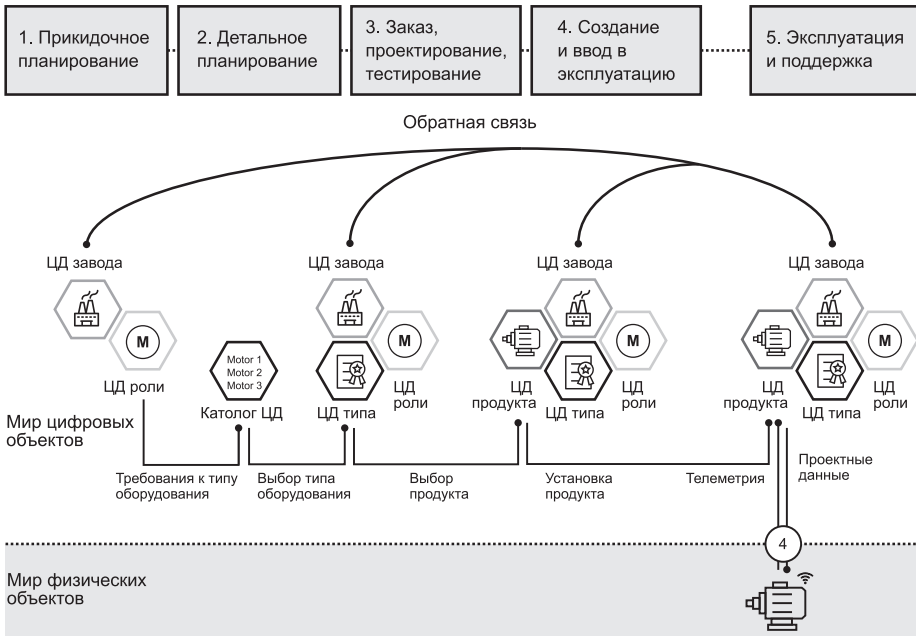


Рис. 1.70. Функции ЦД в концепции «Индустрия 4.0».
Источник: ABB

ЦД связывает информацию с конкретным активом на предприятии, а взаимодействие цифровых двойников позволяет автоматизировать процесс проектирования целого завода. В частности, рисунок 1.70 демонстрирует концепцию АВВ для проектирования, строительства и эксплуатации завода в рамках концепции «Индустрия 4.0» и представляет роль ЦД в каждой фазе [82].

Процесс разбит на этапы – шаги.

Шаг первый (прикидочное предварительное планирование). На базе результатов планирования разрабатывается цифровая модель – «ЦД завода», которая содержит неявные знания и предположения инженеров-проектировщиков. На рисунке показано, как требуемые для производственной необходимости устройства выбираются из цифровой библиотеки ролей объектов, связанной с ЦД завода. Роли абстрактны и аппаратно независимы; на более поздних этапах реальные устройства будут выполнять описанные роли.

Шаг второй. Показаны электронные каталоги производителей доступных типов продуктов, которые могут быть просмотрены через стандартные интерфейсы. Эти каталоги поддерживают ЦД типов продуктов, которые охватывают все аспекты жизненного цикла продукта и реализуют стандартный интерфейс для доступа к данной информации.

Шаг третий. По выбранным типам продуктов выбираются экземпляры продуктов, и все их параметры включаются в ЦД продукта. ЦД продукта связываются с ЦД завода и с ЦД типа продукта. ЦД продукта могут использоваться, например, для моделирования и тестирования на основе информации о топологии завода. Результаты моделирования, опять же, сохраняются в ЦД продукта.

Шаг четвертый. С использованием цифрового двойника экземпляров продуктов заказываются реальные продукты. Информация из ЦД, относящаяся к заказу, передается продавцу продукта. Затем реальный продукт интегрируется в заводскую производственную линию, настраивается, тестируется и вводится в эксплуатацию. На этом этапе ЦД обогащаются информацией об установке и вводе в эксплуатацию, данными о размещении устройств, серийными номерами и т. д.

Шаг пятый. К ЦД отдельных экземпляров продукта, а также к ЦД завода добавляется информация об эксплуатации и обслуживании. Например, параметры состояния работоспособности и количества сбоев.

До сих пор мы делали акцент на стадии проектирования изделия и тестирования. Следует отметить, что на стадии массового изготовления и эксплуатации массово произведенных продуктов ЦД также решает важные задачи.

На рисунке 1.71 показано массовое производство на примере изготовления бульдозера разных моделей для разных клиентов. В рассматриваемом производстве каждый бульдозер снабжен собственным цифровым двойником, и предполагается, что машины будут работать в разных регионах, в специфических условиях и наработать свой особый эксплуатационный опыт, который будет аккумулироваться и анализироваться в соответствующих цифровых двойниках.

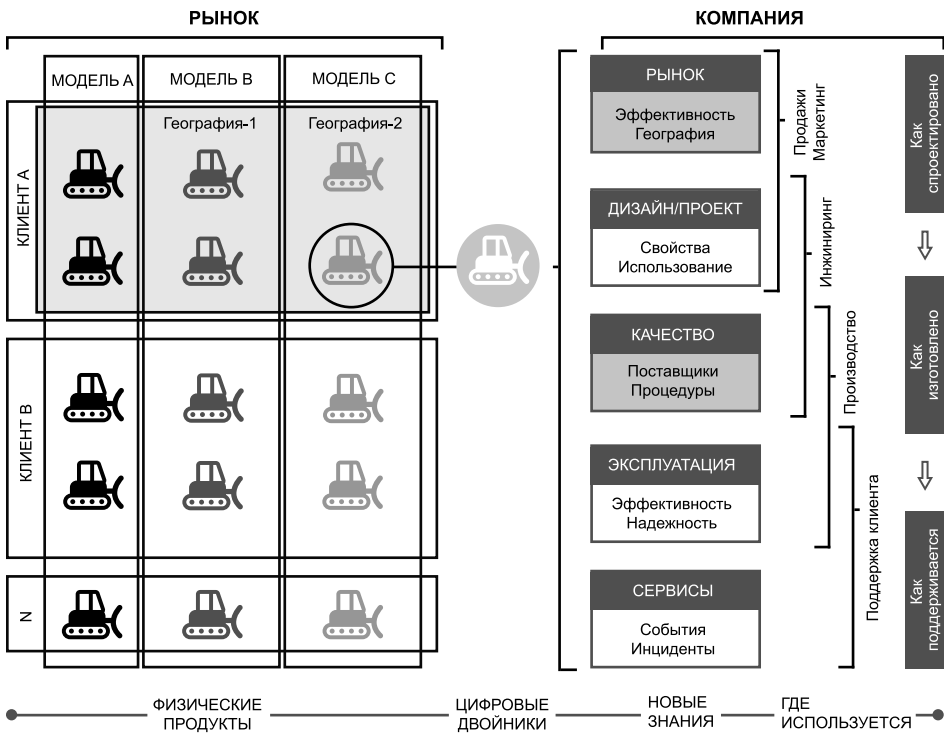


Рис. 1.71. Функции ЦД при наличии двойника у каждого продукта в массовом производстве. Источник: Microsoft

Аналитическая обработка данных каждого из двойников позволит генерировать новые знания, которые помогут оптимизировать изделие на разных этапах его жизненного цикла.

На рисунке 1.72 представлена архитектура решения по оказанию сервисов на базе технологии ЦД применительно к рассмотренному выше примеру серийного производства. На рисунке представлена фаза эксплуатации готового изделия.

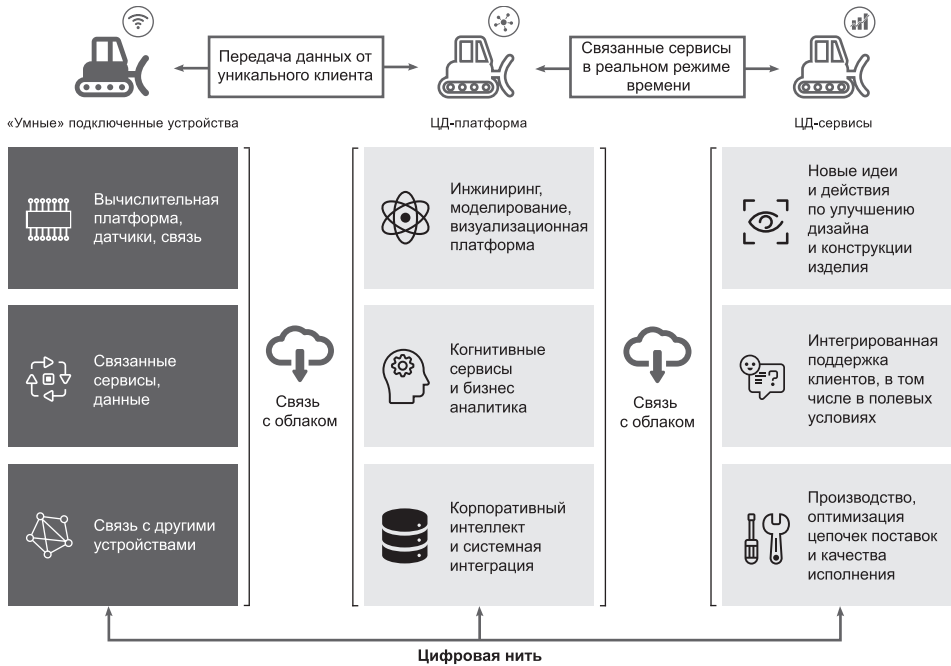


Рис. 1.72. Архитектура решения по оказанию сервисов на базе технологии ЦД. Источник: Microsoft

На схеме выделены три компонента и их составляющие: «умные» подключенные продукты, ЦД платформа и сервисы на базе цифрового двойника.

«Умные» устройства (в данном случае бульдозеры, составляющие парк машин, снабженные соответствующими датчиками и средствами беспроводной связи) обмениваются информацией между собой и посылают данные на платформу цифрового двойника. Данные обрабатываются на базе аналитической платформы, и на основе получаемых знаний формируются сервисы, которые позволяют использовать эти знания для улучшения конструкции и дизайна продукта (в данном случае бульдозера), усовершенствовать машину, оптимизировать ее работу и поддержку этой работы, в том числе в полевых условиях.

Объединяя информацию, представленную на рисунках 1.71 и 1.72, можно сказать, что возможность анализировать данные, аккумулируемые на базе ЦД во время эксплуатации изделия (в разных модификациях машины, в разных условиях эксплуатации и в разных географических регионах), дает уникальную информацию для оптимизации продукта на всех уровнях, позволяет оптимизировать работу всех служб, участвующих в создании изделия, включая подразделения продаж, маркетинга, инжиниринга, производства, а также служб поддержки клиента.

Типы ЦД и их классификация

Классификация ЦД по уровню сложности

Тему классификации ЦД по уровню сложности мы уже затронули в предыдущем параграфе, говоря о терминологии от компании Xtrigo, согласно которой цифровые двойники делятся на двойники атомарной сложности, многокомпонентные двойники и многокомпонентные системы двойников. Однако данная классификация не является единственной и общепринятой. В частности, специалисты General Electric (рис. 1.73) выделяют другие типы двойников, различающиеся по назначению и сложности: ЦД компонента (Component Twin), ЦД актива (Asset Twin), ЦД комплексного объекта (System Unit Twin) и ЦД процесса (Process Twin) [83].

ЦД компонента (например, ЦД ротора, лопатки, зубчатого колеса) может выполнять роль раннего предупреждения о возможном выходе из строя соответствующего компонента.

ЦД актива (например, ЦД турбины, двигателя или насоса) может осуществлять мониторинг и анализировать ход выработки ресурса с целью минимизации его обслуживания. При этом ЦД актива может состоять из нескольких ЦД компонентов.

ЦД комплексного объекта (например, ЦД самолета, электростанции или установки по переработке нефти) может решать задачи оптимизации работы всей системы, исходя из набора определенных KPI⁴⁹, учитывая такие параметры, как доходы предприя-

⁴⁹ Ключевые показатели эффективности (Key Performance Indicators, KPI) – числовые показатели деятельности подразделения (предприятия), которые помогают организации в достижении целей или оптимальности процесса, а именно результативности и эффективности.

тия, эксплуатационные ресурсы агрегата, затраты на его обслуживание и т. п.

Соответственно, ЦД системы может состоять из ЦД активов и ЦД компонентов.

ЦД процесса, как правило, являясь двойником еще более сложного объекта, дает представление о наборе действий или операций, таких как производственный процесс промышленных изделий. Цифровой двойник процесса может быть построен на базе набора двойников активов или систем. В двойнике данного типа центром внимания является не столько оборудование, сколько сам процесс.

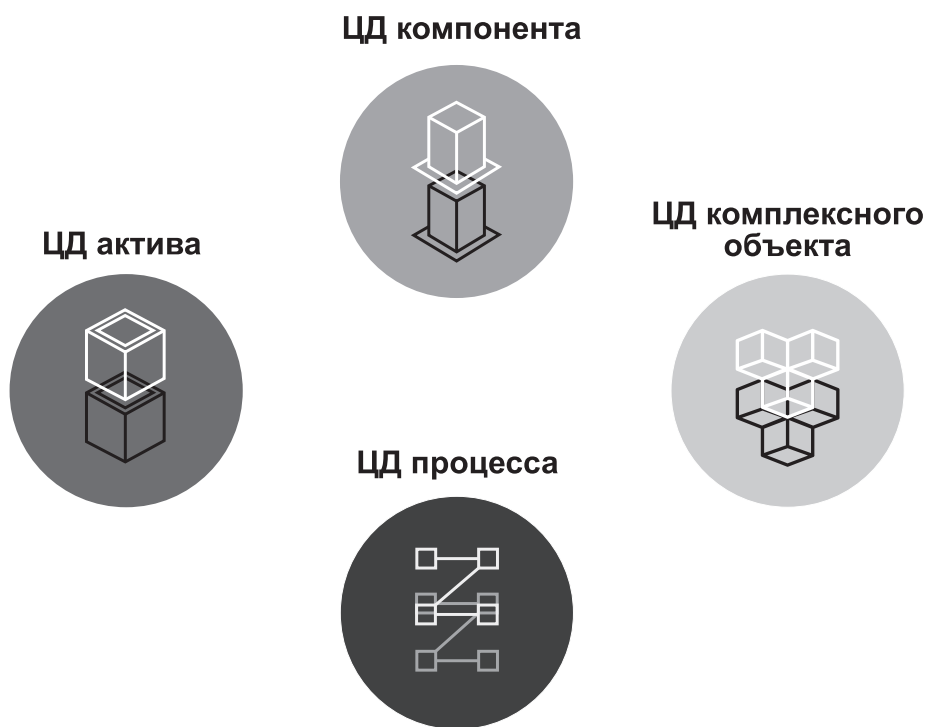


Рис. 1.73. Классификация ЦД по уровню сложности и типу решаемых задач. Источник: General Electric

Термины «ЦД компонента» (Component twin), «ЦД актива» (Asset twin), «ЦД комплексного объекта» (System unit twin), «ЦД процесса» (Process twin) используются в ряде отчетов, но перечисленными двумя системами классификации специалисты не ограничились.

Например, в отчете [84] используются другие термины для похожего типа классификации: «ЦД детали» (Parts Twin), «ЦД изделия/продукта» (Product Twin), «ЦД системы» (System Twin) и «ЦД процесса» (Process Twin). Приведенная ссылка говорит о том, что понятие «ЦД» находится в стадии формирования и унификация производных терминов еще не проведена.

Обозначения для двойников разной сложности варьируются от автора к автору, при этом все сходятся во мнении, что ЦД одного актива – это только первый шаг, который можно продолжить для создания цифрового двойника целого парка активов. ЦД парка машин может стать частью ЦД всей компании, как было отмечено выше. Обсуждаются и более глобальные проекты, как, например, построение «национального цифрового двойника» – National Digital Twin (NDT) – именно так называется проект, разрабатываемый в Великобритании [85]. Согласно концепции, национальный двойник – это не единый ЦД существующей искусственной среды, а интеграция «федераций» цифровых двойников, объединенных общими данными. Причем не все двойники обязательно должны быть подключены к системе, связь устанавливается там, где это дает дополнительную ценность. ЦД могут объединяться различными способами для различных целей. Система может состоять из многочисленных федераций ЦД.

Разработчики концепции отмечают, что проект типа NDT – это перманентный процесс, не имеющий конечной точки, как и процесс развития интернета, он будет становиться все более разнообразным и взаимосвязанным со временем и приобретать все большую ценность для пользователей.

Классификация ЦД по уровню зрелости

Выше мы упоминали об эволюции цифровых двойников с момента появления концепции и до сегодняшнего дня (рис. 1.6). Очевидно, что можно говорить также о развитии (увеличении сложности/зрелости) ЦД на одном предприятии, имея в виду переход от более простых к более сложным решениям.

При этом возникает ряд вопросов, которые мы уже упоминали: можно ли создать цифровой двойник на стадии, когда нет физического двойника, или ЦД появляется только тогда, когда появляется

физическая система, которая сообщает данные о своем состоянии цифровому двойнику?

В самом определении есть некоторое противоречие. С одной стороны, ЦД не является двойником, пока у него нет «двойника» – готового физического прототипа. С другой стороны, цифровой двойник должен существовать на всех этапах жизненного цикла реального изделия (то есть и на стадии его дизайна), – тогда, когда реального продукта еще нет, а он только планируется.

Для того чтобы избежать терминологической путаницы, авторы статьи «Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering» предлагают выделять четыре уровня зрелости ЦД (табл. 1.6) и уточнять, о каком типе двойника идет речь.

Таблица 1.6

Классификация ЦД по уровню зрелости. Источник: [86]

Уровень	Уровень сложности модели	Физический объект	Получение данных от физического двойника	Машинное обучение (предпочтения оператора)	Машинное обучение (система/окружающая среда)
1. Пре-ЦД (Pre-Digital Twin)	Виртуальная модель с акцентом на технологию/снижение технических рисков	Не существует	Не применимо	Нет	Нет
2. ЦД (Digital Twin)	Виртуальная модель физического объекта	Существует	Производительность, статус технического состояния, техническое обслуживание; пакетные обновления	Нет	Нет
3. Адаптивный ЦД (Adaptive Digital Twin)	С адаптивным пользовательским интерфейсом	Существует	Производительность, статус технического состояния, техническое обслуживание; обновления в режиме реального времени	Да	Нет

Уровень	Уровень сложности модели	Физический объект	Получение данных от физического двойника	Машинное обучение (предпочтения оператора)	Машинное обучение (система/окружающая среда)
4. Интеллектуальный ЦД (Intelligent Digital Twin)	С адаптивным пользовательским интерфейсом и с обучением с подкреплением	Существует	Производительность, статус технического состояния, техническое обслуживание, информация об окружающей среде, обновления в режиме пакетных обновлений и в режиме реального времени	Да	Да

Уровень 1. «Предшественник ЦД» (Pre-Digital Twin). Это цифровая модель высокой точности, которая создается до этапа изготовления производства физического изделия – до появления цифровой тени. Другое название ЦД такого типа – «ЦД стадии проектирования», которое уже прижилось в русскоязычных публикациях на тему ЦД.

Уровень 2. ЦД (Digital Twin). Классический ЦД, который появляется на стадии, когда есть пара (цифровой и физический двойники), и, соответственно, цифровая модель уточняется на базе данных цифровой тени.

Уровень 3. Адаптивный цифровой двойник (Adaptive Digital Twin) позволяет изучать предпочтения/приоритеты людей-операторов в разных контекстах, с использованием алгоритма машинного обучения на основе нейронной сети. Модели, используемые в этом ЦД, постоянно обновляются на основе данных, извлекаемых из физического двойника в режиме реального времени. ЦД может поддерживать планирование в реальном времени и принимать решения во время операций, технического обслуживания и поддержки.

Уровень 4. Интеллектуальный ЦД (Intelligent Digital Twin) обладает всеми возможностями ЦД 3-го уровня (включая машинное обучение с учителем⁵⁰), а также обладает способностью машинного обу-

⁵⁰ При обучении с учителем нейронная сеть обучается на размеченном наборе данных и предсказывает ответы, которые используются для оценки точности алгоритма на обучающих данных. При обучении без учителя модель использует неразмеченные данные, из которых алгоритм самостоятельно пытается извлечь признаки и зависимости.

чения без учителя – может распознавать объекты и шаблоны, встречающиеся в операционной среде. ЦД на этом уровне обладает высокой степенью автономии, может анализировать более детальные данные о производительности, обслуживании и работоспособности, полученные от реальных объектов.

Другие виды классификации и обобщенная схема

Существует еще целый ряд работ, в которых авторы пытались уточнить определение ЦД в разных условиях их применения путем введения своих уточняющих определений. Например, согласно публикации [87] цифровые двойники целесообразно разделить на три типа (рис. 1.74):

- цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, DTP);
- цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, DTI);
- агрегированные двойники – DTA-двойники (Digital Twin Aggregate, DTA).

Цифровой двойник-прототип (Digital Twin Prototype, DTP) описывает физический объект, прототипом которого он является, и содержит информацию, необходимую для описания и создания физической версии объекта. Эта информация включает требования к производству, аннотированную трехмерную модель, спецификацию на материалы, процессы, услуги и утилизацию.

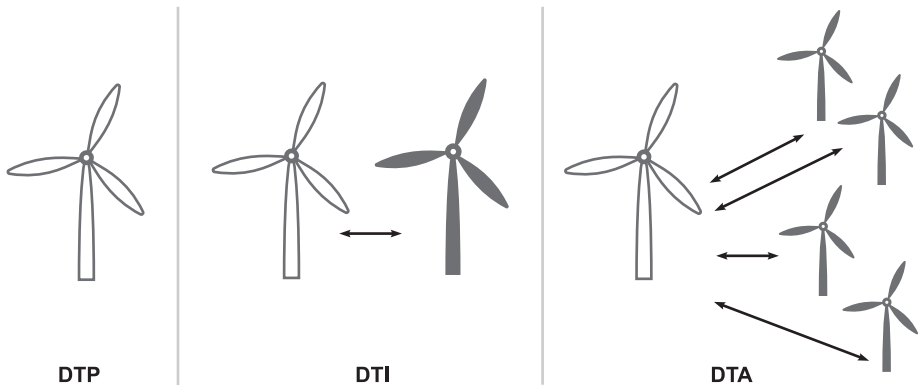


Рис. 1.74. Толкование терминов «DTP», «DTI», «DTA» (контуром показан цифровой двойник, контуром с заливкой – физический). Источник: [88]

Двойники-экземпляры – Digital Twin Instance (DTI), описывают конкретный физический объект, с которым двойник остается связанным на протяжении всего срока службы. Двойники этого типа обычно содержат 3D-модель с общими размерами и допусками, спецификацию на материалы, в которой перечислены текущие и прошлые версии компонентов, спецификацию на процессы с перечислением операций, которые были выполнены при создании этого физического объекта, а также результаты любых тестов на объекте, записи о сервисном обслуживании, включая замену компонентов, операционные показатели, результаты тестов и измерений, полученные от датчиков, текущие и прогнозируемые значения параметров мониторинга.

В отдельную категорию (рис. 1.74) выделяются DTA-двойники (Digital Twin Aggregate, агрегированные двойники), которые определяются как вычислительная система, имеющая доступ ко всем цифровым двойникам-экземплярам и способная посылать им запросы в режиме случайных опросов (например, каково среднее время между сбоями такого-то компонента) или проактивных опросов (например, проверять показания датчиков и делать на основании замеров расчеты и прогнозы).

Наиболее цитируемые определения видов цифровых двойников приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7

Сводные данные о классификации и уточняющих названиях ЦД в разных публикациях. Источник: анализ авторов

Компания	Предложенная классификация ЦД (англоязычные термины)	Предложенная классификация ЦД (русскоязычные термины)	Источник
Классификация по функции	<ul style="list-style-type: none"> • Passive monitoring DT • Interactive DT • Predictive DT 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД пассивного мониторинга • Интерактивный ЦД • Предиктивный ЦД 	[89]
Классификация по типу моделируемого объекта и уровню сложности	<ul style="list-style-type: none"> • Part DT • Product DT • Process DT • System DT 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД детали • ЦД продукта • ЦД процесса • ЦД системы 	[90]
Классификация по типу моделируемого объекта и уровню сложности	<ul style="list-style-type: none"> • Component twin • Asset twin • System/unit twin • Process twin 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД компонента • ЦД актива • ЦД комплексного объекта • ЦД процесса 	[91]

Компания	Предложенная классификация ЦД (англоязычные термины)	Предложенная классификация ЦД (русскоязычные термины)	Источник
Классификация по уровню зрелости	<ul style="list-style-type: none"> • Pre-Digital Twin • Digital Twin • Adaptive Digital Twin • Intelligent Digital Twin 	<ul style="list-style-type: none"> • Пре-ЦД • ЦД • Адаптивный ЦД • Интеллектуальный ЦД 	[92]
Эволюция ЦД	<ul style="list-style-type: none"> • Status Only DT • Simulation DT • Operational DT • Operational DT with Events • Operational DT + Simulation DT. • DT with Business Models • Autonomous DT 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД «только статус» • ЦД на основе мат. моделирования • Операционные ЦД • Операционные ЦД с событиями • Операционные ЦД + ЦД на основе мат. моделирования • ЦД с бизнес-моделями • Автономные ЦД 	[93]
Классификация по технологиям моделирования	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation-Based DT • Data-based DT (Analytics DT) • Hybrid DT 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД, основанный на мат. моделировании • ЦД, основанный на данных • Гибридный ЦД 	Доклад ANSYS
Классификация по используемой технологии	<ul style="list-style-type: none"> • Digital Twin Prototype, DTP • Digital Twin Instance DTI • Digital Twin Aggregate DTA 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД-прототипы • ЦД-экземпляры • Агрегированные ЦД 	[94]
Варианты цифровых двойников конструкции с учетом и без учета технологической прочности	<ul style="list-style-type: none"> • DT1 • DT2 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД1 (ЦД конструкции, учитывающий всю геометрию изделия с учетом всех используемых материалов и соединений) • ЦД2 (ЦД, учитывающий все технологические операции) 	[95]
Варианты ЦД по назначению	<ul style="list-style-type: none"> • Reliability and integrity DT • Process DT • Control and safety system DT 	<ul style="list-style-type: none"> • ЦД надежности и целостности • ЦД процессов • ЦД систем управления и безопасности 	[96]

Трактовка термина «ЦД» в разных отраслях экономики

До сих пор мы рассматривали понятие ЦД применительно к промышленным изделиям, однако упомянули, что трактовка термина расширяется. Действительно, термин используется в разных отраслях и в каждой приобретает свою специфику.

В статье [97] отмечается, что технология ЦД может использоваться в моделировании поведения человека как получателя определенных услуг. Подобные проекты реализуются в ритейле, в финансовых услугах, в страховании, где можно создавать персонализированные профили отдельных лиц и анализировать целесообразность решений, которые эти лица принимают в отношении своих финансов.

Огромное значение оказало появление технологий ЦД в архитектурно-строительном проектировании. Только с использованием технологии ЦД возможно построение «Умного дома» в полном его смысле, включая не только цифровое проектирование, эксплуатацию в реальном времени, но и управление интеллектуальной недвижимостью как активом.

Понятие ЦД достаточно широко вошло в медицинскую сферу и в связи с созданием цифровых моделей отдельных органов (например, цифровой двойник сердца), и в связи с 3D-печатью аналогов органов, и в связи со все большим использованием инженерных подходов, технологий и терминологии к планированию и проведению операций. Персонализированные медицинские услуги на основе анализа данных о пациенте имеют много общего с технологией ЦД, используемой для создания промышленных изделий и процессов. Цифровая тень пациента позволяет создавать аналитические модели и прогнозировать его состояние, планировать, когда лучше произвести профилактический осмотр (до того как в организме произойдут серьезные повреждения). Концепция та же, как и в случае с обслуживанием «организма» искусственной машины.

Применительно к людям, ЦД – это формирующаяся технология, которая позволяет моделировать системы и подсистемы человеческого организма, уточнять данные модели на основе сбора биофизических данных и поведенческой информации, прогнозировать функционирование данных систем и выдавать рекомендации по их профилактике и лечению.

Завершая раздел, в котором мы говорили о классификациях и сферах применения ЦД, следует свести вместе различные направления, по которым можно классифицировать ЦД (рис. 1.75).

Как видно из рисунка, под технологией ЦД может подразумеваться широкий спектр решений, варьируемый по сложности, зрелости, набору используемых технологий и стоимости решения.

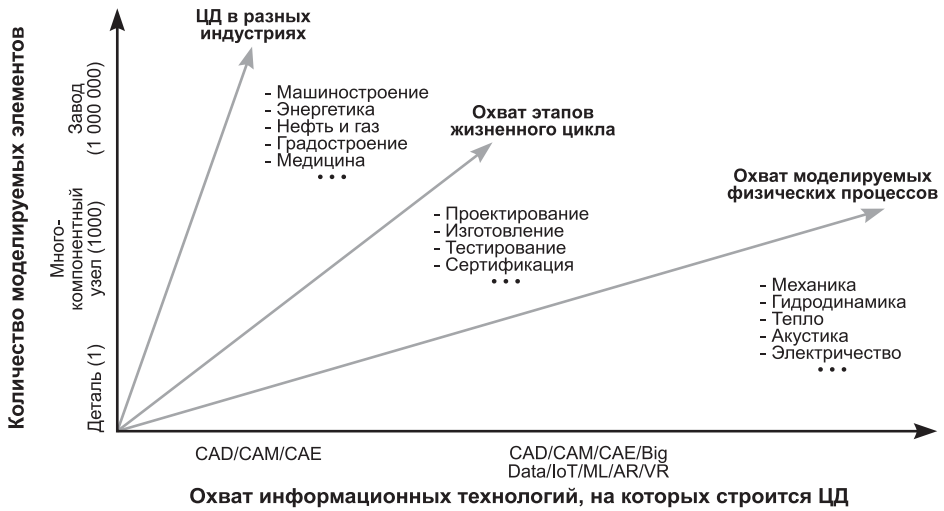


Рис. 1.75. Спектр ЦД решений и основные направления классификации. Источник: анализ авторов

Границы восприятия термина «ЦД» в профессиональном сообществе

Как было отмечено в начале первой главы, ЦД трактуется по-разному в разных профессиональных сообществах, которым отнюдь не всегда удастся прийти к консенсусу. В этих условиях достаточно уместным оказался статистический подход при выработке определения ЦД.

Действительно, в условиях, когда имеется достаточно много определений термина ЦД, интересно проанализировать, как воспринимается термин в профессиональном сообществе, насколько размыты границы понятия, в чем сходится большинство экспертов, какие они выделяют значимые характеристики обсуждаемого понятия.

Пытаясь ответить на данный вопрос, группа производственных исследовательских центров из Великобритании – High Value Manufacturing Catapult (HVM Catapult), в 2018 г. опубликовала исследование, в котором попыталась установить границы понятия ЦД [98]. Было опрошено 150 инженеров из HVM Catapult и смежных компаний, а также проведен онлайн-опрос. Около 80% опрошенных смогли сформулировать свое представление о том, что

такое ЦД, однако, как оказалось, консенсуса по этому вопросу не существует (рис.1.76).

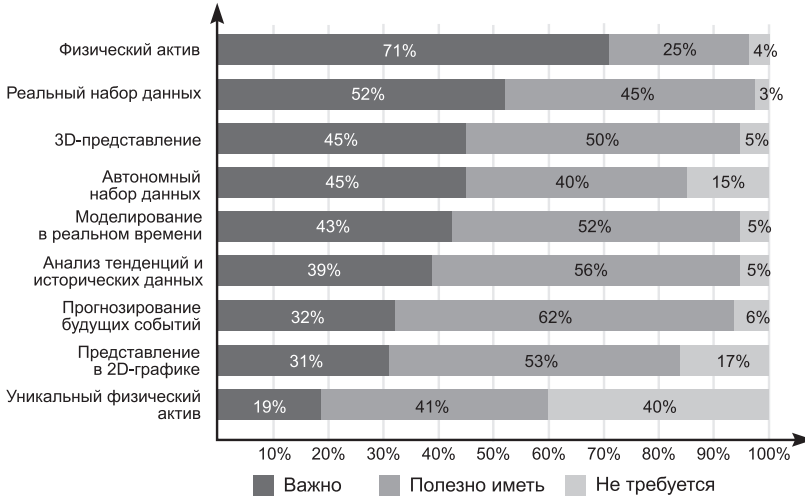


Рис. 1.76. Распределение ответов на вопрос: «Какие компоненты, на ваш взгляд, должны входить в понятие «цифровой двойник»?» Источник: HVM Catapult

Как следует из рисунка 1.76, большинство респондентов (71%) связывают понятие «ЦД» с наличием физического объекта/актива. Этот вопрос задан авторами исследования неслучайно, действительно, в большинстве определений ЦД речь идет о паре: «виртуальный объект и физический», казалось бы, нет физического двойника, нет и понятия ЦД. Однако во всех источниках, где дается толкование цифрового двойника, говорится, что ЦД должен отображать все этапы жизненного цикла физического изделия – от его проектирования до утилизации, следовательно, ЦД должен существовать в том числе и на этапе проектирования, когда физического изделия еще не существует. Этот вопрос становится критичным для аналитиков, когда речь заходит об оценке объема рынка ЦД и определении его границ. В последнее время появился ряд исследований, где предлагаются количественные оценки рынка ЦД. И здесь важно понять, какие проекты могут быть учтены при подсчете объема рынка ЦД, а какие нет.

Неслучайно также в опросном листе (рис. 1.76) присутствует пункт, связанный с наличием «уникального физического актива». Во многих

определениях ЦД говорится о том, что именно наличие физического двойника (который определяет уникальные условия эксплуатации изделия, передает реальную историю обслуживания и ремонтов) определяет понятие ЦД. Это очевидно, когда мы говорим о стадии эксплуатации изделий, каждое из которых снабжено уникальным двойником. А если мы говорим об отработке нового технологического процесса? Например, моделируем процесс точечной сварки, создаем математическую модель процесса формирования литого ядра. При этом очевидно, что каждая конкретная сварная точка не имеет своего двойника на этапе жизненного цикла изделия, модель относится к процессу. Как было отмечено ранее, целый ряд авторов принимают термин «ЦД процесса», хотя он, как правило, не имеет отношения к связке «модель – уникальный физический объект» на этапе всего жизненного цикла изделия. Тем не менее, как следует из опросника, 19% специалистов считают, что наличие уникального физического объекта – это обязательный признак, чтобы говорить о решении как о решении на базе ЦД.

Показательным является и вопрос об обязательности присутствия 3D-модели. Подчас разработчики предиктивной аналитики используют только цифровую тень и пытаются строить модель, не увязывая ее с данными, полученными с помощью CAD/CAE (этапа проектирования). Такая интеграция представляется им слишком сложной или дорогой. Очень часто такие проекты именуется именно проектами по созданию ЦД, несмотря на то, что ни 3D CAD, ни моделирование физических процессов в этой модели не используются.

Почти половина – 45%, отметили наличие 3D-модели как необходимый, определяющий фактор.

В принципе, причины разных мнений понятны: те, кто занимается созданием моделей на стадии проектирования и используют CAD-, CAM-, CAE-модели, считают, что цифровой двойник не существует без 3D-модели и моделирования физических процессов, те же, кто концентрируется на статистической обработке данных, получаемых с датчиков, и занимается задачами поддержки обслуживания и ремонта, подчас говорят о том, что для их задач необязательно стыковать получаемые с датчиков данные с результатами моделирования физических процессов, поскольку это слишком усложняет задачу.

Представляет также интерес распределение ответов респондентов на вопросы, представленные на рис. 1.77, где, по сути, даны разные определения ЦД.



Рис. 1.77. Распределение ответов респондентов (в %) на вопрос: «Что из перечисленного лучше всего описывает ЦД?» Источник: HVM Catapult

Согласно диаграмме, наибольшее число голосов получила формулировка «виртуальная копия физического объекта, которая используется для мониторинга работы этого объекта и оценки его производительности». Отметим, что данная формулировка в большей степени относится к стадии эксплуатации, чем к разработке изделия.

Значительно меньшее число респондентов (34%) проголосовало за определение «3D модель, используемая как виртуальное представление продукта на стадии его дизайна и моделирования», которое относится к стадии проектирования.

На рисунке 1.78 представлено распределение респондентов (в процентах) по ответам на вопрос: «На каких этапах жизненного цикла продукта, по вашему мнению, цифровой двойник представляет наибольшую ценность?»

Как следует из рисунка 1.78 большинство респондентов отметило, что ЦД, прежде всего, полезен для решения такой задачи, как «Техническое обслуживание, ремонт и эксплуатация». То есть само понятие ЦД опрошенные специалисты в большей степени связывают со стадией эксплуатации уже спроектированного изделия.

Полезно дополнить вышеприведенные исследования опросом, проведенным компанией LNS Research. Его результаты можно найти, например, в статье «Digital Twin for Manufacturing» на сайте Dassault Systemes [99]. В опросе исследовали, какие подразделения чаще всего являются собственниками ЦД.



Рис. 1.78. Распределение респондентов (%) по ответам на вопрос: «На каких этапах жизненного цикла продукта цифровой двойник представляет наибольшую ценность?»
Источник: HVM Catapult

Очевидно, что собственники влияют на функциональность разрабатываемого инструмента. Согласно опросу чаще всего (33%) собственниками ЦД являются производственные подразделения, на втором месте (20%) – подразделения, которые занимаются организацией цепочек поставок, и лишь на третьем месте (16%) – инженерные подразделения. Исходя из данной статистики, авторы аналитического исследования делают вывод, что на опрашиваемых предприятиях центр внимания сосредоточен скорее на клиентах, чем на внутренних подразделениях, занятых разработкой.

Глава 2. Рынок цифровых двойников

ЦД на пике завышенных ожиданий

В последние два-три года мы наблюдаем всплеск интереса к теме «цифровые двойники». Аналитики единодушно констатируют высокие темпы роста рынка ЦД. Согласно результатам опроса респондентов, приведенного в отчете «Рынок цифровых двойников, структурированный по типу технологий, решений, приложений и отраслей 2020–2025», опубликованном в марте 2020 г. [100], 89% всех IoT-платформ будут применять ЦД к 2025 г., а к 2027 г. ЦД станет стандартной функцией IoT-решений. 36% руководителей из разных отраслей отмечают выгоду от применения ЦД, а 53% из них планируют внедрить ЦД к 2028 г.

По данным отчета Credence Research (Credenseresearch.com), опубликованного в ноябре 2019 г., мировой рынок ЦД составлял 3,76 млрд долл. в 2018 г. и достигнет 57,38 млрд долл. к 2027 г., то есть вырастет более чем в 15 раз [101].

Это крайне высокие показатели, особенно на фоне незначительного роста общего ИТ-рынка, который, согласно прогнозам Gartner, в 2020 г. увеличится менее чем на 4%⁵¹.

Gartner назвал ЦД одним из десяти главных стратегических технологических трендов на 2017 г. Цифровые двойники также заняли в списке Gartner верхнюю строчку в десятке стратегических технологий на 2019 г. [102], где аналитическая компания выделяет три направления – «умные», «цифровые», «распределенные» (рис. 2.1).

В первой категории («умные») отмечены автономные вещи, (autonomous things), дополненная аналитика⁵² (augmented analytics) и разработка, основанная на ИИ (AI⁵³ driven development). Во второй («цифровые») – заявлены цифровые двойники, периферийные

⁵¹ Книга была написана в феврале 2020 г., до падения цен на нефть, объявления эпидемии коронавируса и начала глобальной рецессии. В апреле 2020 г., на момент редактирования книги, экономическая ситуация изменилась. По данным Reuters, кризис в 2020 г. будет сопоставим с рецессиями 1982 и 2009 г., что затормозит в том числе и ИТ-рынок (прим. научного редактора).

⁵² Автоматизирует анализ данных, используя машинное обучение и обработку естественного языка для автоматизации подготовки данных и обмена данными.

⁵³ Искусственный интеллект (ИИ, artificial intelligence, AI).

вычисления и иммерсивные технологии, в третьей («распределенные») – блокчейн и «умные» пространства⁵⁴.



Рис. 2.1. Десять главных стратегических технологических трендов на 2019 г. Источник: Gartner

Хотя ЦД отмечен на рисунке как один из нескольких трендов, заметим, что большинство из показанных на рисунке технологий являются либо сопутствующими, либо используются для создания решений класса ЦД.

Резкий рост интереса к теме ЦД в 2017–2019 гг. иллюстрирует и число научных публикаций по теме «ЦД в инжиниринге» (рис. 2.2).

Термин ЦД одновременно становится все более популярным среди широкой аудитории интернет-пользователей, о чем можно судить по числу поисковых запросов. Согласно Google Trends популярность запросов «Digital Twins» за последние 5 лет выросла в несколько раз, в то время как популярность запросов «Digital shadow» практически неизменна (рис. 2.3).

⁵⁴ Физическая среда, дополненная «умными» технологиями, которые доступны с помощью датчиков и интерфейсов, позволяет людям удобно взаимодействовать с технологическими системами. «Умный» дом – пример «умного» пространства, такие же «умные» зоны могут быть оборудованы и в общественных местах в аэропорту, в госпитале и т. п.

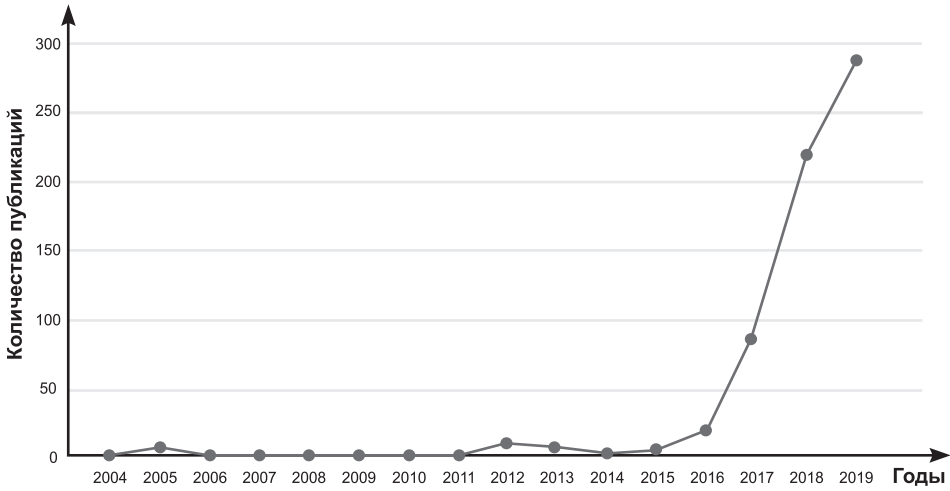


Рис. 2.2. Статистика по числу научных публикаций по базе данных Scopus. Источник: [103] (2019 г., консервативный прогноз по состоянию на июль 2019 г.)

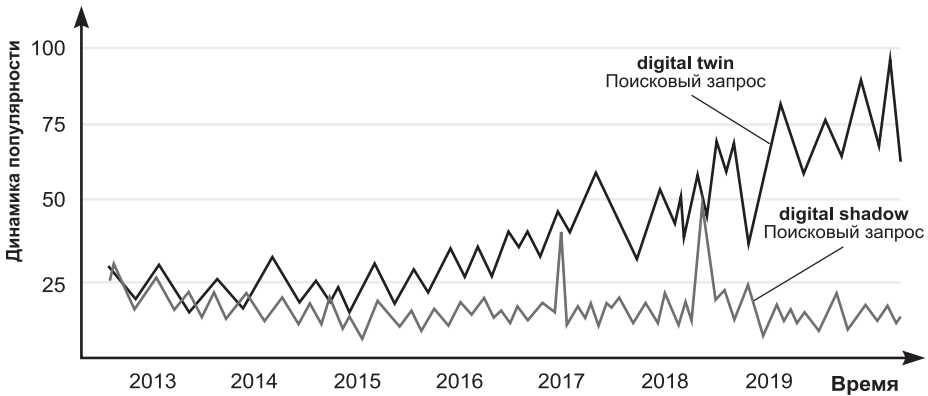


Рис. 2.3. Динамика популярности поисковых запросов «Digital Twin» и «Digital Shadow» в мире. Источник: Google trends, декабрь 2019 г.

Подобный всплеск интереса к теме ЦД позволил аналитической компании Gartner показать в 2018 и 2019 г. технологию на вершине так называемого цикла ажиотажа (рис. 2.4–2.5).

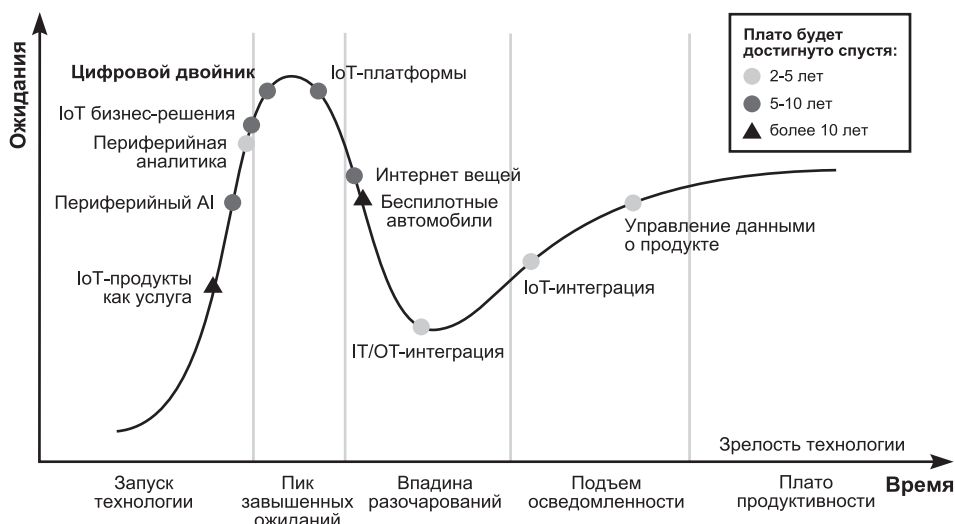


Рис. 2.4. «Цикл ажиотажа» Gartner в отношении ряда технологий, связанных с ЦД по состоянию на июль 2018 г. Источник: Gartner, 2018 г.

Напомним, что «Цикл ажиотажа» Gartner отражает предположение, что новая технология испытывает стандартные фазы в своем развитии: «Запуск» – стадия появления технологии и начала проявления к ней интереса сообщества. Затем наступает так называемый «пик завышенных ожиданий» – стадия, на которой общественность и пресса обращают максимальное внимание на технологию и начинают возлагать на нее чрезмерно большие надежды. Это именно та фаза, к которой Gartner отнесла технологию ЦД в 2018 и 2019 г. Далее следует стадия – «впадина разочарований». Она возникает, когда пользователи выясняют, что надежды, которые возлагались на технологию, во многом не оправдались, поскольку специалистов, умеющих доказать преимущества технологии, еще мало, а массовых внедрений нет. Следующая стадия – «подъем осведомленности», наступает по мере того, как люди адаптируются к новации, узнают о ее успешном применении. И, наконец, так называемое «плато продуктивности» – этап, на котором технология становится стабильной и широко применяемой.

Как следует из представленных рисунков, цифровой двойник вышел на пик популярности, но до плато продуктивности ему еще осталось от 5 до 10 лет, и до этого времени технология должна пройти

«впадину разочарований» – период, когда маркетинговая поддержка может сильно уменьшиться.

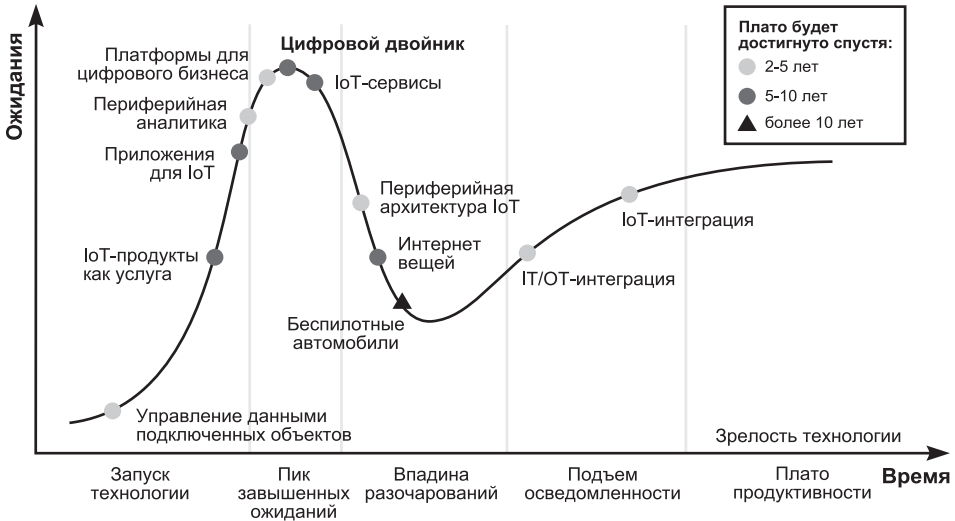


Рис. 2.5. «Цикл ажиотажа» Gartner в отношении некоторых технологий, связанных с технологией ЦД, по состоянию на июль 2019 г. Источник: Gartner, 2019 г.

Наряду с ЦД на кривой ажиотажа показан еще ряд технологий, которые так или иначе связаны с цифровыми двойниками, а некоторые могут использоваться при создании решений класса ЦД. Интересно отметить, что на подъеме в стадию «плато продуктивности» (рис. 2.5) отмечена интеграция OT/IT. Речь идет об интеграции между операционными технологиями OT (Operational Technologies), которые охватывают автоматизацию производства, мониторинг активов и т. д., где генерируются данные, и информационными технологиями IT (Information Technologies), которые охватывают автоматизацию бизнес-процессов, офисов, корпоративных, а также мобильных приложений и т. д., где данные потребляются. Этот факт, в частности, отмечают авторы, исследующие тенденции развития рынка ЦД [104], полагая, что в перспективе цифровой двойник станет интеграционной платформой для объединения операционных функций предприятия примерно так же, как двадцать лет назад ERP стала интеграционной платформой, решая проблемы сложности управления парком разрозненных приложений для бизнеса. Именно на этой интеграционной волне ERP-платформы

быстро расширились, постепенно включая в себя управление персоналом (HR), управление цепочками поставок (SCM), управление взаимоотношениями с клиентами (CRM), управление продуктами (PDM) и ряд других функций.

Сегодня (двадцатилетие спустя) предприятия сталкиваются со схожей проблемой, которая заключается в том, что их ОТ-системы фрагментированы, не имеют интегрированной поддержки с единой зоной ответственности. И именно на технологию ЦД возлагаются надежды, потому что она поможет решить данную проблему, осуществляя переход от разрозненных ОТ к интегрированной системе на базе общей ЦД-платформы.

Стимулирующие и сдерживающие факторы на рынке ЦД

Аналитики единогласно прогнозируют быстрый рост рынка ЦД. Насколько оправданны эти ожидания? Какие факторы влияют на развитие этого рынка?

Говоря о стимулирующих факторах, прежде всего следует отметить, что ЦД является одной из важнейших технологий, на которые опираются проекты по цифровой трансформации, и это дает возможность повысить конкурентные преимущества производителей промышленных изделий, позволяет выпускать продукцию быстрее, создавать прочные и более надежные, менее материалоемкие конструкции (что особенно актуально с учетом роста стоимости материалов) и быстрее выводить их на рынок. Создание подобного рода производств невозможно без использования технологии ЦД.

Рост сложности создаваемых инженерных объектов требует новой парадигмы проектирования, позволяющей преодолеть барьеры между дезинтегрированными средствами разработки, осуществить интеграцию среди групп разработчиков, а также среди многочисленных поставщиков в комплексных цепочках поставок.

Цифровые двойники позволяют снизить расходы за счет смещения «центра тяжести» на стадию разработки: чем позже вносятся изменения в проект, тем изделие получается дороже, а перепроектирование и многократное внесение уточнений в проект в разы повышает как финансовые, так и временные затраты, тем самым закрывая «окно возможностей» для вывода новой продукции на рынок.

Применение ЦД снижает расходы не только на этапе проектирования, но также на всех остальных этапах жизненного цикла изделия при осуществлении задач эксплуатации, поддержки, мониторинга и утилизации⁵⁵.

В существенной мере рост рынка поддерживают примеры успешных проектов по применению ЦД для создания уникальных продуктов, реализации, показывающие возможность увеличения срока службы оборудования, снижения расходов на ремонт, в том числе примеры оптимизации ремонта в труднодоступных, удаленных местах.

Востребованность технологии ЦД растет по мере развития смежных и сопутствующих цифровых технологий: промышленного интернета вещей, облачных технологий, приложений виртуальной и дополненной реальности, технологий аддитивного производства. Снижение стоимости и рост доступности датчиков с низким энергопотреблением, рост доступности приложений для аналитики больших данных, все большая доступность вычислительных мощностей из облака, новые возможности оптимизировать изделие под аддитивные технологии производства – все это стимулирует развитие проектов по созданию цифровых двойников.

В ряде компаний построение ЦД развивается как часть стратегии цифровизации или в рамках проектов по увеличению уровня безопасности эксплуатации ответственных изделий, что также стимулирует рост рынка ЦД, который в последние годы вызывает существенный интерес.

Аналитические и маркетинговые компании провели целый ряд опросов специалистов для того, чтобы оценить влияние новой технологии.

Например, в публикации компании Dassault Systèmes за 2019 г. «Использование ЦД в производстве», со ссылкой на исследование LNS Research [105], обсуждаются основные факторы, стимулирующие внедрение ЦД. И первые три в этом ряду – это «увеличение качества производства», «снижение стоимости производства» и «снижение незапланированных простоев» (рис. 2.6).

В качестве факторов, тормозящих развитие рынка цифровых двойников, следует назвать относительно высокую стоимость проектов данного типа, требующих привлечения многопрофильного про-

⁵⁵ Отметим, что для получения этих эффектов, того двойника, который был создан на стадии проектирования, недостаточно, для большинства процессов стадии эксплуатации потребуются развитие цифрового двойника, построение дополнительных моделей (прим. научного редактора).

граммного обеспечения, наработки экспертизы в математическом моделировании широкого спектра физических процессов, определяющих сложные технологические и производственные процессы.



Рис. 2.6. Основные факторы, стимулирующие внедрение ЦД на производстве. Источник: LNS Research

Очевидно, что проекты по созданию ЦД могут сильно отличаться по сложности и, следовательно, по цене, поэтому информации о стоимости создания ЦД достаточно мало. Авторы статьи «Какова ценность цифрового двойника» («What is the value of a Digital Twin») [106] попытались обозначить нижнюю границу цены проекта по созданию ЦД, которая, по их мнению, должна составлять не менее 50 тыс. евро. Логика данных рассуждений следующая: поскольку использование технологии ЦД экономит компаниям в среднем до 30% затрат на разработку, то использование цифрового двойника становится экономически выгодным для создания высокотехнологичных систем, стоимостью не менее 150 тыс. евро. Авторы вышеприведенной статьи полагают, что по мере совершенствования технологии создания ЦД будет снижаться и пороговая стоимость экономически оправданного внедрения ЦД.

Есть также проблема нехватки специалистов, обладающих междисциплинарными знаниями, необходимыми для создания проектов класса ЦД, наблюдается недостаток информации и образовательных программ соответствующего профиля.

Рынок ЦД – это молодой рынок, он развивается менее 10 лет, поэтому до сих пор существуют проблемы согласованности толкования термина ЦД, а следовательно, проблемы корректной оценки объема рынка ЦД, его сегментирования, оценки темпов роста и, как следствие, проблемы оценок степени привлекательности рынка для привлечения инвестиций.

Рекламирование старых технологий под новой «вывеской» дискредитирует технологию ЦД. Чтобы соответствовать новым веяниям на рынке цифровых технологий, некоторые компании стремятся придать своим продуктам новые маркетинговые названия, используя словосочетание «цифровой двойник» в том числе там, где это не совсем корректно. По словам Хорста Гроссера, управляющего директора Communications, Media And Technology, Industry X.0, «некоторые непреднамеренно создают Цифровых Самозванцев (Digital Impostors) – фрагментированных или неполных цифровых двойников» [107]. Подобные «двойники» компрометируют ценность технологии ЦД за счет того, что решения на их основе оказываются дорогими и плохо масштабируемыми, и таким образом подрывают доверие к технологии ЦД как к эффективной платформе для цифровой трансформации.

Еще одна проблема на пути внедрения технологии ЦД – это так называемая «боязнь привязки к поставщику» (vendor lock-in⁵⁶). Опасения впасть в зависимость от поставщика цифрового двойника дополняются опасениями потери контроля над информацией, ее выхода за рамки контура информационной безопасности, а также нежеланием того или иного сообщества делиться конфиденциальными данными из опасения, что польза от внедрения ЦД окажется меньше, чем ущерб от потери контроля над той или иной информацией. Это не новая проблема: с одной стороны, люди нуждаются в интеграции данных, с другой, – стремятся к установлению границ на уровне отделов, компаний и корпораций из соображений безопасности, пытаясь контролировать и ограничивать распространение данных, тем самым сдерживая распространение технологии ЦД.

Говоря о причинах, сдерживающих внедрение технологии ЦД, следует упомянуть также определенную инерцию в освоении новой культуры разделения труда. Производители инженерного ПО достаточно часто пропагандируют тезис о том, что многолетний опыт, за-

⁵⁶ Бизнес-модель, в которой устанавливается зависимость потребителя от продуктов и услуг определенного поставщика. Наступает ситуация, когда перейти к альтернативному поставщику становится технологически или материально слишком затратно.

ложенный в современное программное обеспечение, позволяет инженерам из развивающихся стран «встать на плечи» специалистов из развитых стран (которые годами создавали это ПО) и даже выйти в проектировании вперед, избегая ошибок первопроходцев. Увы, практика не слишком изобилует подобными примерами, особенно если речь идет не об отдельных компаниях, а о целой отрасли, или ряде отраслей, или отдельной стране.

Ссылаясь на лекцию Петра Щедровицкого «Вверх и вниз по волнам промышленных революций», следует отметить, что внедрение той или иной новой технологии (даже если она уже освоена первопроходцами, достигшими нового уровня культуры разделения труда) не может проходить безболезненно и быстро в странах, где почва для этого еще не созрела. Новая технология не может быть освоена последователями мгновенно, на это требуется время. Причем старая система разделения труда и старая культура производства всячески мешают ее внедрению.

Так, чтобы внедрить конвейер, нужно уйти от цеховой системы организации труда, а это значит, что старую систему нужно сломать, преодолевая инерцию и нарушая те связи, которые внутри нее существуют. Точно так же, если сегодня процедура создания нового изделия допускает схему доводок изделия путем изготовления множественных натуральных прототипов, то перейти на технологию, где большая часть испытаний происходит в виртуальной среде, требуется время. Требуется время на отказ от устаревших подходов (методов), а в ряде случаев и от неэффективных производств.

Несмотря на то, что передовые компании уже продемонстрировали, что ЦД дает возможность резко сократить время разработки, позволяя создавать различные варианты технических решений с использованием виртуального тестирования и только после этого создавать документацию, традиционная практика требует сначала создавать документацию и лишь потом строить изделие, что закрепляет ошибки начального проектирования.

Количественные оценки рынка ЦД и потенциала его роста

По данным отчета Credence Research (Credenseresearch.com), опубликованным в ноябре 2019 г., мировой рынок ЦД составлял

в 2018 г. 3,76 млрд долл. США и достигнет 57,38 млрд долл. к 2027 г. Более ранние публикации вписываются в данные оценки и уточняют значения рынка на период до 2018 г. Так, согласно публикации [108] со ссылкой на отчет «Digital Twin Market Size, Share & Trends Analysis Report By End Use (Automotive & Transport, Retail & Consumer Goods, Agriculture), By Region (Europe, North America, Asia Pacific), And Segment Forecasts, 2018-2025», опубликованный в декабре 2018 г., объем мирового рынка цифровых двойников в 2017 г. оценивался в 2,26 млрд долл. США, и согласно прогнозу, сделанному в данном отчете, рынок должен расти в среднем на 38,2% в год в период с 2018 по 2025 г.

Разные аналитики дают примерно одни и те же численные оценки рынка ЦД. По данным Deloitte глобальный рынок технологий цифровых двойников к 2023 г. вырастет до 16 млрд долл.

Примерно такие же оценки приводятся и в отчете Techsci Research [109], опубликованном в феврале 2018 г. Согласно ему глобальный рынок ЦД составит более 17 млрд долл. в 2023 г. (рис. 2.7), а в период 2017–2022 г. будет расти на уровне CAGR более 36%⁵⁷.

Согласно данным Gartner Inc. мировые расходы на ИТ в 2019 г. составили около 3,8 трлн долл. То есть в абсолютных цифрах рынок ЦД пока еще невелик (примерно 0,15% от мирового рынка ИТ), и привлекает он инвесторов не своими объемами, а темпами роста и перспективами.

Согласно рисунку 2.7 до 2015 г. рынок ЦД находился в зачаточном состоянии (менее 2 млрд долл. на весь мир), однако, учитывая быстрый рост, уже к 2023 г. рынок должен увеличиться примерно в 10 раз. Большую долю рынка ЦД составляет промышленное производство, на втором месте – транспорт, на третьем – энергетика.

Из рисунка 2.8 следует, что рынок цифровых двойников США является крупнейшим рынком в мире. Сравнивая данные рисунков 2.7 и 2.8, можно отметить, что до 2015 г. более 50% мирового рынка принадлежало США. По данным отчета Grand View Research, рынок США превысит 5 млрд долл. к 2025 г., составляя менее трети от мирового. То есть доля Соединенных штатов в общемировом рынке будет падать.

⁵⁷ Книга была написана в феврале 2020 г. до – падения цен на нефть, объявления эпидемии коронавируса и начала глобальной рецессии. В апреле 2020 г., на момент редактирования книги, экономическая ситуация изменилась. По данным Reuters, кризис в 2020 г. будет сопоставим с рецессиями 1982 и 2009 г., что затормозит в том числе и ИТ-рынок, и рынок ЦД. (прим. научного редактора).

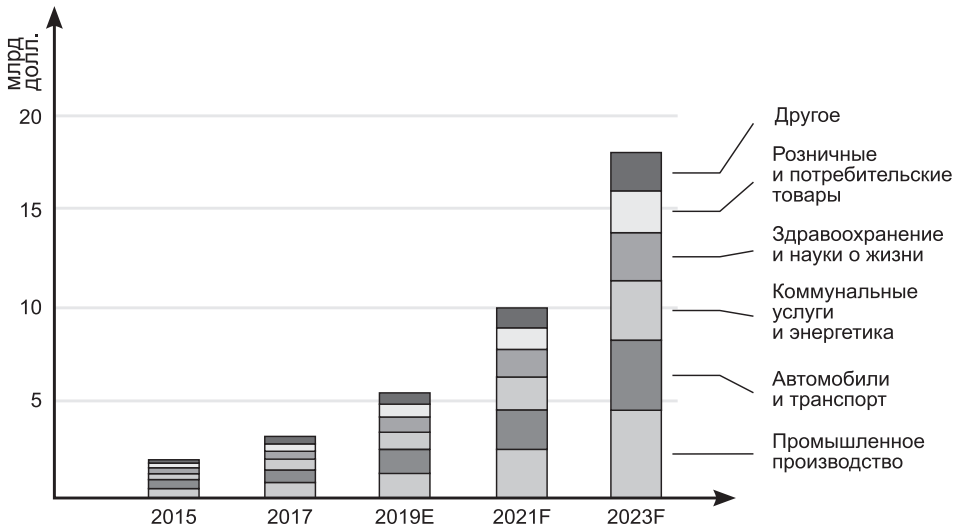


Рис. 2.7. Динамика глобального рынка ЦД в млрд долл. США. Источник: TechSci Research

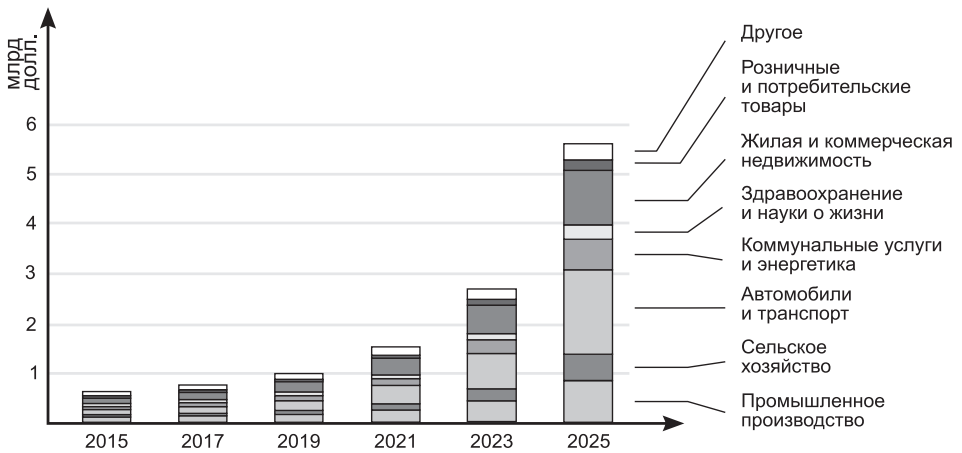


Рис. 2.8. Рынок ЦД в США с разбивкой по типам конечных пользователей в млрд долл. США. Источник: Grand View Research

Несмотря на падение доли в мировом рынке, в ближайшем будущем США будет оставаться лидером мирового рынка ЦД. В отчете Credence Research отмечено, что такие страны, как

Великобритания, Германия, США, Канада и Япония будут активно увеличивать число разработок в указанной области. Швейцария, Бразилия и Польша названы как страны, активно развивающие направление ЦД. Отмечается, что в Азиатско-Тихоокеанском регионе, особенно в Индии, Китае и Японии, предприняты различные инициативы для стимулирования внедрения IoT, что будет развивать технологии ЦД.

Согласно публикации [110] со ссылкой на исследование Grand View Research, опубликованное в декабре 2018 г., региональная структура потребления технологии ЦД в 2017 г. имела такой вид (рис. 2.9).

Судить об интенсивности исследований в области ЦД в разных странах можно по объему научных публикаций в данной области (рис. 2.10)⁵⁸. Отметим, что по объему научных публикаций Россия попала в пятерку стран лидеров.

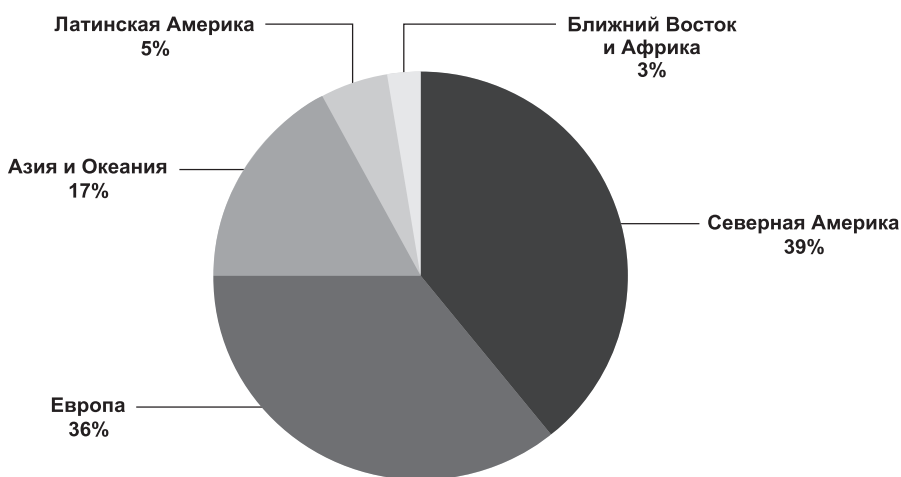


Рис. 2.9. Глобальный рынок ЦД с разбивкой по регионам в 2017 г. Источник: Grand View Research

Согласно отчету Markets and markets [112] к 2023 г. рынок Азиатско-Тихоокеанского региона обгонит рынок Северной Америки, который был абсолютным лидером в 2018 г. (рис. 2.11).

О том, что Азиатско-Тихоокеанский регион лидирует в темпах роста ЦД, свидетельствуют также результаты опросов, проведенных

⁵⁸ Следует отметить, что многие разработки на тему ЦД не публикуются, так как составляют ноу-хау, поэтому оценки интенсивности исследований в области ЦД в разных странах на базе открытых публикаций имеют ограниченную точность (прим. научного редактора).

компанией PWC (рис. 2.12), где показан процент компаний региона, внедривших те или иные технологии.

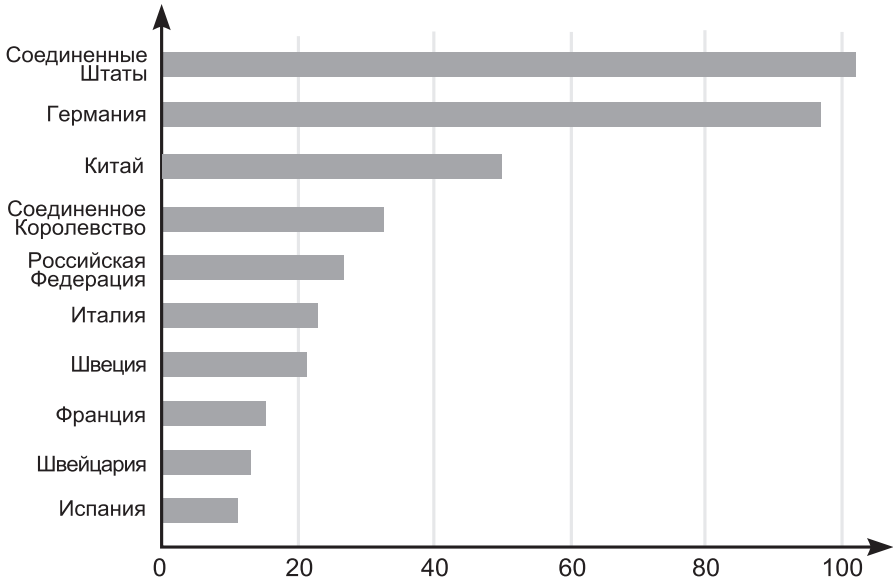


Рис. 2.10. Количество научных публикаций в разных странах (данные Scopus по теме «ЦД в инженерии» на июль 2019 г.).
Источник: [111]

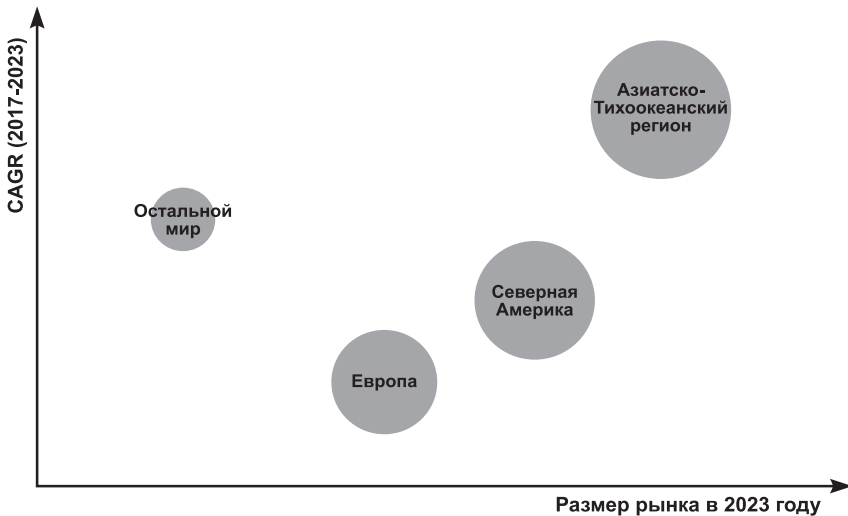


Рис. 2.11. Глобальный рынок ЦД с разбивкой по регионам в 2023 г. Источник: Markets and markets



Рис. 2.12. Распределение ответов на вопрос: «В какой мере вы внедрили, осуществили пилотный запуск или запланировали внедрение следующих технологий в компании?» Источник: PwC, 2018 г.

Как следует из рисунка, в категории «Цифровые двойники продуктов и производственных линий» Азиатско-Тихоокеанский регион существенно опережает не только регион EMEA, но и регион «Северная и Южная Америка».

Согласно отчету HTF Market Intelligence Consulting Pvt. Ltd [113] такие страны, как Китай, Япония, Индия, Южная Корея, активно развивают технологию ЦД и достаточно быстро перенимают компетенции у лидеров рынка.

В 2018 г. компания LNS Research исследовала характер использования технологии ЦД. Результаты исследования отражены в статье «Forging The Digital Twin In Discrete Manufacturing» [114]. Компания опросила более 300 руководителей промышленных предприятий разных типов и представила структуру ответов респондентов соответствующих индустрий на вопрос о стадии/планах по внедрению ЦД (рис. 2.13).

На рис. 2.14 показаны результаты опроса, представленные компанией PwC для исследования «Цифровые фабрики 2020».

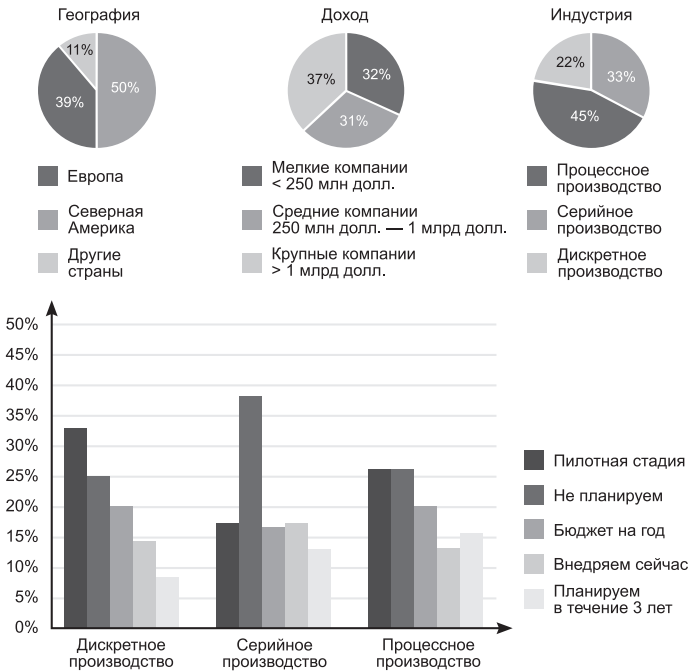


Рис. 2.13. Структура участников опроса (верхняя часть) и ответы респондентов соответствующих индустрий на вопрос о стадии/планах по внедрению ЦД (нижняя часть)⁵⁹. Источник: LNS Research

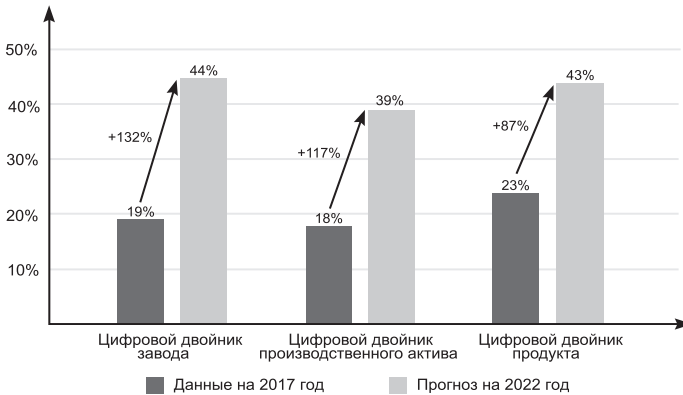


Рис. 2.14. Результаты опроса о внедрении ЦД разного типа. Источник: PWC, 2017 г.

⁵⁹ В англоязычной литературе, где используется деление на Process/Batch/Discrete-производство, обычно применяется следующее толкование: Process – непрерывный процесс, например, производство химических удобрений или пластмасс. Batch – серийное производство, когда операции производятся над партией/серией для создания конечного продукта, например, производство клея. Discrete – дискретное производство, когда товар производится в штуках, например, стальные штампованные детали.

Представители опрошенных компаний ответили на вопрос о внедрении ЦД в 2017 г. и перспективах использования технологии в 2022 г.

Доступны также результаты исследования, направленного на анализ степени востребованности ЦД-технологии в России. В частности, опрос, проведенный специалистами Центра компетенций НТИ СПбПУ, продемонстрировал, что подавляющее большинство отечественных специалистов считают технологию «цифровых двойников» одной из важнейших для достижения технологического лидерства. Было опрошено 237 экспертов из 163 организаций России, которым был задан вопрос: «Какие топ-5 технологий наиболее приоритетны для достижения технологического лидерства и выхода российских компаний на международные рынки?»

Опрос был проведен в рамках разработки дорожной карты по направлению развития сквозной цифровой технологии «Новые производственные технологии» (некоторые результаты этого исследования представлены в статье [115], опубликованной в журнале «Инновации» 2019 г.). В опросе речь шла о новых передовых технологиях, которые могли бы обеспечить лидерство на глобальных высокотехнологичных рынках. Как следует из рис. 2.15, 52% респондентов отметили цифровые двойники в качестве важнейшего инструмента для достижения технологического лидерства.



Рис. 2.15. Технологии, которые включили в «топ-5» более 20% респондентов. Источник: Центр компетенций НТИ СПбПУ

Согласно опросу, проведенному компанией Gartner в 2019 г. [116], популярность технологии ЦД существенно возросла: 75% организаций, внедряющих IoT, уже использовали ЦД или планировали начать их использовать в течение года; 13% организаций, реализующих IoT-проекты, уже применяли цифровые двойники, в то время как 62% либо находились на стадии внедрения ЦД, либо планировали это сделать в течение года.

Динамика рынка заставила Gartner в 2019 г. пересмотреть свои прогнозы в отношении увеличения рынка ЦД на более оптимистичные. Быстрый рост внедрения объяснялся тем, что во многих компаниях ЦД стали частью корпоративных IoT и цифровых стратегий.

Gartner отмечает, что внедрение цифровых двойников идет во все типы организаций, при этом лидируют производители продуктов, связанных с IoT.

54% респондентов сообщили, что большинство применяемых в их компаниях ЦД обслуживают только одного потребителя, реже – несколько групп потребителей. Почти треть респондентов заявила, что большинство их ЦД обслуживают сразу несколько групп потребителей. Например, среди потребителей услуг ЦД могут быть производители автомобиля, поставщики сервисов для обслуживания клиентов, а также, например, страховая компания; при этом каждая из перечисленных групп нуждается в различных данных.

Для разработчиков это говорит о необходимости предоставлять разные точки доступа к данным ЦД для разных групп пользователей.

Опросы, проведенные Gartner в 2018 г., свидетельствуют о том, что цифровые двойники все чаще объединяются между собой: 61% компаний, которые внедрили ЦД, уже интегрировали между собой по крайней мере одну пару цифровых двойников, а 74% организаций отметили, что планируют сделать это в ближайшие пять лет. 39% еще не интегрировали ЦД, и 26% из них не планировали этого делать в течение пяти лет⁶⁰.

Исследование популярности ЦД-технологий провела также компания PWC на основе опроса 1155 компаний и представила его в отчете «Глобальное исследование цифровых операций в 2018 г.» [117]. На рис. 2.16 показано распределение ответов на вопрос: «В какой мере

⁶⁰ Представленные результаты основаны на исследовании Gartner по внедрению IoT, проведенном в 2018 г. Исследование было проведено онлайн среди 599 респондентов в шести странах: Китае, Германии, Индии, Японии, Великобритании и США. Участвующие организации должны были иметь годовой доход более 50 млн долл. США, с планами развертывания как минимум одного варианта использования интернета вещей не позднее 2019 г.

вы внедрили, осуществили пилотный запуск или запланировали внедрение следующих технологий в компании?» Уже в 2018 г. 60% респондентов сообщили о внедрении или планировании проектов класса ЦД.



Рис. 2.16. Распределение ответов на вопрос: «В какой мере вы внедрили, осуществили пилотный запуск или запланировали внедрение следующих технологий в компании?» Источник: PWC, 2018 г.

О резком росте рынка цифровых двойников косвенно говорят данные о развитии смежных и сопутствующих технологий.

Выше было отмечено, что многие современные ЦД-решения строятся с использованием IoT-платформ, внедрение которых по миру идет быстрыми темпами.

По оценкам компании Grand View Research, IoT-рынок в 2025 г. достигнет 949,42 млрд долларов.

По данным отчета 2018 г. [118], доходы от реализации IoT-программных продуктов у крупных игроков сильно выросли, в частности, у Microsoft Azure на 93%, а у Amazon AWS на 49% за 12 месяцев. Более мелкие игроки также продемонстрировали высокие результаты, например, компания C3IoT показала рост на уровне 60%.

По данным IIPRD [119], в течение ближайших 5 лет цифровые двойники будут применяться в рамках 85% всех IoT-платформ.

Аналитики подчеркивают, что рост IoT-проектов является одним из факторов, способствующих принятию решений о внедрении ЦД.

IoT-технологии делают использование ЦД более доступным, позволяют как технически, так и экономически более эффективно собирать большие объемы данных из более широкого круга объектов. Оснащение машин и оборудования датчиками и исполнительными механизмами становится основой для внедрения ЦД. Соединив информацию от датчиков с моделями обработки этих данных, соединив модели, основанные на данных, с CAD/CAM/CAE-моделью, дополнив эти модели данными об условиях эксплуатации изделия, разработчикам удастся получить комплексную интегрированную модель с обратной связью, которая и именуется цифровым двойником.

Аналитики прогнозируют активный рост рынка IoT на ближайшие пять лет. Уже сегодня в мире существуют миллиарды подключенных устройств, предоставляющих интеллектуальные услуги в повседневной жизни – по контролю за дорожным движением, мониторингу окружающей среды, по контролю показателей здоровья человека, по надзору за строительством и т. д. По данным IoT Analytics research, в 2019 г. число подключенных IoT-устройств превышало 8 млрд, а к 2025 г. должно превысить 21 млрд устройств (рис. 2.17). Как видно из рисунка, число активных подключений устройств в мире растет и увеличивается их доля в общем количестве подключений.

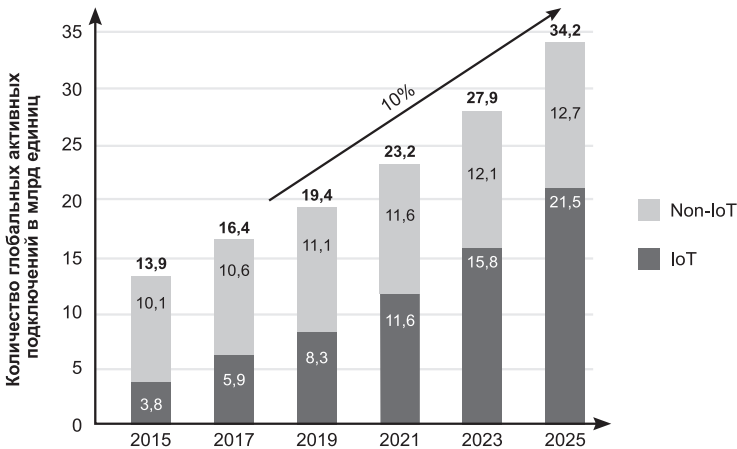


Рис. 2.17. Общее число активных подключений устройств в мире. Источник: IoT Analytics research, 2018 г.⁶¹

⁶¹ На рисунке 2.17 категория IoT включает подключенные потребительские и промышленные устройства и не включает мобильные телефоны, планшеты, ноутбуки и стационарные телефоны. Количество IoT-устройств на рисунке включает активные соединения (не учитывает устройства, которые были куплены в прошлом и больше не используются).

Рост числа подключений идет как в потребительском сегменте (домашние устройства), так и в производственном (подключенное оборудование предприятий).

В настоящее время разработчикам доступен целый ряд технологий связи для организации IoT-соединений (рис. 2.18).

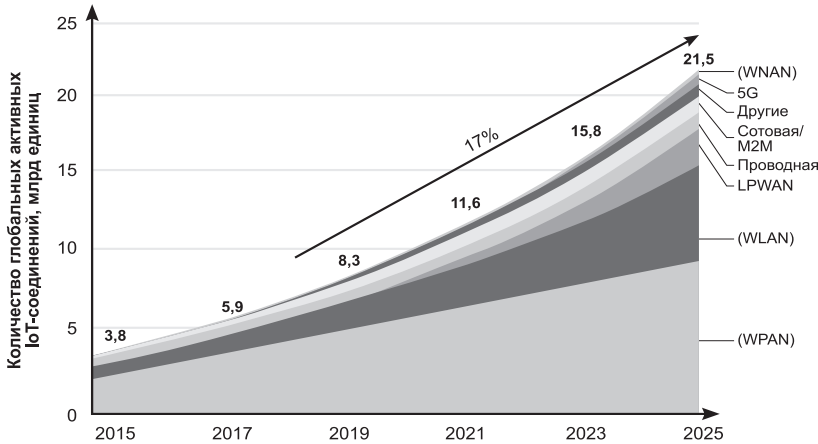


Рис. 2.18. Общее число активных подключенных IoT-устройств в мире⁶². Источник: IoT Analytics research 2018 г. К 2025 г. по технологиям WPAN⁶³, WLAN⁶⁴, LPWAN⁶⁵ будут подключены более 80% всех устройств в мире

Число IoT-соединений существенно меньше. По данным ABI Research, в 2017 г. общее количество проводных и беспроводных IoT-соединений оценивалось во всем мире в 66 млн единиц. Основная доля IoT-соединений приходится на фиксированную связь (DSL, кабель, Ethernet). Продолжается перенос оборудования для оказания IoT-сервисов в 4G LTE диапазон. Растет использова-

⁶² В данных, представленных на рисунке 2.18, не учитываются компьютеры, ноутбуки, телефоны или планшеты. Не рассматриваются однонаправленные коммуникационные технологии, такие как RFID или NFC. Учитываются активные узлы/устройства или шлюзы, которые концентрируют концевые датчики, а не каждый сенсор.

⁶³ WPAN (Wireless Personal Networks) – беспроводные персональные сети, такие как Bluetooth, Zigbee и Z-wave. Их радиус действия, как правило, не превышает 100 м.

⁶⁴ WLAN (Wireless Local Area Networks) – беспроводные локальные сети, которые охватывают подключение до 1 километра. Наиболее распространенным стандартом в этой категории является Wi-Fi.

⁶⁵ LPWAN (Low-power Wide Area Networks) – маломощные глобальные сети, такие как NB-IoT и Sigfox.

ние сетей дальнего радиуса действия с низким энергопотреблением (LPWA) [120].

В первой главе мы рассмотрели целый ряд инжиниринговых технологий, которые определяют возможности создания ЦД, и к ним были отнесены 3D-моделирование, CAD/CAM/PLM, виртуальная и дополненная реальность, генеративный дизайн и ряд других. Данные аналитиков свидетельствуют, что продукты на базе перечисленных технологий находятся на стадии активного роста. Это, в частности, подтверждает отчет Business Advantage (рис. 2.19).

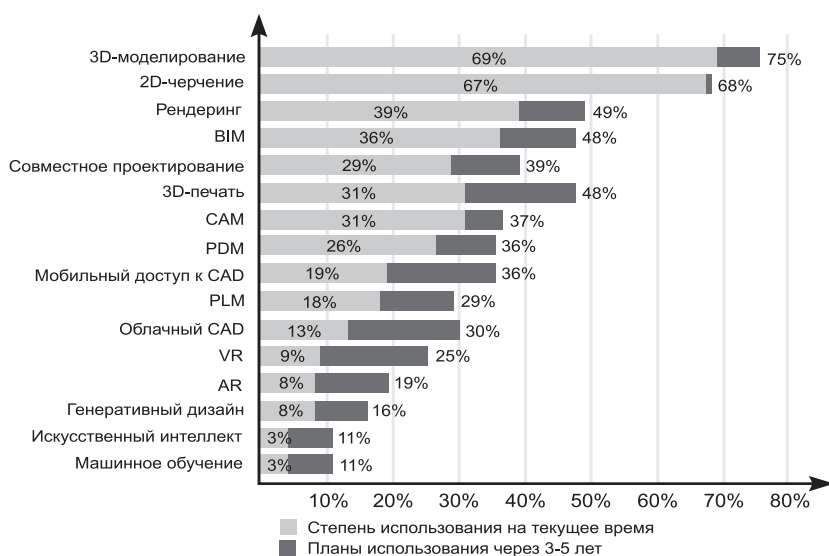


Рис. 2.19. Распределение ответов респондентов на вопрос: «Какие из названных технологий вы применяете сейчас и какие планируете применять через 3–5 лет?» Источник: Business Advantage

На рисунка 2.19 показаны результаты, полученные в рамках ежегодного опроса «CAD Trends 2018–2019» [121], который проводит американская консалтинговая фирма Business Advantage, специализирующаяся на исследовании рынка CAD/CAM. В опросе участвовали 626 пользователей CAD/CAM со всего мира, из компаний, разных по величине и преимущественно относящихся к секторам промышленного производства, архитектуры и строительства.

На основе данных об использовании технологий сейчас и через 3–5 лет можно судить о потенциале роста⁶⁶ разных технологий (рис. 2.20).

Технологии, демонстрирующие наибольший потенциал роста по сравнению с текущим использованием, – это ИИ, виртуальная реальность, дополненная реальность, облачные CAD и генеративный дизайн, то есть технологии, которые являются составляющими и сопутствующими при создании ЦД.

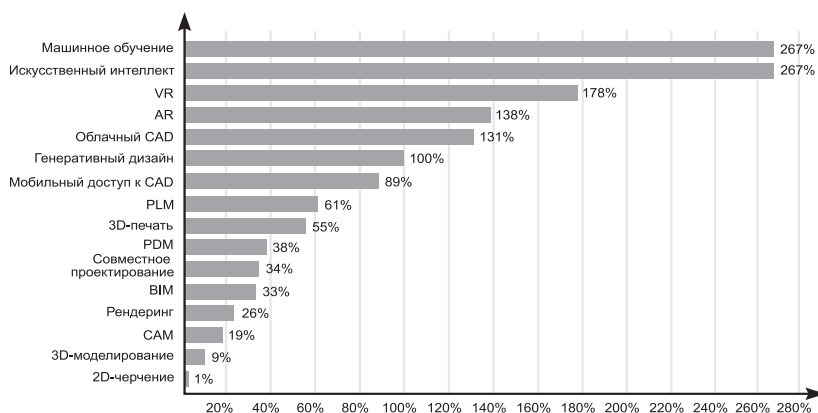


Рис. 2.20. Потенциал роста отдельных технологий на основе ответов респондентов на вопрос: «Какие из названных технологий вы применяете сейчас и какие планируете применять через 3–5 лет». Источник: Business Advantage

Игроки рынка ЦД и варианты их ранжирования

Для того чтобы лучше понять сегментацию и структуру рынка ЦД и перейти к роли отдельных игроков этого рынка, нужно выбрать некоторую систему их классификации и ранжирования.

В первой главе мы отметили, что в разных научных школах термин ЦД может иметь отличия в трактовке. Как показывает дальнейший анализ, на сегодняшний день нет однозначного согласованного мнения о лидерах рынка, но есть попытки разных аналитиков классифицировать и ранжировать этих игроков. Это положение хорошо иллюстрирует таблице 2.1, где по данным различных аналитических исследований представлены ключевые игроки.

⁶⁶ Потенциал роста вычислялся как разница между процентом использования технологий через 3–5 лет и на текущий момент времени, поделенная на процент использования на текущий момент времени.

Таблица 2.1

Ключевые поставщики технологии ЦД по данным разных исследователей

Market Research Future	Grand View Research	IoT One	HTF Market Intelligence Consulting	Adroit Market Research
General Electric, IBM, Microsoft, Oracle, Cisco Systems, PTC, ANSYS, Dassault Systèmes, Siemens AG, Robert Bosch, Allerin Tech, Altair Engineering, Amazon Web Services, Aucotec AG, Autodesk, CADFEM, Computer Science Corporation, CoSMo Company SAS, DNV GL AS FEINGUSS BLANK, Prodea System, SAP SE, Sight Machine, TIBCO Software, Toshiba, Virtualis	ABB Group, Hexagon Geosystems AG, AVEVA, PTC, Schneider Electric SE, Dassault Systèmes, Siemens AG, SAP SE	Dassault Systèmes, GE, ANSYS, PTC, Siemens AG, SAP, Autodesk, Sight machine, Arrayent, Sysmex	Microsoft, GE, PTC, Siemens AG, Dassault Systèmes, IBM, ANSYS.	IBM, ABB, Oracle, ANSYS, Bosch Software Innovation, Siemens AG, Schneider Electric SE, Microsoft, PTC, Dassault Systèmes

Как видно из таблицы, набор лидеров у каждого автора свой, при том, что, несомненно, есть и общие фавориты. В частности, все аналитики отметили компании Siemens, Dassault Systèmes и PTC, четыре из пяти отметили компанию GE.

Для того чтобы более предметно говорить о ранжировании компаний, нужно определиться с критериями.

Первый критерий финансовый – это доля на рынке ЦД. К сожалению, в открытых источниках комментарии на эту тему ограничены. Например, в публикации OpenPR за ноябрь 2018 г. [122] со ссылкой на отчет HTF Market Intelligence Consulting Pvt. Ltd 2016 г. приводится информация, что пять крупнейших поставщиков ЦД заняли около 80% мирового рынка. Согласно этому отчету, такие игроки, как GE, PTC, Siemens, Dassault Systèmes, являются наиболее зрелыми поставщиками решений на базе технологии ЦД во всем мире⁶⁷.

⁶⁷ Заметим, что именно эти игроки наиболее часто упоминаются и в табл. 2.2.

Согласно тому же отчету такие поставщики, как SAP и Mackevision из Германии, Toshiba из Японии, Huawei из Китая, Cybernet Systems из Канады, TCS (партнер Dassault Systèmes) из Индии, Altair из США, – это игроки второго эшелона, которые вступили на рынок несколько позднее.

Целый ряд аналитических компаний представили свои попытки классификации и ранжирования участников рынка ЦД, применяя нефинансовые критерии. В частности, компания IoT One опубликовала в 2017 г. распределение компаний по степени зрелости их ЦД-платформ в виде двумерной диаграммы (рис. 2.21) [123]. По оси ординат здесь отложено время эксплуатации платформ, по оси абсцисс два состояния: 1) вертикально ориентированные (для отдельной индустрии) и 2) общего применения (кросс-индустриальные) решения.



Рис. 2.21. Распределение компаний по степени зрелости их ЦД-платформ. Источник: www.iotone.com, 2017 г.

Внимание аналитиков, занимающихся исследованием IoT-рынка (к которым, в частности, принадлежит IoT One), к теме цифровых двойников неслучайно. Выше уже было отмечено, что игроки, имеющие сильные позиции на рынке IoT и являющиеся лидерами преддо-

ставления услуг предиктивного обслуживания, одновременно занимают передовые позиции и в области разработки ЦД. Этот факт подтверждается сравнением списков, представленных в таблице 2.1 и на рисунке 2.22 (ключевые игроки рынка IoT – по данным аналитической компании Forrester) и рисунке 2.23 (ключевые игроки рынка услуг предиктивного обслуживания). Все лидеры рынков IoT и предиктивного обслуживания отмечены как ключевые компании на рынке ЦД.

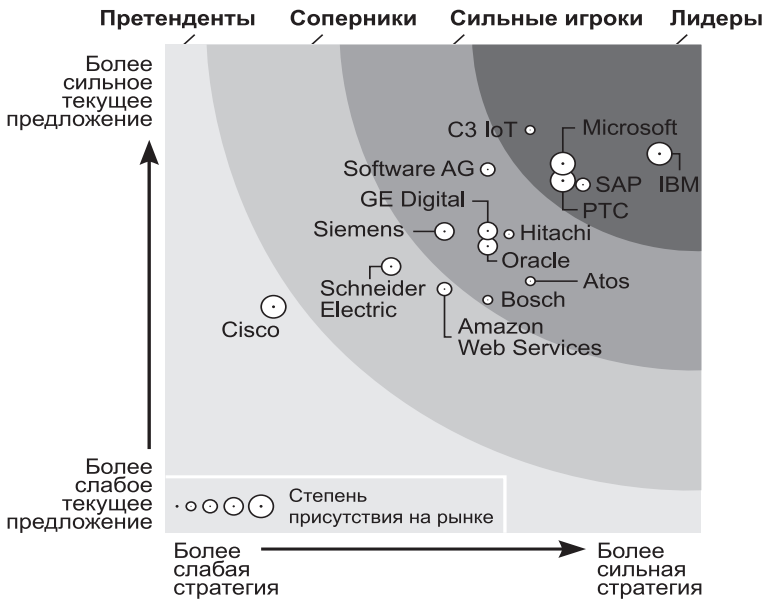


Рис. 2.22. Ведущие поставщики IoT-платформ. Источник: Forrester

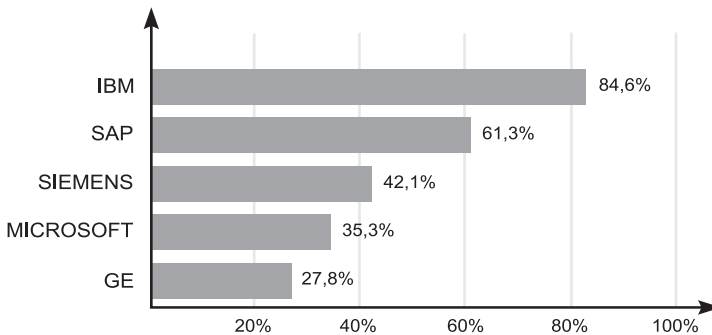


Рис. 2.23. Пятерка компаний лидеров на рынке предиктивного обслуживания. Источник: IoT Analytics [125]

Отметим, что цифровые двойники создают не только гиганты – такие как GE, Siemens, IBM, PTC, Microsoft и SAP (рис. 2.22), но и менее крупные компании, включая FogHorn, Cumulocity IoT, Telit, Litmus Automation, ClearBlade, которые уже имеют или добавляют решения с функциональностью цифровых двойников [124].

Компания Microsoft также представила свое видение ранжирования игроков рынка ЦД. На рисунке 2.24 показаны компании, расположенные в двумерном пространстве (по оси абсцисс отложен способ применения ЦД, а по оси ординат – используемые в ЦД технологии).

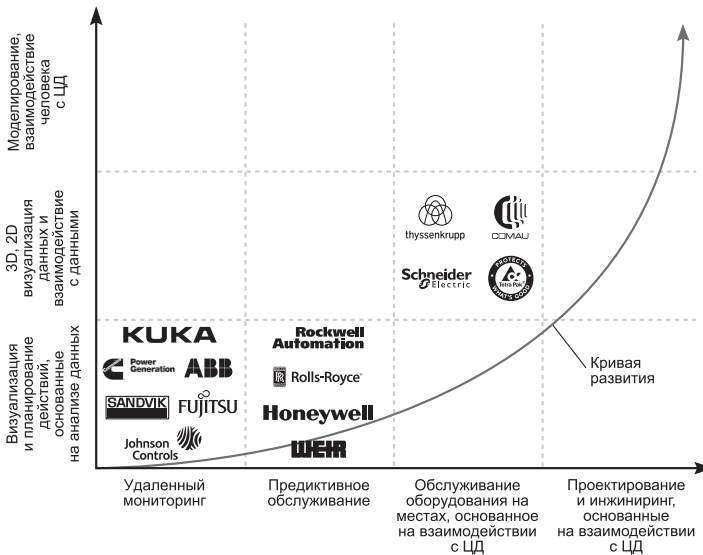


Рис. 2.24. Цифровой двойник как эволюционирующий проект.
Источник: Microsoft, 2017 г. [126]

Каждый из аналитиков дополняет список ключевых игроков рынка ЦД своими фаворитами. Свой взгляд на структуру игроков рынка представила и компания Unity (рис. 2.25). В ее списке присутствуют те, кто был уже упомянут в таблице 2.1, как, например, Siemens, ANSYS, Dassault Systèmes, PTC, но есть и новые имена. В частности, Unity (автор классификации) обозначила на рисунке 2.25 целый сегмент, который она занимает в одиночестве, – это средства создания виртуальной среды для имитации поведения промышленных изделий и оборудования. Напомним, что Unity – это межплатфор-

менная среда разработки компьютерных игр, которая поддерживает визуальную среду разработки и позволяет создавать приложения, работающие под разными операционными системами.

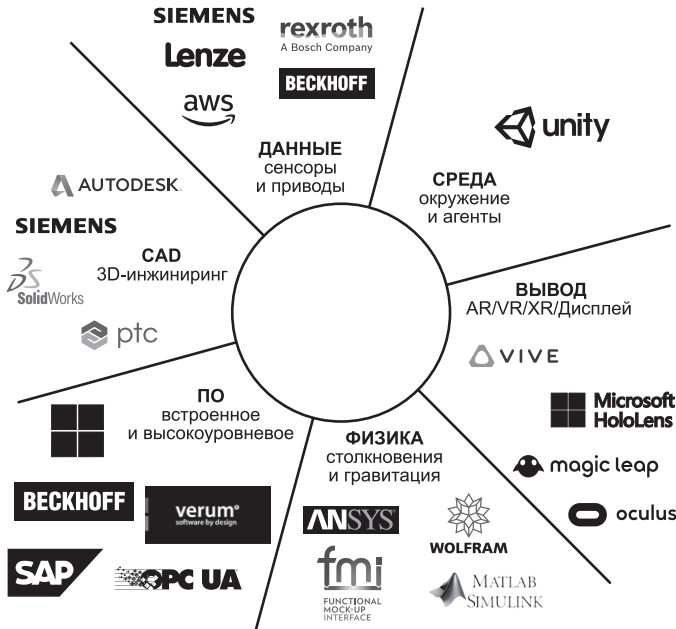


Рис. 2.25. Классификация поставщиков компонентов для построения решений класса ЦД. Источник: Unity

На платформе Unity написаны не только тысячи игр, но и множественные визуализации математических моделей. В последнее время эта компания достаточно активно занимается направлением ЦД. Конечно, Unity не единственный игрок в данном секторе. Компании, занятые системами виртуальной реальности и компьютерными играми, в существенной мере пересекаются с фирмами, которые моделируют поведение проектируемых объектов и пытаются «проиграть» в виртуальной среде их взаимодействие. И здесь игровые компании с большим опытом в разработке виртуальных миров имеют хорошие шансы отвоевать определенные позиции⁶⁸ на рынке промышленного дизайна и моделирования, в том числе и в процессе построения ЦД.

⁶⁸ Технологии визуализации относятся к ЦД, но не являются ключевыми для их создания (прим. научного редактора).

Игровые компании десятилетиями вкладывали средства в разработку алгоритмов реалистичной быстрой графики, создав собственный высококонкурентный рынок. Ожидается, что к 2022 г. общий объем рынка игровых движков достигнет 3 млрд долл. Стремясь выйти на новые рынки, крупные игровые компании, такие как Unity, Crytec, Unreal и Rockstar, делают свои основные технологические платформы доступными для приложений, выходящих за пределы игровой индустрии, и в том числе пытаются выйти на рынок ЦД⁶⁹. И здесь технологический опыт, полученный в игровой индустрии, дает этим компаниям определенное преимущество.

Говоря о ранжировании игроков рынка ЦД, можно использовать разные критерии. Например, такие, как число заявок на патенты в данной области. Перечень фирм, имеющих изобретения в области ЦД, представлен в исследовании компании IIPRD [127] (рис. 2.26–2.28). По оси абсцисс отложено число заявок на патенты.

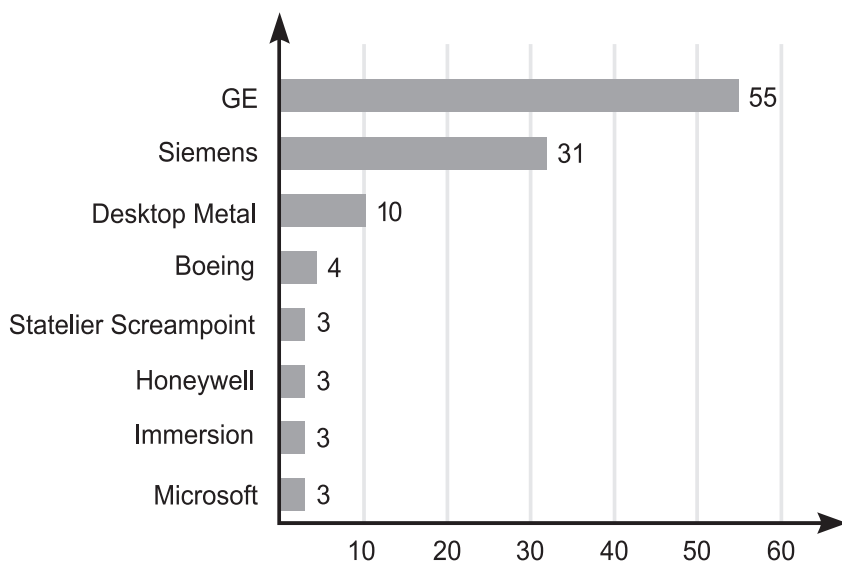


Рис. 2.26. Рейтинг компаний по владению патентами в области ЦД. Источник: IIPRD

Лидерами по числу заявок являются уже неоднократно упомянутые Siemens и GE, при этом, судя по областям, в которых они подали

⁶⁹ Корректнее говорить о рынке сопутствующих сервисов и приложений (прим. научного редактора).

заявки, профиль интересов и компетенций двух компаний несколько различается (рис. 2.27).

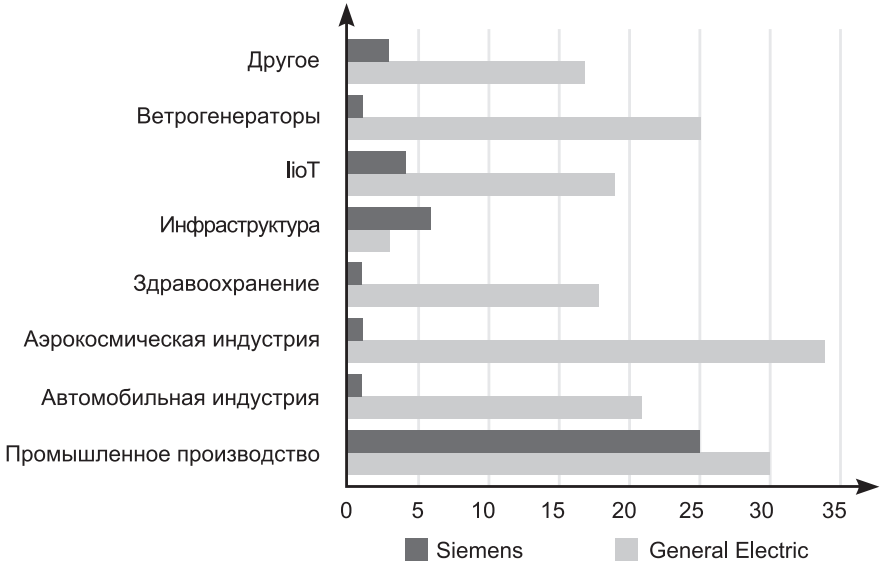


Рис. 2.27. Распределение числа заявок на патенты по отраслям в компаниях Siemens и General Electric. Источник: IIPRD

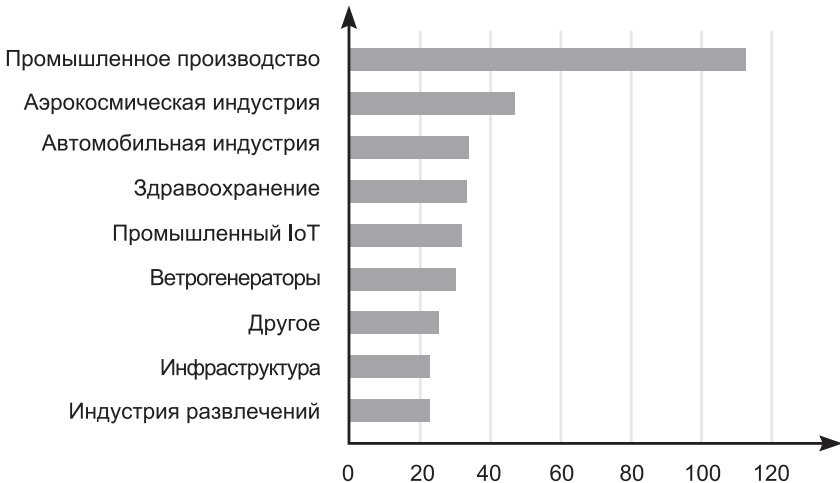


Рис. 2.28. Распределение заявок на патенты в области ЦД по отраслям. Источник: IIPRD

GE проявляет наибольшую изобретательскую активность в аэрокосмической индустрии, промышленном производстве и здравоохранении, в то время как Siemens в максимальной степени сосредоточена на категории «промышленное производство».

Если посмотреть на общую картину распределения активности компаний, имеющих заявки на патенты в области ЦД (рис. 2.28), то здесь интересно отметить, что, помимо лидирующей категории «промышленное производство», существенный вес имеют аэрокосмическая, автомобильная промышленность и здравоохранение.

Возвращаясь к рисунку 2.26, стоит отметить, что в тройку лидеров по числу заявок на патенты в области ЦД, помимо GE и Siemens, известных своей активностью в области создания цифровых двойников, входит менее знаменитая компания Desktop Metal. Она начала в 2015 г. со стартапа разработки и продажи систем 3D-печати металлами и сумела привлечь 438 млн долл. венчурного финансирования от таких инвесторов, как Google Ventures, BMW и Ford Motor. В апреле 2017 г. Desktop Metal запустила в производство свои первые два продукта: Studio System – систему 3D-печати металлами для инженеров и небольших производств, и Production System для широкоформатной печати. В 2018 г. компания Desktop Metal получила премию Эдисона и считается самым быстрорастущим «единорогом» в истории Соединенных Штатов.

Если смотреть на срез стран в распределении патентов (на основании данных IIPRD), то здесь нет сюрпризов, как и в целом по числу патентов, здесь с существенным отрывом лидируют США – первое место, и Китай – второе.

Еще одну интересную классификацию игроков ЦД-рынка сделал аналитик Джо Перино (Joe Perino) в своей статье «Кто выиграет гонку услуг на базе ЦД?» [128], где он предлагает весьма подробную классификацию игроков, в зависимости от категории компаний (табл. 2.2).

Логика более подробного анализа рынка ЦД диктует переход к рассмотрению роли отдельных фирм в рамках той или иной классификации. Не умаляя достоинств перечисленных выше классификаций, мы для рассмотрения роли отдельных компаний остановились на собственной.

Таблица 2.2**Классификация игроков рынка ЦД. Источник: Joe Perino**

N	Наименование категории	Компании, входящие в категорию
1	Крупные технологические компании	IBM, SAP, Oracle, Microsoft, Google, Amazon
2	Независимые поставщики (ISV)	AspenTech, AVEVA, Bentley, GE Digital
3	Консультанты, часть которых также является поставщиками программного обеспечения и приложений	Accenture, Deloitte, DNV, Infosys и KBC
4	Компании, специализирующиеся в области автоматизации	ABB, Emerson, Honeywell, Schneider, Siemens, Rockwell, Yokagowa
5	Системные интеграторы	Maverick, Rovisys, Wood Group
6	Производители оборудования	Flowserve
7	Технологические стартапы	C3, Uptake
8	ЕРС ^{<?>} , часть которых также является лицензиарами процессов	KBR, CB & I, Technip, WorleyParsons
9	Лицензиары процессов	Axens, UOP, Haldor Topsoe, Fastech, GTC
10	Эксплуатационные компании, которые также являются лицензиарами процессов	ExxonMobil, LyondellBasell, Shell

Во-первых, мы ограничились рассмотрением поставщиков программных решений и услуг, предоставляемых на базе этих программ. Во-вторых, разделили эти компании по географическому признаку на отечественные и зарубежные, и, в-третьих, предложили взглянуть на поставщиков ПО с двух разных точек зрения: с одной стороны, – как на поставщиков компонентов (отдельных классов ПО) для создания

ЦД, и, с другой, – как на фирмы, которые создают комплексные решения класса ЦД.

В рамках первого подхода будет рассмотрен круг компаний, в том числе и тех, которые не позиционируют себя как поставщиков готовых ЦД-решений, но разрабатывают при этом программы, необходимые для его создания.

В рамках второго подхода будут более подробно рассмотрены компании, которые позиционируют себя в качестве поставщиков интегрированных решений класса ЦД. То есть в этой части речь пойдет о законченных решениях, об интеграции и о формирующихся альянсах поставщиков, создаваемых для объединения ряда производителей, поскольку практически ни у кого, включая технологических гигантов, нет полного набора инструментов для создания ЦД сложных комплексных объектов. Следует отметить, что часть компаний попадает в обе категории, имея одновременно обе модели бизнеса.

Зарубежные поставщики ПО для построения ЦД

Поставщиков ПО (отдельных компонентов для создания ЦД) в этом разделе будем классифицировать согласно пятиэлементной схеме, которую мы уже обсуждали и кратко отразили на рис. 1.41. В более подробном виде представляем ее на рис. 2.29.

Согласно логике (рис. 2.29) рассмотрим программное обеспечение, необходимое для: 1) создания виртуального двойника (виртуальный элемент, он же цифровая часть двойника); 2) сбора данных с физического объекта, мониторинга и управления физическим объектом (физический элемент/физическая часть двойника); 3) создания хранилища собираемых данных; 4) создания сервисного элемента, который предоставляет услуги и интерфейс клиентам, и, наконец, 5) создания коммуникаций между названными элементами.

Деление ЦД на пять элементов представляется достаточно полезным для классификации программного обеспечения, однако, как будет показано далее, между указанными группами могут возникать пересечения по причине того, что один и тот же программный продукт способен покрывать функции нескольких элементов (частей) цифрового двойника.

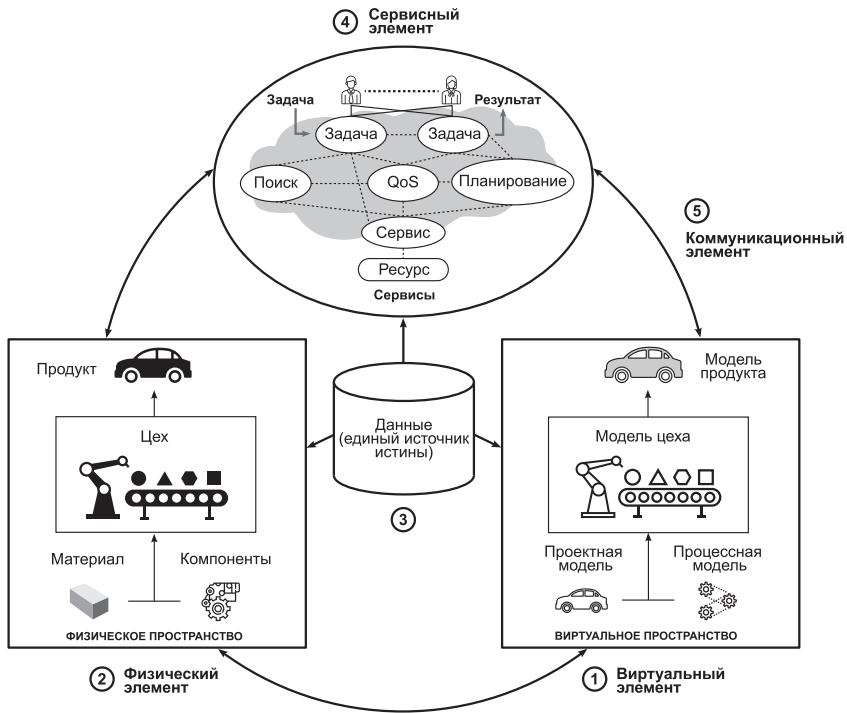


Рис. 2.29. Развернутая схема пятиэлементной модели ЦД.
 Источник: [129]

ПО для создания виртуальной части двойника

В этом разделе речь пойдет в первую очередь о поставщиках инженерного ПО и прежде всего – CAD/CAM/CAE/PLM-продуктов. На основе данных приложений создается основа ЦД, и обзору приложений этого типа мы уделим наибольшее внимание.

Говоря о лидерах на рынке инжиниринговых и PLM приложений, можно сослаться на данные отчета APPS RUN THE WORLD Research Inc. (рис. 2.30), где представлено соответствующее распределение игроков рынка.

Рынок инжинирингового ПО – это огромный рынок, с сотнями игроков и тысячами решений, которые можно классифицировать различным образом.

Говоря о CAD/CAM-приложениях, можно выделить средства автоматизации проектирования механических систем MCAD/CAM

(Mechanical CAD/CAM), средства автоматизации проектирования электронных устройств (Electronic Design Automation, EDA), инструменты автоматизации проектирования архитектурных и строительных конструкций АЕС (Architecture Engineering and Construction).

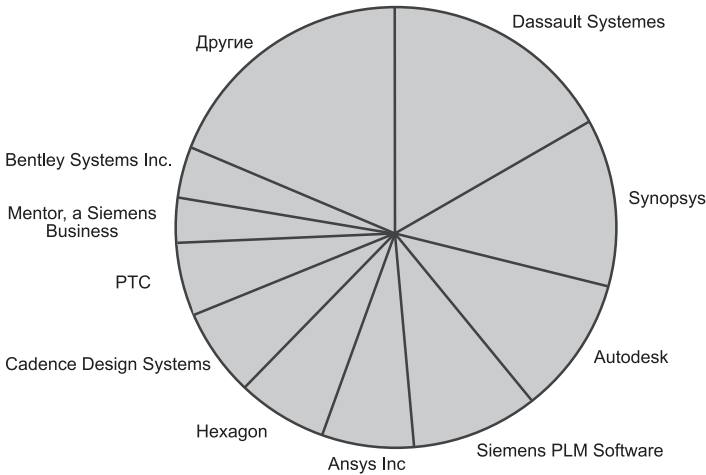


Рис. 2.30. Доли игроков на рынке инженеринговых и PLM-приложений. Источник: APPS RUN THE WORLD Research Inc.

CAD-системы можно также разделить по уровню сложности и цене, выделяя системы верхнего уровня (High-end системы), системы среднего и нижнего классов. Можно классифицировать CAD-приложения по уровню их популярности на рынке, как это, например, представлено в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Рейтинг наиболее часто используемых программных продуктов. Источник: Business Advantage

N	ТОП-10 наиболее часто используемых программных продуктов	Тенденции 2018–2019 гг., % респондентов, использующих продукт
1	Autocad	35%
2	SolidWorks	25%
3	Inventor	13%
4	AutoCAD LT	12%

N	ТОП-10 наиболее часто используемых программных продуктов	Тенденции 2018–2019 гг., % респондентов, использующих продукт
5	PTC Creo	11%
6	Revit	8%
7	CATIA	6%
8	Civil3D	6%
9	AutoCAD Architecture	6%
10	AutoCAD Mechanical Draftsight NX	5% 5% 5%

Говоря о приложениях класса CAE, их также можно разделить по «фокусу» программного обеспечения. Например, по данным Grand View Research, около половины задач, решаемых инструментами CAE, можно отнести к FEM-моделированию, около 30% – к классу CFD⁷⁰-моделирования, и примерно по 10% – к классу задач динамики твердых тел (Multibody Dynamics⁷¹) и к задачам математического моделирования и оптимизации (Optimisation & Simulation⁷²).

Представление о лидерах рынка ПО для инженерного анализа и моделирования можно получить в отчете компании HTF Market Intelligence Consulting (рис. 2.31).

Здесь представлена часть игроков, имеющих экспертизу в области CAD/CAM/CAE (ANSYS, Dassault Systèmes, Siemens PLM Software⁷³), а также компании, специализирующиеся в разработке ПО для расчетов и математического моделирования, и, в частности, лидер данного сегмента рынка – компания MathWorks – разработчик известных продуктов MATLAB, Simulink и Stateflow, которые будут упомянуты далее.

Описание спектра всех доступных решений инжинирингового ПО выходит за рамки этой книги. Выбор решения для построения

⁷⁰ Вычислительная гидродинамика (от Computational Fluid Dynamics – подраздел механики сплошных сред, включающий совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов).

⁷¹ Дословно «динамика многотельных систем».

⁷² Граница между обозначенными сегментами рынка не является абсолютной. В частности, граница между FEM и CFD несколько размыта, – анализ методом конечных элементов (FEA) чаще используется для задач механики деформируемых тел (структурного анализа), в то время как вычислительная гидродинамика (CFD) представляет собой набор методов решения задач механики жидкости и газа/аэро-гидро-динамики.

⁷³ Siemens PLM Software недавно переименован в Siemens Digital Industries Software.

виртуальной части цифрового двойника зависит от множества причин, поэтому для того, чтобы обозначить некий обозримый перечень ПО, целесообразно обратиться к опыту компаний, специализирующихся именно на создании ЦД, которые имеют опыт выбора лучших продуктов от мировых производителей. Здесь полезно опереться на опыт команды Центра НТИ СПбПУ и ГК CompMechLab. В таблице 2.4 представлены основные поставщики и наименования продуктов для создания цифровых двойников, которые используют в Центре компетенций НТИ СПбПУ. Упомянутые продукты (табл. 2.4) разделены на 4 группы – это поставщики ПО для проектирования конструкций (CAD/CAM), для математического моделирования, выполнения виртуальных испытаний, включая расчетные обоснования проектных решений (CAE, компьютерный инжиниринг), специализированное ПО для математического моделирования технологических процессов, таких как сварка, литье, давление и класс приложений для решения задач оптимизации (CAO)⁷⁴.

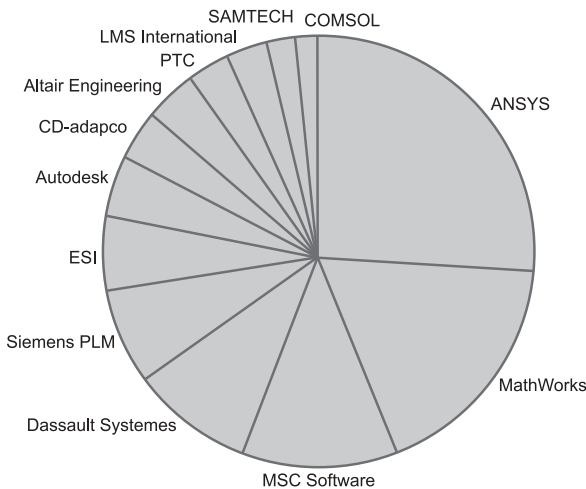


Рис. 2.31. Доли игроков рынка инженерного анализа и моделирования. Источник: HTF Market Intelligence Consulting, 2018 г. [130]

⁷⁴ Computer-Aided Optimization, (CAO) – многопараметрическая, многокритериальная, многодисциплинарная, топологическая, топографическая оптимизация размеров, формы и т. д.

Таблица 2.4

Программные продукты, используемые для создания ЦД.
Источник: Центр компетенций НТИ СПбПУ

Компания разработчик или владелец продукта	Программный продукт	Профиль продукта
Проектирование конструкций		
Dassault Systèmes	CATIA	CAD/CAM/CAE/PLM
	Solidworks	CAD/CAE
Siemens Digital Industries Software (ранее Siemens PLM Software)	NX (бывший «UG»),	CAD/CAM/CAE
PTC	Creo	CAD
SpaceClaim Corporation	Spaceclaim	CAD
Математическое моделирование, компьютерный инжиниринг		
Altair Engineering	HyperWorks (HyperMesh/ HyperView, SimLab, RADIOSS, AcuSolve, OptiStruct)	CAE/CFD
ANSYS Inc.	Multiphysics, CFX, FLUENT, LS-DYNA	CAE/CFD
Hexagon/MSC Software	MSC Adams, Digimat	CAE
Математическое моделирование производственных технологий		
ESI Group	ProCAST	Моделирование литья (процессы и дефекты)
	SYSWELD	Моделирование и анализ сварки, сборки и термообработки
	PAM-STAMP	Моделирование формовки (обработки давлением)
Altair Engineering	Inspire Form, Extrude, Cast, Print3D	Семейство решателей платформы Inspire для моделирования и анализа производственных процессов: штамповки, экструзии, литья металлов, 3D-печати металлопорошками
Scientific Forming Technologies Corporation	DEFORM-3D -	3D-моделирование и анализ процессов штамповки металлов
CoreTech System Co.	Moldex3D	CAE продукт для литья пластмасс под давлением

Компания разработчик или владелец продукта	Программный продукт	Профиль продукта
Оптимизация конструкций		
Dassault Systèmes	SIMULIA Tosca	Оптимизация на основе FEA/CFD моделирования
Сигма Технология	IOSO	Многокритериальная и многопараметрическая оптимизация проектных параметров систем
Altair Engineering	Inspire Structures	Inspire – платформа генеративного дизайна и топологической/топографической оптимизации
	OptiStruct	МКЭ-анализ конструкций на прочность, NVH (Noise, Vibration And Harshness – шум, вибрация и неплавность движения) анализ, топологическая/топографическая оптимизация изотропных/анизотропных и композитных структур, оптимизация с генерацией решетчатых структур
	HyperStudy	Вероятностные исследования для оптимизации поведения и устойчивости конструкции
ESTECO SpA	modeFRONTIER	Междисциплинарная многокритериальная платформа для оптимизации процесса технического проектирования

Следует также привести перечень рекомендуемого софта для создания виртуальной части ЦД от китайских специалистов [131], которые придерживаются следующей классификации: ПО для создания геометрических моделей, ПО для создания физических моделей, ПО для создания поведенческих моделей и ПО для создания моделей, основанных на правилах, что соответствует классификации на ранее приведенном рис. 1.34.

Геометрические модели (Geometry Models) описывают физический объект с точки зрения его формы, размера, допусков и т. д. Физическая модель описывает физические процессы объектов, которые определяют свойства изделия в различных условиях эксплуатации (такие как деформация, расслаивание, разрушение, коррозия). Поведенческие модели (Behavior models) описывают поведение системы и механизмы ее реагирования на изменения во внешней среде.

де. Например, изменение производительности ветрогенератора в зависимости от режима его работы и параметров погодных условий. И, наконец, модели, основанные на правилах (Rule models), снабжают ЦД логикой, на которой строится автономное принятие решений, базируясь на правилах, извлеченных из истории эксплуатации объекта. Например, если степень износа зубчатого колеса достигла определенного значения, следовательно, необходимо провести замену или ремонт⁷⁵.

Учитывая, что средства построения геометрических и физических моделей мы уже достаточно полно перечислили в таблице 2.4, прокомментируем рекомендуемые пакеты программ для построения поведенческих моделей и моделей, основанных на правилах, ссылаясь на опыт китайских разработчиков ЦД.

В категории построения поведенческих моделей (табл. 2.5) отмечены как универсальные инструменты для моделирования интегрированных комплексных систем, как, например, Dymola (Dynamic Modeling Laboratory) или набор решений для автоматизированной подготовки производства Tecnomatix, позволяющий синхронизировать проектирование, технологическую подготовку производства и изготовление продукции, так и программное обеспечение, направленное на моделирование узкоспециализированных задач, как, например, продукт Hydromantis, предназначенный для моделирования для станций очистки воды и сточных вод.

В разделе о средствах создания моделей, основанных на правилах (табл. 2.5), приведены инструменты построения аналитических моделей и среди прочих упомянуты: среда разработки для языка программирования Python (PyCharm от компании JetBrains); открытая нейросетевая библиотека Keras, написанная на языке Python и нацеленная на работу с сетями глубокого обучения; среда разработки нейронных сетей NeuroSolutions от компании NeuroDimension; открытая библиотека для машинного обучения Tensorflow, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети. А также многопрофильные платформенные продукты, такие как MindSphere и MATLAB Toolbox.

⁷⁵ Следует отметить, что в данном случае речь идет о «цифровых тенях». С помощью цифровых теней возможно предсказать поведение, сходное с тем, что уже наблюдалось в истории эксплуатации, но нельзя спрогнозировать аварийные ситуации, если ранее они никогда не происходили на таком объекте. Для сложных и дорогостоящих объектов и систем стоимость ошибки, связанной с применением только цифровых теней и математических моделей с невысоким уровнем адекватности реальным объектам и реальным процессам, может оказаться очень высокой (прим. научного редактора).

Таблица 2.5

Примеры инструментов для создания моделей, основанных на поведении, и моделей, основанных на правилах. Источник [132]

Компания разработчик/владелец	Наименование продуктов	Описание продуктов/программ
Инструменты для создания моделей, основанных на поведении (Behavior modeling)		
Dassault Systèmes	Dymola	Проектирование и моделирование комплексных систем на базе языка Modelica
	3DVIA Composer	Инструменты для разработки интерактивной технической документации
	DELMIA	Инструмент для автоматизированного планирования инженерных решений и производственных процессов, позволяющий оптимизировать производственные системы до начала реального внедрения
Siemens PLM Software.	Tecnomatix	Инструмент, направленный на решение задач в области подготовки и оптимизации производства
ESI	SimulationX	Средство моделирования физико-технических объектов и систем
Open Source Modelica Consortium	OpenModelica	Среда на основе языка Modelica для моделирования, оптимизации и анализа сложных динамических систем
Autodesk, Inc.	Autodesk 3ds Max	Инструмент для 3D-моделирования, анимации и визуализации
CGTech	Vericut	VERICUT — программный комплекс для визуализации процесса обработки деталей на станках с ЧПУ с целью обнаружения ошибок в траектории инструмента
MSC	ADAMS	CAE с концентрацией на multibody dynamics simulation
FunctionBay	RecurDyn	CAE с акцентом на моделирование динамики твердых тел (MBD) ^{<?>}
Hydromantis	Simuworks	Система моделирования для станций очистки воды и сточных вод
Инструменты для создания моделей, основанных на правилах (Rule based modeling)		

Компания разработчик/ владелец	Наименование продуктов	Описание продуктов/программ
JetBrains	PyCharm o	Среда разработки для языка программирования Python
Keras Developers Group	Keras	Открытая нейросетевая библиотека Keras, нацеленная на работу с сетями глубокого обучения и написанная на языке Python
Google	Tensorflow	Открытая библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети с целью автоматического нахождения и классификации образов

ПО для физической части двойника

Говоря о физической части двойника, как правило, подразумевают некоторое оборудование, которое может являться частью объекта (физической части двойника), позволяет собирать данные об объекте и в случае необходимости осуществлять управляющее воздействие. Для обеспечения этих процессов необходимо программное обеспечение (ПО для организации телеметрии, видеонаблюдения, контроля и управления физическими объектами). Следует отметить, что для создания высокоадекватной математической модели физического объекта необходимо получать данные о нем на всех этапах жизненного цикла: изучать его размеры и форму, макро- и микроструктуру, физико-механические свойства конструкционных материалов, степень шероховатости поверхностей и т. п.

Для получения данных об объекте могут применяться разные методы: для изучения внешнего вида и формы – методы лазерного измерения⁷⁶, распознавания изображений; для изучения внутренней структуры – способы неразрушающего контроля, и т. д. В ряде случаев измерения необходимо производить в режиме реального времени, оперативно получая целый набор параметров (температура, давление, скорость, ускорение, вибрация, напряжение, влажность и т. д.). ЦД должны непрерывно получать данные с датчиков, чтобы

⁷⁶ Использование методов лазерного измерения для построения моделей строительных объектов для получения 3D-моделей более детально будут рассмотрены в главе 3.

представить состояние физических объектов в реальном времени, обрабатывать полученную информацию, калибровать и уточнять модель объекта и в случае необходимости осуществлять управление физическими объектами на основе полученной и проанализированной информации.

Существует широкий спектр приложений для сбора и обработки информации о физических объектах, приведем лишь некоторые примеры⁷⁷. Подобные инструменты есть в многофункциональном платформенном ПО Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE (табл. 2.6). К этой категории также относится специализированная платформа и среда разработки LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) фирмы National Instruments, которая используется в системах сбора и обработки данных, а также для управления техническими объектами.

Разрешение современных датчиков для получения видеоинформации уже превосходит возможности человеческого зрения. Цифровая обработка и цифровой анализ изображений становится все более важной задачей в системах промышленного контроля, управления движущимися аппаратами, обработкой данных дистанционного зондирования, которые относятся к задачам цифровых двойников.

Неслучайно в таблице 2.6 отмечена среда разработки приложений машинного зрения MVtec HALCON; библиотека машинного зрения HexSight от компании Adept Technology; а также средство создания приложений машинного зрения и обработки изображений Vision Development от National Instruments.

В части приложений для обратной связи и управления физическими объектами следует упомянуть такое программное обеспечение, как Beckhoff TwinCAT – ПО для создания систем управления технологическими процессами на базе ПК, представляющее собой единую программную среду для всех контроллеров и прочего программируемого оборудования Beckhoff. А также приложение от компании Rexroth IndraMotion MTX, которое представляет собой платформу со встроенным программируемым логическим контроллером для разработки процессов машинной обработки и формования с использованием стандартных станков или автоматизированных линий.

Таблица 2.6

⁷⁷ Более полный список можно найти в публикациях QinglinQia и FeiTaоа.

Примеры инструментов для создания систем наблюдения и контроля. Источник: QinglinQia, FeiTaoa

Профиль компаний и продуктов	Компании	Продукты	Описание продуктов
Системы наблюдения, распознавания и сбора данных	Dassault Systèmes	3DEXPERIENCE	Корпоративная среда для поддержки совместной деятельности производителей и потребителей
	MathWorks	MATLAB	Вычислительная среда и язык программирования для решения технических задач
	Adept Technology	HexSight	Библиотека машинного зрения
	MVTec	HALCON	Среда разработки приложений машинного зрения
	National Instruments	LabVIEW	Среда разработки для создания систем сбора/обработки данных и управления техническими объектами
Системы контроля и управления	Rexroth	IndraMotion MTX	Платформа со встроенным PLC для разработки процессов машинной обработки и формования с использованием станков и автоматизированных линий
	Beckhoff	Beckhoff TwinCAT	ПО для создания систем управления технологическими процессами на базе ПК, представляющее собой единую программную среду для всех контроллеров и прочего программируемого оборудования
	GE	Predix	Облачная операционная система, для промышленного интернета
	Siemens	MindSphere	Облачная открытая IoT-платформа
	Dassault Systèmes	3DEXPERIENCE	Корпоративная среда для поддержки совместной деятельности производителей и потребителей

ПО для управления данными

Как известно, данные составляют основу разработки и применения (работы) любого цифрового двойника. Данные могут поступать с датчиков, считываться со штрих-кодов и QR-кодов, поступать с видеочамер и т. п.⁷⁸ Для эффективной работы с этими данными нужно обеспечить их сбор, фильтрацию, безопасную передачу, проверку, классификацию, дедупликацию, надежное хранение в базах данных, извлечение, обработку, анализ данных и визуализацию для представления пользователю. Для обеспечения этих процедур существует огромное число приложений, которые условно можно отнести к четырем этапам – сбор данных, управление данными, хранение и использование данных.

Сбор данных должен включать в себя процедуры фильтрации и очистки данных до того, как они помещаются в хранилище данных или любое другое приложение для анализа данных. На этом этапе могут использоваться функциональные возможности уже упомянутых нами IoT-платформ Predix, ThingWorx, MindSphere. Здесь могут также использоваться специализированные программы, такие как, например, программа с открытым исходным кодом Flume, которая служит для того, чтобы управлять потоками данных: собирать их из различных источников, фильтровать и направлять в централизованное хранилище. Можно упомянуть платформу для сбора, хранения, обработки и анализа машинных данных Splunk от одноименной компании, а также программу с открытым исходным кодом Scribe от Facebook – инструмент объединения лог-файлов в потоковом режиме реального времени из большого количества серверов.

Для хранения данных (в том числе большого объема) могут использоваться классические проприетарные СУБД (Oracle, MS SQL, DB2) и СУБД с открытым кодом, такие как, например, PostgreSQL.

⁷⁸ Следует напомнить, что именно понятие Smart Big Data (содержательные большие данные), то есть данные, обладающие высоким уровнем информационной насыщенности, полученные на основе четкого представления о расположении критических зон в конструкции, в которых имеет смысл размещать датчики, – является одной из характеристик цифрового двойника, созданного на этапе проектирования. В случае применения только цифровых теней, генерируется объем Big Data, который содержит, как правило, очень много «мусорных» данных и значительно (на порядки) превышает объем Smart Big Data (прим. научного редактора).

В проектах создания ЦД сложных многокомпонентных объектов при наличии данных большого объема и данных, поступающих с большой скоростью, используются технологии хранения больших данных. В частности, облачные хранилища, такие как S3, RedShift или Greenplum; распределенные файловые системы HDFS, а также NoSQL СУБД, такие как Cassandra и MongoDB.

ПО для обеспечения связи элементов ЦД

Для обеспечения связанности элементов цифрового двойника с гарантией качества и безопасности при доставке пакетов данных, необходимо применять специальное программное обеспечение.

Учитывая наличие датчиков разного типа, разные среды доступа, скорости подключения, протоколы связи и топологию связанности сетевых элементов друг с другом, необходимо обеспечивать подключение IoT-устройств разного типа. Эту задачу решают IoT-платформы, предоставляющие инфраструктуру, которая гарантирует совместимость для широкого набора IoT-устройств или предлагает перечень требований к любому IoT-устройству для его успешного подключения.

В таблице 2.7 представлены некоторые приложения, которые служат для объединения цифровых элементов, а также для объединения цифровых и физических элементов, при этом большинство из них выполняют обе задачи.

ПО для создания сервисного элемента ЦД

Для организации сервисного элемента необходимо обеспечить пользовательский интерфейс, управление ресурсами, создать каталог и описание доступных услуг, реализовать поиск и отказоустойчивое управление сервисами. При этом очевидно, что построение таких сервисов, как прогноз поведения актива, или диагностика состояния объекта, или математическое моделирование поведения объекта опираются также на программное обеспечение, которое мы описали выше.

Таким образом, инструменты для построения сервисного элемента включают уже ранее рассмотренные продукты. Однако посмотреть на них следует под другим углом зрения – как на инструменты

Таблица 2.7

Примеры программных продуктов для обеспечения связи между элементами ЦД. Источник: QinglinQia, FeiTaao

Сфера применения	Компании	Продукты	Назначение продуктов	
ПО для объединения цифровых элементов	Microsoft	Azure IoT	Коллекция облачных служб, позволяющих подключать ресурсы интернета вещей	
	ПО для объединения цифровых и физических элементов	GE	Predix	Облачная IoT-платформа для большого объема промышленных данных и аналитики
		Siemens	MindSphere	Облачная открытая IoT-платформа
		Hitachi	Lumada	Коммерческая IIoT-платформа
		Foxconn Industrial Internet	BEACON	Промышленная платформа для интернета вещей
		IBM	IBM Bluemix	Публично-облачная платформа, поддерживающая несколько языков программирования и сред разработки
		ABB	ABB Ability	Промышленная интернет-платформа и облачная инфраструктура
		Dassault Systèmes	3DEXPERIENCE	Корпоративная среда для поддержки совместной деятельности производителей и потребителей
		Cisco	Jasper Control Center	Платформа управления подключением большого числа IoT-устройств в рамках глобального SaaS сервиса
		PTC	ThingWorks	Промышленная платформа для интернета вещей

поддержки сервисов оптимизации, математического моделирования, построения прогнозов и т. п. (рис. 2.32).

Жирным шрифтом на рисунок 2.32 показаны программные продукты, которые относятся сразу к нескольким категориям. Так, например, программная платформа для сбора и анализа данных от промышленного оборудования Predix компании GE представлена в трех областях рисунка, так как она предлагает инструменты и оптимизации, и прогноза, и диагностики оборудования.

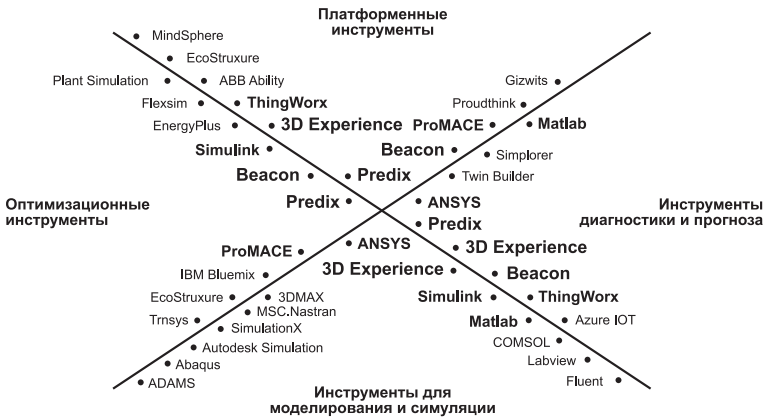


Рис. 2.32. Инструменты для построения сервисов ЦД.
Источник: QinglinQia, FeiTaоa

В категории «Платформенное ПО» указаны ведущие промышленные IoT-платформы от производителей, которые обладают значительным опытом в промышленном производстве: Predix от General Electric, ThingWorx от PTC, MindSphere от Siemens. Все эти платформы часто упоминаются в публикациях, посвященных разработке цифровых двойников. Вероятно, нашим читателям менее знакома, но хорошо известная в Китае, промышленная интернет-платформа BEACON от Тайваньской компании FII (Foxconn Industrial Internet) – крупного поставщика профессиональных услуг по проектированию и производству оборудования для сетей связи, продуктов для облачных сервисов, высокоточных инструментов и промышленных роботов.

Здесь же отмечены и платформы, имеющие отраслевую специфику. Так, например, платформа ProMACE предназначена для построения решений в нефтяной и химической промышленности.

MATLAB, который обеспечивает решение широкого класса задач, включая задачи оптимизации, решения дифференциальных уравнений и ряд других ключевых математических инструментов, отмечен и как инструмент математического моделирования, и как инструмент диагностики и прогноза.

В приведенных выше примерах приложений для создания ЦД представлен опыт ограниченного круга компаний. В третьей главе будут даны примеры построения ЦД для разных отраслей с указанием соответствующего инструментария, что расширит ответ на вопрос о том, какое ПО необходимо для построения ЦД.

Зарубежные поставщики комплексных решений класса ЦД

В этом разделе речь пойдет о компаниях, которые позиционируют себя как поставщиков законченных решений класса «Цифровой Двойник», которые они создают сами или в партнерстве.

Кто эти компании? Во-первых, это крупнейшие многоотраслевые производственные корпорации, которые сами являются производителями сложного технологического оборудования, имеют подразделения, разрабатывающие высокотехнологичное ПО, и сталкиваются с необходимостью создания ЦД для своих нужд (наиболее яркие представители – это Siemens и General Electric). Во-вторых, это многопрофильные ИТ-компании, имеющие целый спектр инструментов, которые они пытаются объединить между собой, создавая ЦД в том числе в рамках альянсов с партнерами. В-третьих, это компании, которые имеют экспертизу в области CAD/CAM/CAE и пытаются дорастить свои решения до уровня ЦД, часто также в партнерстве с владельцами IoT-платформ. В-четвертых, это так называемые «Pure players» фирмы, которые ориентированы именно на создание решений класса ЦД в отдельных отраслях. В-пятых, это компании, которые занимаются интеграцией решений от третьих производителей, накапливают экспертизу в области построения математических моделей физических процессов и предоставляют услуги консалтинга в построении подобных моделей, а также высокоуровневые сервисы полного цикла – от построения модели до проведения расчетов – на собственном высокопроизводительном вычислительном оборудовании. Рассмотрим основные из вышеупомянутых групп.

Производители промышленного оборудования, разработчики ЦД

Крупнейшими разработчиками – лидерами рынка ЦД, которые стояли у истоков технологии цифровых двойников, многие аналитики⁷⁹ называют компании Siemens и General Electric. Это корпорации, которые исторически одними из первых вышли на рынок ЦД и остаются на нем технологическими лидерами. Обе компании вы-

⁷⁹ В том числе аналитики из Market Research Future, Grand View Research.

пускают собственное высокотехнологичное крупногабаритное оборудование, логика развития и оптимизации которого потребовала применения ЦД. Это компании, которые предлагают большинство компонентов, необходимых для создания ЦД, включая приложения промышленного интернета вещей (IIoT), расширенную аналитику и облачные платформы. Кроме того, их глобальная величина и возможности для поддержки крупных конечных пользователей делают их высококонкурентными игроками.

Siemens AG

Siemens AG имеет разработки в целом ряде областей, включая электротехнику, электронику, энергетическое оборудование, транспорт, медицинское оборудование, а также оказывает специализированные услуги в различных областях промышленности, транспорта и связи, активно внедряет свои разработки на собственных производствах.

Siemens имеет экспертизу и программные инструменты для создания ЦД для стадии проектирования, производства и эксплуатации (рис. 2.33).

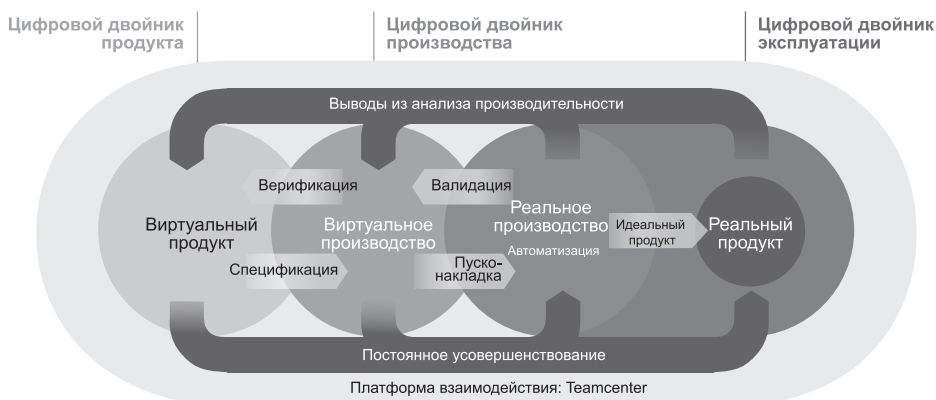


Рис. 2.33. Компетенции Siemens по созданию ЦД-продукта, ЦД-производства и эксплуатации. Источник: Siemens

Компания имеет инструментарий для поддержки всех этапов создания технологии цифрового двойника на уровнях PLM, MES⁸⁰/OM⁸¹ и TIA⁸² (рис. 2.34).

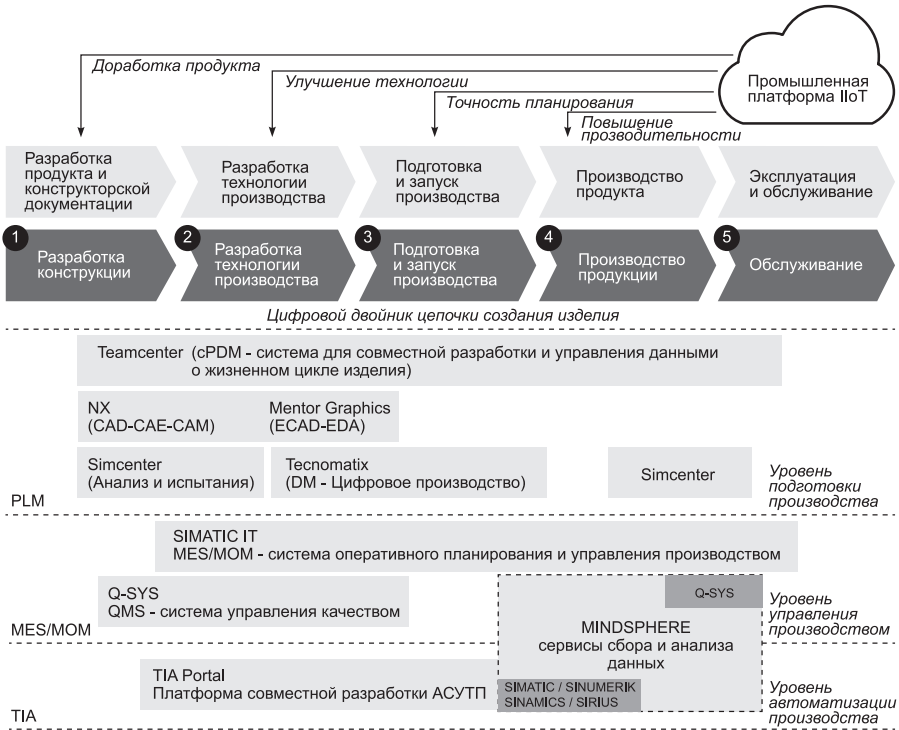


Рис. 2.34. Стек технологий Siemens для создания ЦД. Источник: Siemens

На уровне проектирования и подготовки производства Siemens располагает широкой линейкой инструментов, включая такие продукты, как NX, Simcenter, Technomatix и Teamcenter, а также продукты компании Mentor Graphics, которая принадлежит Siemens.

⁸⁰ MES (Manufacturing Execution System, система управления производственными процессами) – приложение для решения задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации выпуска продукции в рамках цеха или интегрированного управления производством на предприятии в целом.

⁸¹ MOM (Manufacturing Operations Management, управление производственным процессом) – методология, позволяющая повысить автоматизацию и прозрачность производственных процессов на предприятии, обеспечить взаимодействие между инженерными службами и производственными подразделениями предприятия.

⁸² TIA (Totally Integrated Automation) – комплексная автоматизация.

NX объединяет функции CAD, CAE и CAM на всех стадиях разработки изделий.

Simcenter – это набор приложений для инженерного анализа, включающий инструменты 3D-моделирования, проведения натуральных испытаний, обеспечения управления данными инженерного анализа, прогнозирования технических характеристик и поведения изделия. Сочетая математическое моделирование, физическое тестирование с анализом данных, Simcenter помогает создавать ЦД, которые более точно прогнозируют поведение и производительность продукта на всех этапах его жизненного цикла.

Под маркой Mentor Graphics на рисунке 2.34 обозначены продукты одноименной компании, которая выпускает программный инструментарий для большинства направлений проектирования электроники. С 2017 г. эта компания принадлежит корпорации Siemens.

Teamcenter – это пакет масштабируемых программных решений для поддержки жизненного цикла изделий, в основе которого лежит PDM-система, разработанная в компании UGS⁸³.

SIMATIC IT⁸⁴ – это решение для создания системы управления производственными процессами и интеллектуальной производственной аналитики, предлагающее механизмы взаимодействия с бизнес-системами и с системами управления автоматикой.

Siemens обладает собственной открытой облачной IoT-платформой MindSphere, которая предлагается в виде PaaS⁸⁵, и предоставляет экосистеме партнеров возможность разрабатывать и предоставлять заказчикам новые приложения.

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) – интегрированная среда разработки программного обеспечения систем автоматизации технологических процессов от уровня приводов и контроллеров до уровня человеко-машинного интерфейса, реализует концепцию ком-

⁸³ В 2007 г. концерн Siemens AG приобрел компанию UGS Corp. — разработчика программного обеспечения PLM и PDM, за \$ 3,5 млрд, в результате UGS Corp. стала Siemens PLM Software и вошла в состав департамента Siemens Industry Automation Division. Позднее Siemens PLM Software стала называться Siemens Digital Industries Software.

⁸⁴ Решения Camstar, SIMATIC IT, Preactor, QMS Professional и R&D Suite теперь выпускаются под общим названием Opcenter.

⁸⁵ Platform as a Service (PaaS, «платформа как услуга») — модель предоставления облачных вычислений, при которой потребитель получает доступ к использованию информационно-технологических платформ: операционных систем, систем управления базами данных, связующему программному обеспечению, средствам разработки и тестирования, размещенным у облачного провайдера.

плексной автоматизации и развивает семейство систем автоматизации SIMATIC⁸⁶ компании Siemens.

Siemens внедрила свои решения на базе цифровых двойников в целом ряде компаний.

В частности, компания Maserati использует решение класса ЦД на базе технологий Siemens NX, Tecnomatix, SIMATIC IT MES и TIA Portal. С помощью цифровой модели производится управление процессом производства модели Maserati Ghibli. Компоненты автомобиля разрабатывались в среде NX, производственные процессы моделировались в деталях с использованием Tecnomatix, процессы автоматизации проектировались в среде разработки Siemens TIA Portal. Сложные процессы производства были спланированы и оптимизированы, а также контролировались с помощью программного обеспечения SIMATIC IT MES.

Среди клиентов Siemens по построению решений класса ЦД также находится компания Mechanical Solutions Inc. (MSI), которая специализируется на турбомашинах. Она использовала программное обеспечение Simcenter STAR-CCM+ для CFD-моделирования и анализа характеристик проектируемых турбомашин в промышленных условиях. С помощью этого программного обеспечения дизайнеры могут проводить анализ наиболее сложных потоков в гидравлической турбине и прогнозировать производительность на ранних этапах цикла проектирования, снижать зависимость от нескольких физических прототипов и дорогостоящих испытаний.

В России создаются сложные инновационные продукты, решаются новые задачи на базе технологий Siemens, в том числе ведутся проекты, в рамках которых создаются цифровые двойники того или иного уровня адекватности реальным объектам. В частности, подобный проект выполняется на предприятиях «КАМАЗа». ОАО «КАМАЗ» применяет ряд программных продуктов компании Siemens PLM Software, включая NX, Teamcenter и Tecnomatix, предназначенные для цифрового моделирования процесса производства и сборки грузовиков. На основе инструментария NX, NX CAM и Teamcenter была создана сквозная цепочка «проектирование – производство», включая проектирование технологических процессов изготовления и сборки изделия, проектирование и изготовление оснастки, расчет

⁸⁶ SIMATIC — торговая марка концерна Siemens, объединяющая различные средства промышленной автоматизации, предназначенные для решения задач автоматизации технологических процессов производств и предприятий.

управляющих программ для станков с ЧПУ, подготовку классификаторов и библиотек.

Технологии Siemens класса ЦД применяются в КБ им. Ильюшина, на Улан-Удэнском авиационном заводе, в корпорации «Иркут» [133]. Цель разработки виртуальной интегрированной модели самолета – обеспечение возможности комплексного анализа и оптимизация работы систем самолета при выполнении полетного задания. Simcenter Amesim позволяет смоделировать полный полетный цикл самолета: подготовку к вылету, выполнение полетного задания и посадку с учетом взаимодействия всех систем самолета.

General Electric

General Electric (GE), еще один пионер в области разработки технологии ЦД, – многоотраслевая корпорация, производитель многих видов техники, включая энергетические установки (в том числе атомные реакторы), газовые турбины, авиационные двигатели, медицинское оборудование, а также продукцию военного назначения, поставщик широкого спектра цифровых технологий.

Штат компании насчитывает более 333 тысяч человек, работающих в 180 странах мира.

GE является членом Индустриального интернет-консорциума, который работает над развитием и использованием промышленных интернет-технологий и ЦД на их основе.

В 2015 г. General Electric создала обособленное подразделение для разработки ПО (GE Digital [134,135]), которое развивает возможности применения цифровых решений в области промышленного интернета и технологии «Цифровой двойник», обеспечивающей создание интеллектуального производства с использованием анализа больших данных (Big Data), а также физических и статистических моделей работы оборудования для своевременного обнаружения неисправностей и прогнозирования технического состояния оборудования.

GE инвестировала более миллиарда долларов [136] в разработку облачной IIoT-платформы Predix для сбора и анализа большого объема данных, получаемого с датчиков на промышленном оборудовании (рис. 2.35).

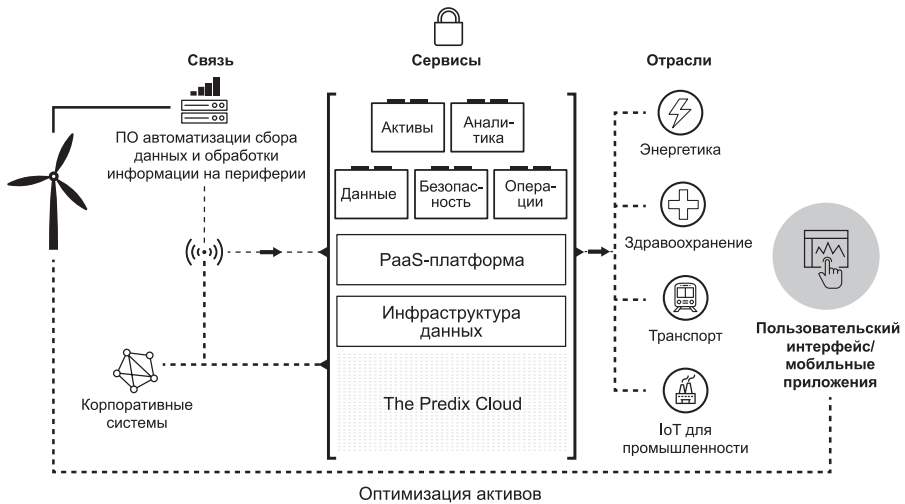


Рис. 2.35. Принципиальная схема IoT-платформы Predix.
Источник: GE

На базе Predix компания развернула тысячи цифровых двойников⁸⁷ (в разных отраслях экономики – в энергетике, в индустрии авиационных двигателей, в индустрии железнодорожного транспорта).

GE предлагает комплекс цифровых решений для управления эффективностью производственных активов (Asset Performance Management/APM), включающий линейку продуктов Meridium, SmartSignal, CSense [137].

Программное обеспечение управления эффективностью активов APM (Asset Performance Management) на базе Predix использует систему предиктивной аналитики. APM обеспечивает повышение операционной эффективности за счет объединения разрозненных источников данных в единое информационное пространство, позволяет анализировать эту информацию и предотвращать дорогостоящие отказы, а также максимально эффективно использовать активы в течение всего их жизненного цикла.

Системы, реализованные на основе решений Asset Performance Management, функционируют на крупнейших промышленных предприятиях, таких как BP, TOTAL, Chevron, СИБУР, Statoil⁸⁸, Delta Airlines. General Electric развивает технологию ЦД и использует это

⁸⁷ Базирующихся преимущественно на технологии цифровых теней, о чем, в частности, говорит и само наименование – IoT-платформа Predix (прим. научного редактора).

⁸⁸ С мая 2018 г. имя Statoil было изменено на Equinor.

программное обеспечение для администрирования и анализа данных с ветряных турбин, нефтяных вышек, самолетов и других объектов. Например, система, которую компания предлагает клиентам из авиационной промышленности, позволяет собирать для каждого двигателя данные о полете, передающиеся в центр обработки данных, позволяя обнаруживать потенциальные дефекты или неисправности уже во время полета. В частности, в компании был создан цифровой двойник двигателя GE90 (самого мощного двигателя GE Aviation), который используется в больших дальнемагистральных самолетах Boeing 777. ЦД позволяет оптимизировать обслуживание лопаток авиационного двигателя, которые со временем получают повреждения, особенно при эксплуатации в странах Ближнего Востока, где самолеты сталкиваются с наличием большой концентрации песка в воздухе.

ЦД позволяет предсказать, как со временем лопатка будет деградировать, что дает возможность своевременно сообщать о необходимости ее замены до возникновения проблем.

На основе платформы Predix GE реализовала решение для управления ветроэлектростанцией (Digital Wind Farm, «Цифровая ветроэлектростанция»), которое представляет собой цифровую инфраструктуру для отслеживания и оптимизации работы ветроэнергетических установок, а также для раннего диагностирования возможных неполадок [138].

Являясь крупнейшим в мире поставщиком оборудования для производства электроэнергии, GE разработала ЦД электростанции Digital Power Plant, чтобы помочь операторам повысить производительность при управлении станциями.

Digital Power Plant включает в себя математическое моделирование критичных компонентов станции, а также строит экономическую модель, которая учитывает стоимость топлива и цену на электроэнергию, что, по свидетельству разработчиков, позволяет операторам выполнять многокритериальную оптимизацию работы станции.

GE также создала цифровой двойник своего локомотива серии Evolution⁸⁹ под названием Trip Optimizer, который позволяет оптимизировать поездку (производит расчет оптимальных скоростей и уровней расхода топлива) на основе имеющегося расписания и посто-

⁸⁹ В 2019 г. бизнес GE Transportation был продан Wabtec. ЦД, конечно же, остались, просто теперь их использует Wabtec.

янно собираемых и анализируемых в режиме реального времени данных о состоянии тягового двигателя подвижного состава, о погодных условиях и т. д. GE внедряет технологию ЦД в разных отраслях. Например, подразделение General Electric Industrial Solutions участвовало в создании ЦД высоковольтного выключателя. Разработанная модель позволила моделировать электромагнитные, механические и гидродинамические процессы, протекающие внутри выключателя, провести сотни виртуальных тестов, чтобы найти и устранить недостатки и потенциальные уязвимости изделия, сократить время вывода нового продукта на рынок [139].

Emerson

Среди крупных компаний производителей тяжелого оборудования, занятых в сфере разработки ЦД, следует также упомянуть компанию Emerson – транснациональную корпорацию, предлагающую технологические решения для промышленных, коммерческих и потребительских рынков и объединяющую более 200 производственных предприятий.

В начале 2018 г. Emerson получила звание «Компания года в области промышленного интернета вещей» за инновационные решения в области внедрения IIoT на предприятиях нефтегазовой, пищевой, химической, энергогенерирующей и ряда других отраслей.

Компания разрабатывает решение Emerson Digital Twin (цифровой двойник Emerson), которое является цифровым представлением физических активов предприятия (технологического оборудования, контрольно-измерительных приборов и средств управления) и процессов, происходящих внутри него (химические реакции, процессы сепарации и теплообмена). По словам президента подразделения Power & Water Solutions Emerson, ЦД, над которым работает компания последние шесть лет, будет иметь около 10 млн строк кода [140].

Решение Emerson Digital Twin отличают независимость от поставщика системы автоматизации, избирательный подход к точности моделей в зависимости от цели проекта и процесса, облачная реализация на основе виртуальной среды (VMware, Hyper-V или Citrix) или на базе облачного решения Emerson. Многопользовательская поддержка делает сервис удобным для распределенных команд.

Digital Twin от Emerson поддерживает потребности разработки систем управления, предоставляя распределенным группам доступ,

независимо от их местоположения. Решение на базе динамического моделирования используется для проектирования внедряемых процессов, автоматизации тестирования, а также для виртуального обучения операторов этих процессов. Решение Emerson Digital Twin разработано для широкого спектра отраслей и операций, которые обслуживает компания, и активно используется в таких отраслях, как химическая, пищевая, целлюлозно-бумажная промышленность, добыча полезных ископаемых, переработка нефти и газа, нефтепереработка и нефтехимия.

ИТ-гиганты, имеющие ЦД направление

В данной группе будут также рассмотрены три компании – это инновационные компании, лидеры ИТ-рынка в своих направлениях – IBM, SAP и Microsoft.

IBM

Компания IBM – один из крупнейших в мире производителей и поставщиков аппаратного и программного обеспечения, ИТ-сервисов и консалтинговых услуг. Компания также была одной из первых в области развития технологий ЦД. По свидетельству сотрудников компании, компетенции IBM в области создания ЦД развиваются еще со времен крупномасштабного проекта, выполненного в 90-х гг. прошлого века для норвежской компании Statoil Hydro.

Сегодня компания реализует решения класса ЦД на основе объединения средств моделирования и управления объектами IBM Maximo; IoT-средств для объединения операционных данных и превращения их в информацию на базе программного обеспечения IBM Internet of Things; а также средств предсказательной аналитики и машинного обучения на базе сервисов IBM Watson IoT.

Основные элементы решения класса ЦД показаны на рис. 2.36.

Платформа IBM Watson IoT Platform является основой для интеграции возможностей средств комплексного моделирования и управления, IoT-инструментов и приложений предсказательной аналитики.

Программное обеспечение IBM Maximo служит для обеспечения управления жизненным циклом крупных физических объектов и работает в интеграции с платформой IBM Watson IoT Platform.

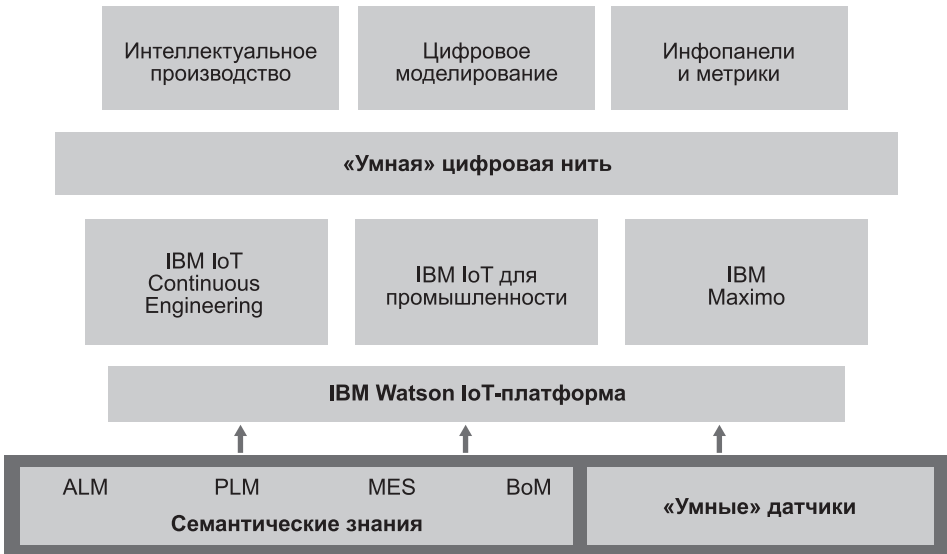


Рис. 2.36. Принципиальная схема IBM Cognitive Twin. Источник: IBM

ПО IBM Maximo дополнено возможностями интеграции с приложением IBM Power Artificial Intelligence (PowerAI) и с решением IBM «дополненная реальность» (IBM AR (Augmented Reality)). Приложение PowerAI упрощает доступ к технологиям глубокого обучения, позволяет получить преимущества от использования искусственного интеллекта при создании решений класса ЦД. Оно совмещает в себе шаблоны глубокого обучения, инструменты разработки элементов искусственного интеллекта и возможности анализа и управления большими объемами структурированных и неструктурированных данных с помощью высокопроизводительных серверов IBM Power Systems.

IBM IoT Continuous Engineering – это набор средств разработки, для совместного создания интеллектуальных систем. Инструменты инженерного анализа охватывают жизненный цикл разработки систем, включая управление требованиями, дизайн и моделирование, управление качеством, управление конфигурацией, планирование и управление совместной работой.

Практическая реализация концепции ЦД на базе технологий IBM для управления жизненным циклом сложных промышленных объ-

ектов ведется в ряде стран. Например, проект постройки, обустройства и управления прибрежной газодобывающей инфраструктурой в Австралии (Shevron Gorgon), ведущийся совместно с норвежской StatOil, а также проекты с Boeing (США) и иные.

В России в рамках работы над концепцией цифровых двойников компания IBM взаимодействует с ПАО «Газпром нефть».

SAP

Компания SAP – один из крупнейших производителей корпоративного программного обеспечения, предлагает набор продуктов для создания решений класса ЦД, а также их интеграции с другими корпоративными системами, процессами и сетями с помощью таких решений, как SAP S/4HANA Cloud, SAP Product Lifecycle Management, SAP Digital Manufacturing, SAP Asset Intelligence Network и ряда других.

SAP предлагает платформу, объединяющую в ЦД разные ракурсы представления информации об объекте (рис. 2.37).

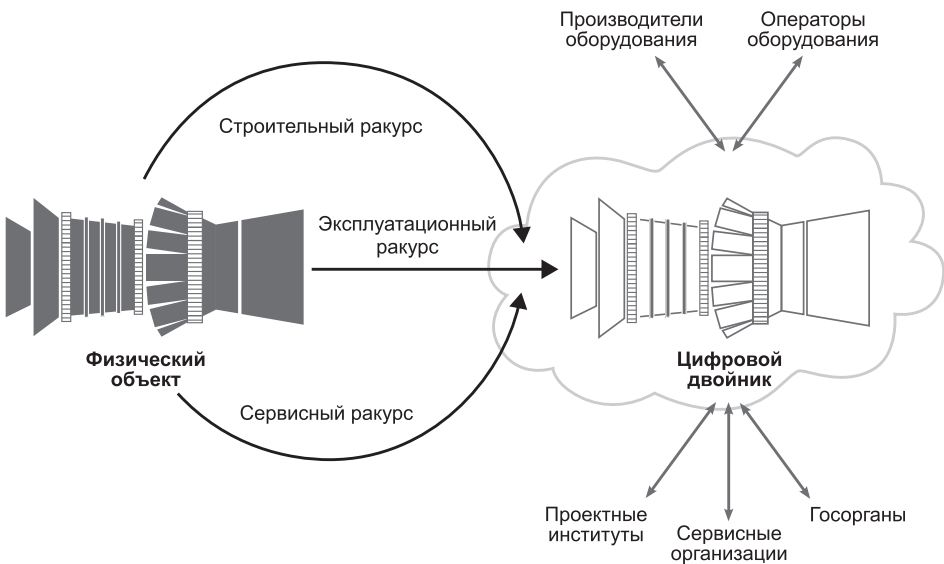


Рис. 2.37. Разные ракурсы/срезы представления информации для ЦД разных типов. Источник: SAP

Каждый ракурс имеет свой набор задач (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Содержание разных ракурсов (срезов) информации, представляемой в ЦД. Источник: SAP

Строительный ракурс	Эксплуатационный ракурс (как эксплуатируется)	Сервисный ракурс (как обслуживается)
Сбор и управление идеями	Режимы работы оборудования	Объемы работы
Эскизное проектирование	Регистрация неисправностей	Строительство объектов
CAD/чертежи	Графики вывода в ремонт	ТОиР, модернизация и реконструкция
Инженерная спецификация	Плановые и аварийные наряд-заказы	Изготовление и восстановление запасных частей
3D-модели	Ресурсное планирование и диспетчеризация	Ресурсное управление
Характеристики запасных частей и материалов	Интеграция с АСУ ТП	Контроль качества
	Прогнозирование технического состояния	

SAP обладает набором решений, которые позволяют объединить все три ракурса цифрового двойника. В качестве примера на рисунке 2.38 представлен перечень продуктов SAP, используемый для реализации эксплуатационного ракурса ЦД.

В решении (рис. 2.38) использованы следующие программные продукты: SAP 3D Visual Enterprise – программа для работы с трехмерными данными; SAP FICO (Finance and Controlling) – финансы и контроллинг; SAP PdMS (Predictive Maintenance & Service) – предиктивное обслуживание и сервис; SAP WM (Automated Warehouse Management) – автоматизированное управление складом; SAP MII (Manufacturing Integration and Intelligence) – интеграционная платформа сбора и интеллектуальной обработки данных о производстве; SAP MRS (Multiresource Scheduling) – система планирования и распределения людских и производственных ресурсов на уровне рабочих мест и групп.

SAP разрабатывает комплект приложений, призванный помочь операторам, производителям и сервисным компаниям внедрить в си-

стеме управления активами предприятия цифровое отображение оборудования, стандартизировать управление оборудованием, оптимизировать техническое обслуживание, реализовать совместную разработку и выполнение комплексных процедур установки и технического обслуживания, внедрить сетевые сервисы для управления оборудованием, проведения анализа эффективности его работы, получения обратной связи и внесения конструктивных усовершенствований [141].

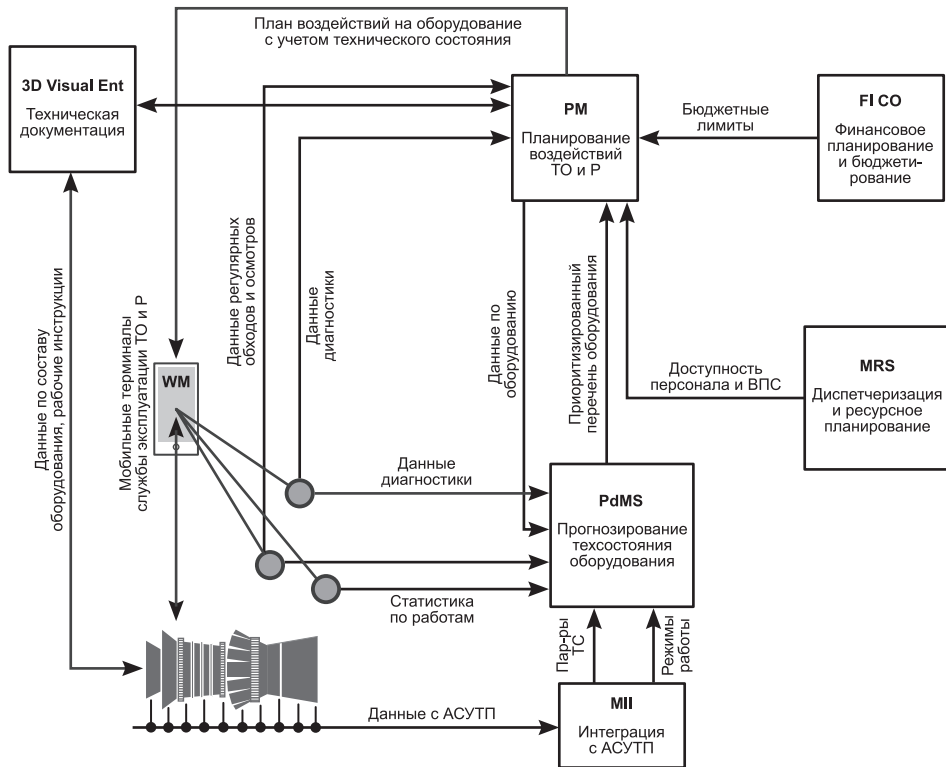


Рис. 2.38. Решение SAP для реализации эксплуатационного ракурса цифрового двойника. Источник: SAP [142]

Третья компания, которую мы рассматриваем в данной категории, – это Microsoft, она имеет широкий набор продуктов, на основе которых могут строиться решения класса ЦД. Компания разрабатывает облачные и мобильные приложения, системы аналитики и искусственного интеллекта, системы виртуальной реальности, а также

комплексное решение HoloLens, которое используется в комплексных системах класса ЦД.

Microsoft

Microsoft является разработчиком платформы Azure IoT, которая представляет собой коллекцию управляемых облачных служб, позволяющих подключать ресурсы интернета вещей, отслеживать их состояние и управлять ими. Весной 2019 г. Microsoft объявила, что в течение следующих четырех лет инвестирует 5 млрд долл. в IoT с тем, чтобы упростить процесс внедрения IoT-решений. В том же году Microsoft разработала платформу Azure Digital Twins – службу интернета вещей Azure, которая обладает виртуальными представлениями физических сред, связанных устройств, датчиков и пользователей. С помощью Azure Digital Twins можно создавать виртуальные модели реального мира, передавая связи между людьми, местами и устройствами в пространственном интеллектуальном графе. В Azure Digital Twins доступны шаблоны схем данных, которые позволяют ускорить создание отраслевых решений, благодаря чему клиенты могут сократить расходы на разработку своего приложения и быстрее разворачивать его для разных объектов, таких как стадион, завод или электросеть.

Работая на базе платформы Azure Digital Twins, клиенты могут запрашивать данные не с разрозненных датчиков, а с объектов, определяемых графом, задавать и выполнять функции, которые создают уведомления или события для определенных конечных точек в среде на основании телеметрических сообщений от различных устройств и датчиков.

Платформа Azure Digital Twins позволяет создавать решения категории «цифровой двойник», которые можно масштабировать и реплицировать для нескольких клиентов.

Области применения технологии цифровых двойников на базе платформы Azure Digital Twins объединяет ряд направлений, включая проектирование, строительство и эксплуатацию зданий или инфраструктуры для более эффективного управления (городами, кампусами, инфраструктурой, ресурсами, помещениями). Следует также отметить, что на базе Azure Digital Twins могут создаваться решения в области оптимизации энергоресурсов, включая управление энергией в зданиях, диагностическое обслуживание и обеспечение без-

опасности зданий, для эффективного проектирования и использования пространства. С помощью цифровых копий рабочих пространств можно решать такие задачи, как поиск пути, резервирование помещений и управление климатом.

Крупные компании с профильной экспертизой в CAD/CAM/CAE/AEC

Компании с экспертизой в CAD/CAM/CAE мы уже неоднократно упоминали как поставщиков программного обеспечения для построения ЦД. В этом разделе мы более подробно остановимся на компетенциях четырех компаний (ANSYS, Dassault Systemes, PTC и Bentley Systems), делая упор на их возможностях выступать в качестве поставщиков законченных решений цифровых двойников.

ANSYS

Международная компания ANSYS Inc. со штаб-квартирой в штате Пенсильвания (США) образована в 1970 г. В ней работают более 4000 человек, и она предлагает одну из наиболее широких линеек для математического мультифизического моделирования.

Программное обеспечение ANSYS используется для проведения расчетов в широком спектре дисциплин, включая такие направления, как прочность, долговечность, теплообмен, динамика жидкости и газов, электромагнетизм.

Как мы уже отметили выше, способность развить компетенции в создании решений класса ЦД в существенной мере зависит от умения решать мультифизические (мультидисциплинарные) задачи. В этом плане ANSYS имеет уникальные позиции. В 2000 г. компания существенно расширила свои возможности, объединив в себе достижения множества успешных компаний, занимающихся проектированием, получила дополнительные технологии для математического моделирования процессов гидродинамики и других физических процессов, а также проектирования электроники. В частности, в 2006 г. ANSYS Inc. приобрела компанию Fluent Inc. и ее инструменты для моделирования гидродинамики, а также купила Ansoft Corporation, специализирующуюся в проектировании электроники. В 2011 г. ANSYS приобрела бывшего конкурента Apache Design Solutions, специализирующегося на программном обеспече-

нии для моделирования интегральных схем, электронных модулей и печатных плат.

В основе разработок компании лежат методы для решения задач линейной и нелинейной, стационарной и нестационарной механики деформируемого твердого тела и механики конструкций (включая нестационарные нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач гидрогазодинамики, теплообмена, электродинамики, акустики, а также междисциплинарный анализ. Программный комплекс ANSYS дополнен инструментами численного анализа аддитивных технологий (3D-печати) и конструирования материалов, включая композиционные материалы. Платформа ANSYS позволяет проектировать и оптимизировать изделия для производства методом 3D-печати из различных материалов.

Компания ANSYS Inc. на основе доказавших свою эффективность инструментов предлагает комплексные решения для разработки и внедрения цифровых двойников. Модуль ANSYS Twin Builder используется как платформа для построения, проверки и разворачивания систем ЦД для организации предиктивного обслуживания изделий по их фактической эксплуатации. ANSYS Twin Builder позволяет проводить обслуживание и оптимизировать работу изделия по его фактическому состоянию с целью снижения страховых и гарантийных затрат. Для соединения цифрового двойника с измерительным оборудованием и получением данных в реальном времени Twin Builder интегрируется с платформой промышленного интернета вещей (IIoT).

Платформа моделирования ANSYS работает с рядом популярных IoT-платформ, включая PTC ThingWorx и General Electric Predix. У ANSYS есть опыт работы с PTC, в рамках которого компании, в частности, продемонстрировали, как численная модель рабочего насоса может помочь диагностировать и решать эксплуатационные проблемы быстрее, чем обычный метод проб и ошибок.

ANSYS активно сотрудничает с крупнейшими компаниями, имеющими задел в технологии ЦД.

В 2016 г. ANSYS Inc. объявила о начале сотрудничества с General Electric (GE) для развития концепции ЦД. Сотрудничая с корпорацией GE, компания ANSYS Inc. интегрировала свою платформу для инженерного моделирования с GE Predix для промышленных объектов корпорации. По данным GE, реализация ЦД на базе решений

ANSYS и платформы PTC существенно увеличивает эффективность ЦД-решений.

PTC

PTC Inc. (прежнее название Parametric Technology Corporation) – международная компания – разработчик программного обеспечения для двумерного и трехмерного проектирования (CAD), управления жизненным циклом изделий (PLM), управления обслуживанием (SLM) и управления жизненным циклом программных приложений (ALM).

В компании работают около 6 тысяч человек в тридцати странах.

К основным линейкам продуктов компании относятся PTC Creo (CAD), PTC Windchill (PLM), PTC Mathcad (инженерные расчеты), PTC Integrity (ALM), PTC Servigistics (SLM) и PTC Arbortext (работа с технической документацией). Кроме этого, компания располагает несколькими технологическими платформами для интеллектуальных сетевых устройств, операций и систем: ThingWorx и ThingWorx Converge (разработка и развертывание IoT-приложений), и ColdLight (анализ больших данных).

PTC имеет компетенции сразу в двух направлениях, важных для создания решений уровня ЦД, – в области инжиниринга и в области IoT. PTC активно сотрудничает с компаниями, имеющими задел в сфере цифровых двойников и, прежде всего, с ANSYS и GE.

В 2018 г. PTC объявила также о партнерстве с Rockwell Automation. Сделка включала инвестиции в 1 млрд долл. от Rockwell и привела к появлению совместного решения FactoryTalk InnovationSuite, созданного на основе интеграции платформ Rockwell по аналитике и управлению производственными операциями (MOM) с платформой PTC ThingWorx IoT.

FactoryTalk InnovationSuite осуществляет возможность контроля за производственным процессом и состоянием систем с использованием единого источника информации для всего предприятия, визуальный контакт с оборудованием, что обеспечивает полное цифровое отображение производства.

В совместное предложение входят платформы FactoryTalk для аналитики и управления производством, платформа PTC ThingWorx для промышленного интернета вещей на базе технологий связи Kerware и технологий дополненной реальности Vuforia.

Dassault Systèmes

Французская компания Dassault Systèmes является одним из лидеров мирового рынка PLM и САПР, ежегодно продавая продукты и услуги на сумму более 1 млрд евро. Компания (в которой трудится около 8 тысяч сотрудников) имеет более 115 тысяч корпоративных клиентов в 80 странах.

Dassault Systèmes развивает платформу 3DEXPERIENCE, на базе которой ее клиенты создают свои решения класса цифровой двойник. Платформа 3DEXPERIENCE от Dassault Systèmes обеспечивает детальное моделирование крупномасштабных объектов. Все элементы платформы доступны через единый облачный интерфейс, который связывает маркетинг, продажи и инжиниринг, предлагая каждому отделу одинаковые 3D-проекты, операционный анализ и инструменты для совместной работы. Технология Dassault Systèmes позволяет обмениваться знаниями всем участникам на протяжении всего жизненного цикла разработки изделия. Платформа 3DEXPERIENCE может работать в облаке или в локальной сети предприятия. Платформа поддерживает отраслевые решения, собранные из программных продуктов для трехмерного проектирования, моделирования и аналитики.

Среди клиентов Dassault Systèmes есть такие крупные компании, как McDermott International, которая использует платформу 3DEXPERIENCE для создания цифрового двойника в инфраструктуре нефтегазового комплекса. McDermott является одним из ведущих поставщиков технологических, инженерных и строительных решений для энергетической промышленности, занимаясь проектированием, а также созданием комплексных инфраструктурных и технологических решений для транспортировки и переработки нефти и газа.

Для создания более полных решений класса ЦД Dassault Systèmes сотрудничает с ключевыми разработчиками в этой сфере. Так, в 2019 г. компании Dassault Systèmes и ABB объявили о начале партнерства, в результате которого они смогут предложить клиентам расширенный портфель продуктов, в том числе и для создания решений класса «цифровой двойник». Партнерство позволит объединить сильные стороны цифровых решений ABB Ability и платформы Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE.

Альянс также позволяет Dassault Systèmes подключиться к обширной сети партнеров ABB, занимающихся внедрением цифровых

технологий в промышленности, в которую входят такие компании, как Microsoft, HPE и IBM [143].

Dassault Systèmes имеет сильные позиции в секторе АЕС (Architecture, Engineering and Construction). По заказу госструктур Республики Сингапур она создала крупнейший проект «ЦД Сингапура» – полный цифровой двойник города Сингапура, который включает в себя геометрические и топологические данные, данные об окружающей среде, а также различную дополнительную информацию о городской инфраструктуре и ее работе – от схем движения транспорта до климатических условий. Более подробно об этом проекте можно прочесть в третьей главе.

Помимо Dassault Systèmes, возможностями для создания цифровых двойников в секторе АЕС обладают такие компании, как Autodesk и Bentley, которые развили свои 3D CAD-продукты до такого уровня, что могут создавать цифровые модели не только отдельных зданий, но и нескольких кварталов.

В задачах АЕС очень важен оперативный сбор данных о строящихся объектах для их применения в ЦД. Данные, которые используются в цифровом двойнике, должны быть актуальными, что говорит о необходимости их синхронизации с изменением условий в реальном физическом объекте. То есть цифровые двойники должны синхронизировать отражение как физической реальности объекта, так и его инженерно-технических данных.

Зафиксировать меняющуюся трехмерную физическую реальность актива в цифровом формате достаточно сложно. При этом используемая техническая информация быстро устаревает. Преодолеть данную проблему позволяют инструменты компании Bentley Systems.

Bentley Systems

Bentley Systems – это поставщик программных решений для развития проектирования, строительства и эксплуатации инфраструктурных объектов, включая автомобильные дороги, мосты, аэропорты, небоскребы, заводы и электростанции.

В 2018 г. Bentley Systems запустила сервисы iTwin Services и облачную службу цифровых двойников для инфраструктурных проектов PlantSight (результат общих разработок Bentley и Siemens на базе дополняющего друг друга программного обеспечения).

iTwin Services обеспечивает доступность инженерных данных

благодаря объединению технологий моделирования реальности и технологий сетевой визуализации. А для эксплуатации промышленных объектов Bentley совместно с Siemens объявили о создании облачной службы цифровых двойников PlantSight.

PlantSight предлагает комплексные услуги цифровых двойников для моделирования производительности активов предприятий на основе технологий AssetWise APM от Bentley, а также MindSphere и Teamcenter от Siemens.

PlantSight объединяет данные о предприятии и преобразовывает их в цифровой двойник, предоставляя наглядную информационную модель предприятия с помощью удобного в использовании облачного портала.

Данные о физических объектах, собранные с помощью лазерного сканирования, съемки с помощью беспилотных летательных аппаратов можно обрабатывать в программном обеспечении Bentley, создавая модели, где каждый цифровой компонент может быть автоматически размещен с геопространственной привязкой.

Bentley наращивает арсенал средств для построения цифровых моделей. В 2018 г. она приобрела шведскую компанию Agency9, специализирующуюся на создании цифровых двойников городов, а также разработчика программного обеспечения LEGION для моделирования движения пешеходов. Agency9 обеспечивает почти половину крупнейших городов Швеции облачными службами цифровых двойников для планирования городских объектов и сетевой 3D-визуализации.

Компания LEGION, которая работает более чем с 20 крупнейшими мировыми транспортными организациями, позволяет дополнить компетенции Bentley в области моделирования сценариев движения пешеходов.

Приложение LEGION предоставляет средства моделирования взаимодействия пешеходов друг с другом и с физическими препятствиями (включая транспортные потоки), в том числе в рамках эвакуации в общественных местах. Используя инструменты LEGION совместно с OpenBuildings Designer от Bentley, разработчики могут учитывать движение пешеходов при создании архитектурных проектов, принимать более эффективные решения для оптимизации пропускной способности и общей безопасности движения.

Небольшие компании, сфокусированные на ЦД

В этом разделе речь пойдет о так называемых pureplayers⁹⁰ – компаниях, для которых ЦД является профильным направлением. Каждая из таких компаний специализируется, как правило, в некоторой вертикальной индустрии. Мы представим четыре компании, создающие цифровые двойники для мониторинга состояния морских платформ (PhDsoft Technology), для моделирования и поддержки промышленных установок (Semantum), для проектирования технических систем (Mevea), для строительной техники, и подъемных механизмов, и даже виртуальных городов (Cityzenith).

PhDsoft Technology

PhDsoft Technology – разработчик программного обеспечения, занимающийся анализом состояния сложных объектов. Компания одной из первых вывела на рынок продукт класса «прогнозный ЦД» (Predictive Digital Twin). Основной свой продукт – C4D–решение, которое позволяет прогнозировать старение, коррозию, разрушение сложных объектов с течением времени, компания разрабатывает с 1993 г.

Сама компания обозначает свой профиль на рынке следующим образом: «Создаем 3D-модели и превращаем их в цифровой двойник».

Основная деятельность компании связана с мониторингом состояния морских платформ, объектов городской инфраструктуры, сложных металлоконструкций в энергетическом и нефтяном секторе с целью оценки рисков, связанных с состоянием объекта в реальном времени, управлением аномалиями и предиктивным ремонтом.

Semantum

Компания основана в 2007 г., расположена в Финляндии и специализируется на разработке программного обеспечения для математического моделирования и создания цифровых двойников промышленных установок.

Разработка в Semantum базируется на платформе с открытым исходным кодом Simantics, которая служит для ускоренного внедрения

⁹⁰ Компания, которая фокусируется на конкретном продукте, услуге или узком технологическом направлении.

инструментов моделирования промышленных производственных систем, а также математического моделирования физических процессов в научных исследованиях. Компания предлагает решения для автоматизации проектирования и для построения IIoT-систем, специализируется на разработке, обслуживании и интеграции инструментов системного моделирования и на предоставлении облачных решений для моделирования в качестве услуги. Semantum продвигает концепцию ЦД под собственным брендом «Live Virtual Twin» – комплексное решение для поддержки эксплуатации современных промышленных установок (рис. 2.39).

Данный ЦД базируется на моделировании физико-химических процессов для эмулирования работы крупных заводских установок. Концепция «Live Virtual Twin» подразумевает развитие и уточнение цифровой модели параллельно с модернизацией реального завода.



Рис. 2.39. Схема, поясняющая профиль деятельности компании Semantum. Источник: Semantum

На основе Semantum Live Virtual Twin могут создаваться виртуальные датчики, способные предоставить информацию о текущем состоянии исследуемой установки, которая не может быть получена с помощью физических датчиков. Базовую цифровую модель можно использовать для прогнозирования, в том числе объемов производства для регионов, в которых отсутствуют данные, полученные на основе физических измерений.

Semantum Live Virtual Twin можно использовать для разработки виртуальных тренажеров, обучающих операторов, для устранения неполадок или для оптимизации производства и диагностики отказов.

Mevea

Mevea – это финская высокотехнологичная компания, специализирующаяся на разработке технологий ЦД и имеющая опыт моделирования для проектирования технических систем. Основные компетенции: математическое моделирование динамики и гидравлики в реальном времени, моделирование взаимодействия машин и окружающей среды, человеко-машинный интерфейс с реальной системой управления.

Клиентами компании являются ведущие производители оборудования в различных отраслях промышленности, включая строительное оборудование, горнодобывающую промышленность, портовое и лесное хозяйство.

Например, на базе технологии Mevea Digital Twin в компании Normet был реализован проект создания цифрового двойника для разработки машины по нанесению (торкретированию⁹¹) бетона. Normet – инновационная компания, которая среди прочего занимается прокладкой подземных тоннелей. Применение технологии ЦД в Normet было обусловлено сложностью разрабатываемых машин, ростом степени автоматизации, необходимостью виртуального прототипирования и сокращения цикла разработки.

Используя технологию Mevea Digital Twin, компания Normet смогла значительно сократить время разработки, быстрее и с меньшими затратами выявить области потенциального отказа, расширить возможности обучения операторов на виртуальных моделях.

⁹¹ Торкретирование – способ бетонирования, при котором бетонная смесь под давлением и с высокой скоростью наносится на поверхность в один или несколько слоев.

Другой пример – это опыт применения технологии Mevea Digital Twin в компании Mantsinen, которая занимается гидравлическими портовыми погрузчиками. Использование технологии ЦД в компании было продиктовано сложностью разработки, необходимостью индивидуального подхода к каждому проекту, необходимостью проведения виртуальных испытаний продукта и обучения операторов.

Cityzenith

Основанная в 2009 г. чикагская компания Cityzenith является разработчиком продукта Smart World Pro, который служит для применения технологии ЦД в области архитектуры на всех этапах жизненного цикла изделия – от проектирования до сноса. Smart World Pro используется архитекторами, управляющими и владельцами недвижимости. В 2016 г. этот продукт получил награду Realcomm Digie Award за «Лучшую техническую инновацию в коммерческой/корпоративной недвижимости».

Решение на базе платформы Smart World Pro позволяет легко выполнять поиск на естественном языке по проектным данным, оперативно проводить анализ рентабельности инвестиций на основе искусственного интеллекта и машинного обучения, эффективно привлекать клиентов для заключения сделок.

Платформа Smart World Pro позволяет создавать собственные ЦД для всех типов объектов недвижимости (от портфелей недвижимости до целых городов); охватывает все аспекты развития недвижимости, включая выбор площадки, дизайн, планирование, строительство, эксплуатацию, техническое обслуживание, продажи и лизинг, обеспечивает визуализацию всей информации в этих активах и вокруг них.

Клиенты могут использовать решения SmartWorld Pro Digital Twin для агрегирования, запросов, визуализации и анализа данных на базе единой, простой в использовании информационной панели, настроенной в соответствии с потребностями клиента.

Партнерства и альянсы разработчиков для создания ЦД-решений

Поставщики ЦД, особенно те, кто работает в области автоматизации и инженерного проектирования, все чаще и чаще объединяются,

чтобы предлагать конечным пользователям полный набор цифровых продуктов и услуг. Проекты по созданию ЦД обычно требуют столь широкой экспертизы, что появляются альянсы, в том числе с привлечением экспертов из научных организаций и университетов. Кроме того, интеграция широкого спектра технологий стимулирует создание альянсов.

Мы уже перечислили ряд альянсов между владельцами IoT-платформ и компаниями – разработчиками инженерного ПО. Наиболее яркий пример в этом ряду – это сотрудничество ANSYS с GE Power Engineering.

Многие игроки рынка совмещают практику поглощения нишевых компаний, обладающих нужными компетенциями, с практикой формирования альянсов. Например, компания Altair (поставщик комплексного инженерного ПО для оптимизации производительности проектирования, разработчик платформы мультимедицинарного инженерного анализа Altair HyperWorks) приобрела компанию Carriots SL мадридского разработчика платформы Carriots IoT. На базе аналитики IoT-платформы Carriots, предиктивных моделей и виртуальных сенсоров на основе HyperWorks Altair создает решения класса «цифровой двойник предиктивного обслуживания» для ряда отраслей, включая авиационную. При этом Altair Engineering создала крупнейший альянс FEA/CAE/CFD/MBD/EMA-технологий в мире. Платформа HyperWorks Altair Engineering поддерживает сторонние приложения, так что пользователи HyperWorks могут запустить программу, входящую в партнерский альянс, который объединяет более 40 компаний-разработчиков [144].

В силу комплексного характера в ЦД-проектах часто объединяются несколько компаний. Крупные ИТ-компании привлекают небольшие фирмы с уникальной нишевой экспертизой. Так, например, компания Siemens активно сотрудничает с упомянутой ранее Semantum. В частности, проект WebTurbine, направленный на разработку цифрового двойника серии газовых турбин Siemens SGT-800, – это результат тесного сотрудничества между Semantum и Siemens Industrial Turbomachinery. Он был разработан специалистами Siemens в тесном сотрудничестве с Semantum и с использованием платформы Simantics.

PhDsoft Technology объединила усилия с Siemens в целях предоставления услуг для морских платформ по прогнозированию коррозии на базе технологии ЦД.

По всей вероятности, в будущем ведущие компании на рынке ЦД захотят разработать открытую архитектуру, которую они будут контролировать, и защищать, и позволять поставщикам нишевой экспертизы работать на базе подобной платформы.

Российские поставщики ПО для построения ЦД

Российский рынок ЦД находится в начальной стадии развития, и оценок его объема пока не существует. Однако в России существует целый ряд компаний, которые могут поставлять технологии, компоненты и отдельные продукты для построения ЦД.

Говоря о российских компаниях поставщиках ПО для построения решений класса ЦД, следует отметить сильные позиции отечественных разработчиков в области математического моделирования. В России существует хорошая математическая школа, есть много команд, которые давно и успешно занимаются разработкой систем инженерного ПО, есть коллективы, которые разрабатывают математические модели для описания бизнес-задач и оптимизации принятия управленческих решений.

Большинство научных институтов и вузов, существующих в России, создавали и продолжают разрабатывать математические и компьютерные модели изучаемых процессов и создают нишевые программные продукты в данной области (по большей части для внутреннего потребления). Крупнейшие отечественные научные центры, в том числе в атомной и авиационно-космической промышленности, создавали для своих нужд наукоемкое программное обеспечение для моделирования самых разных физических процессов, которое в последнее время, на волне принятой программы цифровизации и развития программы импортозамещения, переводится в отчуждаемые коммерческие продукты.

В России также достаточно много рыночных игроков – компаний, разрабатывающих ПО для своих клиентов в России и за рубежом, которое может использоваться для построения ЦД.

Аналитическая компания CIMdata относит Россию наряду с США, Китаем, Германией, Индией, Японией, Южной Кореей и Бразилией к группе стран, обладающих развитым программным обеспечением в области PLM, понимая под PLM весь спектр систем MCAD/CAM/CAE/PDM.

Из 100 компаний, входящих в АРПП⁹², 12 специализируются на инженерном софте: ADEM, Csoft Development, SDI Solution, АСКОН, «КванторФорм», «Нанософт», НТЦ АПМ, НТЦ ГеММа, «СИГМА Технология», ТЕСИС, «Фидесис», «Эремекс».

Правда, при этом, по данным [145], на отечественном рынке CAD/CAM/CAE заметную долю наряду с западными компаниями (PTC, Dassault Systèmes, Autodesk) имеет лишь компания АСКОН.

На российском рынке пока нет столь широкого спектра компаний-поставщиков, чтобы рассмотреть пять категорий ПО для построения ЦД (как это было сделано в предыдущем разделе), поэтому при обзоре поставщиков отечественного рынка мы ограничились двумя категориями: «ПО для построения виртуальной части цифрового двойника» и «ПО для построения остальных частей цифрового двойника».

ПО для построения виртуальной части цифрового двойника

Из числа отечественных коммерческих САД-систем следует прежде всего упомянуть программу Компас-3D от компании АСКОН и программу T-FLEX от компании Топ Системы.

Компас-3D – это универсальная система трехмерного моделирования, она находит свое применение при решении различных задач в технологическом и архитектурно-строительном проектировании. Достоинствами ПО является поддержка ГОСТ и ЕСКД при проектировании и оформлении документации, возможность интеграции с системами единого комплекса.

Программу T-FLEX CAD отличают мощные параметрические возможности трехмерного моделирования и продвинутые средства создания и оформления конструкторской документации.

Обе компании, АСКОН и Топ Системы, присутствуют на рынке уже около 30 лет, начинали свой путь с разработки САД-приложений и со временем разработали целый комплекс приложений класса «инженерное ПО».

В частности, компания АСКОН, помимо продукта Компас-3D, выпускает средство подготовки чертежей, схем, спецификаций (Компас-График), систему проектирования технологических процес-

⁹² Ассоциация Разработчиков Программных Продуктов «Отечественный софт» является крупнейшим объединением российских производителей программного обеспечения. Консультирует игроков рынка по ключевым вопросам развития ИТ-отрасли.

сов (Вертикаль), систему управления жизненным циклом изделия (Лощман: PLM) и ряд других продуктов.

Компания АСКОН является участником и одним из организаторов консорциума разработчиков инженерного программного обеспечения «РазВИТие» – независимого объединения российских ИТ-компаний, в которое, помимо АСКОН, входят такие компании, как НТЦ «АПМ», АДЕМ, ТЕСИС и ЭРЕМЕКС, занятые в создании единого мультивендорного российского CAD/CAM/CAE/PLM/MES-решения на базе существующих разработок. Консорциум является открытым сообществом и активно развивает партнерские отношения с компаниями, которые расширяют функциональность цифровой платформы «РазВИТия».

Участники консорциума развивают интеграцию компетенций, реализованных в продуктах компаний сообщества. По свидетельству разработчиков [146], комплекс «РазВИТие 2.0» – это интегрированное сквозное решение, которое относится к решению класса «Цифровой двойник на стадиях проектирования и производства». Этот уровень обеспечивается интегрированными решениями от компаний, составляющих консорциум (MCAD/ECAD/EDA/CAE/CAPP/CAM/MDM/PLM/MES). Решение построено на базе компетенций участников консорциума в области виртуальной и дополненной реальности, мониторинге технологического оборудования, интернете вещей (IIoT) и других областях.

Компания Топ Системы тоже выпускает сегодня целую линейку продуктов под маркой T-FLEX PLM – решение в области управления жизненным циклом изделий и организации деятельности предприятий. Отличительные черты системы – инструменты параметризации деталей и сборок, средства моделирования, механизм создания приложений без использования программирования, инструменты расчета и оптимизации конструкций, интеграция с другими программами комплекса T-FLEX PLM.

Комплекс программ T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM/CRM/PM/MDM/RM позволяет организовать работу на всех этапах жизненного цикла изделия.

Имея широкий набор инструментов, компания Топ Системы развивает компетенции в области создания решений класса ЦД. Например, на конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», которая прошла в 2019 г. на базе АНО «Техническая академия Росатома», компания

Топ Системы анонсировала проект «Технология создания цифрового двойника изделия из композиционных материалов с помощью российского программного комплекса T-FLEX PLM». Формирование цифрового двойника рассматривается на всем жизненном цикле изделий из композитов и предполагает возможности хранения всей информации по проектированию, производству, испытанию, эксплуатации, обслуживанию, а также для целей прогнозирования поведения этого изделия в изменяющихся условиях внешней среды по прошествии определенного времени с целью модификации конструкции [147] (рис. 2.40).

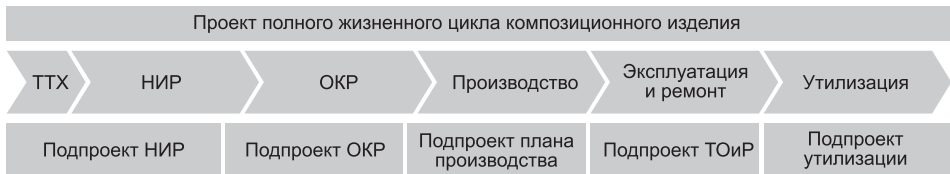


Рис. 2.40. Схема формирования цифрового двойника изделия из композиционного материала в среде T-FLEX PLM. Источник: Топ Системы

Говоря о специализированных САМ-приложениях отечественных разработчиков, следует назвать компанию «Спрут технология», которая более 20 лет выпускает российскую САМ-систему для автоматизации разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ SprutCAM. В SprutCAM программируют многокоординатные фрезерные, токарные, токарно-фрезерные, электроэрозионные станки и обрабатывающие центры. Система успешно внедрена на 6000 предприятий России, ближнего и дальнего зарубежья, приложение входит в пятерку лидеров по использованию на предприятиях в России.

В России есть целый ряд рыночных компаний разработчиков, фокусирующихся на разработке CAE-приложений, которые имеют солидный стаж на рынке. Например, научно-технический центр «АПМ» с 1992 г. специализируется на создании ПО инженерного анализа (CAE) под общей торговой маркой «АРМ» для разработки и анализа машиностроительных, приборостроительных, строительных и других объектов и оборудования. Решения ИТЦ АПМ охватывают математическое моделирование широкого спектра физических процессов: теплопередача, электромагнитные взаимодействия, течение жид-

кости, газа и др., включая проведение мультифизических расчетов, которые сочетают анализ физических явлений и механической прочности конструкций.

Примерно столько же существует на рынке компания НИЦ СтаДиО (основана в 1991 г. группой специалистов из «Гидропроекта», «Атомэнергопроекта» и ряда других организаций). Компания занимается разработкой математических моделей и расчетно-экспериментальных методов оценки прочности, устойчивости, надежности и безопасности ответственных объектов в области энергетики, строительства и машиностроения, а также развитием собственных конечно-элементных и суперэлементных программных комплексов (СТАДИО, АСТРА-НОВА). Основные заказчики и потребители наукоемкой продукции и услуг НИЦ СтаДиО – Госатомнадзор, Госэнергонадзор, Ростехнадзор, дирекции АЭС, ТЭС, ГЭС/ГАЭС и ВЭС.

Около четверти века работает на рынке отечественная инженеринговая компания ТЕСИС, созданная в 1994 г. Компания позиционирует себя как разработчика и поставщика инженерного программного обеспечения в области CFD (поставляет программный комплекс для математического моделирования задач аэро- и гидродинамики FlowVision), а также как дистрибьютора зарубежных продуктов для решения мультидисциплинарных задач.

Необходимо также упомянуть одну из старейших отечественных разработок – многофункциональный программный комплекс ЛИРА-САПР компании «Лира сервис», реализующий технологию информационного моделирования зданий (BIM) и ориентированный на проектирование и расчет строительных и машиностроительных конструкций различного назначения. Программный комплекс разрабатывается более 50 лет. Пакет программ позволяет выполнять расчеты на прочность при различных видах динамических воздействий (сейсмика, ветер с учетом пульсаций, вибрационные нагрузки, импульсные и ударные нагрузки и др.). Развитая библиотека конечных элементов позволяет создавать компьютерные модели практически любых конструкций: плоских и пространственных рам, балок, стенок, изгибаемых плит, оболочек, массивных тел, а также комбинированных систем – плит и оболочек, подпертых ребрами, плит на грунтовом основании, каркасных конструкций зданий, систем «надземное строение – фундаментные конструкции – грунтовое основание» и многое другое.

Есть и более молодые команды. Например, компания «Фидесис» (основанная в 2009 г. специалистами и выпускниками кафедры вычислительной механики МГУ) занимается разработкой ПО в области механики деформируемого твердого тела и прочности. Основным продуктом (Fidesys Standard) включает в себя расчеты напряженно-деформированного состояния трехмерных тел при статическом и динамическом нагружении, расчет собственных частот и форм колебаний упругих тел, расчет критических нагрузок и форм потери устойчивости, решение задач для тел, содержащих балочные и/или оболочечные элементы. Коммерческая версия CAE Fidesys Standard была выпущена в 2012 г. Среди клиентов компании такие заказчики, как «Лукойл», «Норникель», «Газпромнефть». Среди успешных проектов можно назвать Геомеханическое моделирование околоскважинной зоны для ООО «Газпромнефть НТЦ», которое обеспечило успешную проводку траектории скважины в сложных горно-геологических условиях.

Во многих наукоемких отраслях были созданы свои пакеты программ для моделирования физических процессов, определяющих технологические процессы создания изделий соответствующих отраслей. Приведем лишь примеры из атомной отрасли. Мощные отечественные разработки CAE-систем были созданы в Госкорпорации «Росатом» на базе ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, где были разработаны такие пакеты программ, как «Логос», «Лэгак-ДК», «Данко+Гепард», «Нимфа», «Призма».

В последнее время существенные усилия прикладываются для перевода научных разработок в коммерческие отчуждаемые продукты. В частности, выводится на рынок в виде потребительских продуктов (с лицензией и руководством для пользователя) продукт «Логос», предназначенный для решения сложных инженерных задач, который может служить основой в проектах по созданию ЦД.

Пакет программ «Логос» служит для анализа напряженно-деформированного состояния твердых тел, распространения тепла в твердом теле, аэро-, гидро- и газодинамики, турбулентного перемешивания, тепловой конвекции, переноса излучения, течения в пористой среде и т. д. Пакет применяется в атомной энергетике, в авиационной промышленности, ракетно-космической отрасли, в автомобильной промышленности и т. д. Продукт апробирован в таких компаниях, как «КАМАЗ», ПАО «Сухой», ПАО «Ил», РКЦ «ПРОГРЕСС», СПМБМ «Малахит».

При создании пользовательской версии пакета программ «Логос» создатели программы проработали требования от шести ведущих организаций российского ОПК – компаний ПАО «Сухой», СПМБМ «Малахит», «КАМАЗ», НПО Машиностроения, Центр имени М. В. Хруничева и «ОКБМ Африкантов».

«Логос Аэро-Гидро» стала первой тиражируемой цифровой разработкой Госкорпорации «Росатом», за ней следуют «Логос Тепло» и «Логос Прочность».

«Логос Аэро-Гидро» позволяет на стадии проектирования оптимизировать характеристики ключевых узлов и агрегатов, сократить количество экспериментальных испытаний, моделировать режимы, недоступные для экспериментальной отработки.

По свидетельству «ОКБ Сухого» [148], «Логос Аэро-Гидро» применяется при разработке перспективного российского многофункционального истребителя пятого поколения с целью замены части натуральных испытаний и существенного сокращения расходов.

Конкурентными преимуществами «Логос Аэро-Гидро» клиенты называют высокую точность и скорость расчетов, возможность адаптации под требования заказчика, а также отсутствие санкционных рисков и доступную цену в сравнении с иностранными аналогами [149].

Уникальность разработки составляют следующие особенности: использование современных, в том числе уникальных физико-математических моделей (более 80); эффективное распараллеливание более 20 000 процессорных ядер; развитые средства подготовки задач к счету и обработки результатов; верификация и валидация на примерах из высокотехнологичных отраслей (авиастроение, ракетно-космическая отрасль и др.).

Важной особенностью «Логоса» является возможность оптимизации пакета программ под отечественные аппаратные платформы. Необходимо также отметить, что в пакете программ «Логос» заложены данные о поведении отечественных конструкционных материалов, а не американских материалов, как в ANSYS, в том числе при математическом моделировании взрывных процессов.

Еще одна разработка Госкорпорации «Росатом» – это «Лэгак-ДК», пакет программ, который служит для решения двумерных и трехмерных статических и динамических задач прочности с возможностью моделирования различных физических процессов, включая нели-

нейные процессы динамического деформирования конструкций, статическое деформирование, вибрационную прочность, контактное взаимодействие с учетом трения, разрушение, теплопроводность, кинематику механических систем, детонацию взрывчатых веществ. «Лэгак-ДК» применяет метод конечных элементов по пространству и метод конечных разностей по времени, явные и неявные численные схемы по времени, широкий набор типов конечных элементов. Используются модели деформирования различных физических сред – металлы, грунты, композиты. Пакет программ внедрен в практику решения задач моделирования в атомной энергетике, автомобилестроении, авиастроении и ракетно-космической отрасли. В статье «Суперкомпьютерные технологии РФЯЦ-ВНИИЭФ для гражданских отраслей промышленности» [150] можно найти примеры решения весьма сложных задач на базе пакета «Лэгак-ДК», например, такой как моделирование динамики деформирования при подрыве на mine (6 кг ТЭ) бронированного автомобиля сопровождения КАМАЗ-43269 или моделирование динамики деформирования при обрыве лопатки вентилятора двигателя Д30-КПЗ «Бурлак».

«Данко+Гепард» – еще одна разработка Госкорпорации «Росатом». Это пакет программ для расчета трехмерного напряженно-деформированного состояния конструкций, анализа задач теплопроводности с учетом контактного взаимодействия и разрушения элементов конструкций, а также моделирования процессов взрыва и горения водородно-воздушной смеси. Пакет служит для численного анализа поведения строительных конструкций АЭС, корпусов реакторов и элементов реакторного оборудования при действии статических и динамических нагрузок, включая условия аварийных ситуаций.

На базе данного пакета программ в ОАО «ОКБМ Африкантов» были решены такие сложные задачи, как, например, расчет состояния контейнента АЭС (модель на базе 500 тыс. конечных элементов) при падении на него самолета.

«Нимфа» – пакет программ для решения задач геоэкологии, гидрогеологии, нефтедобычи, а также фильтрации в технологических процессах. Пакет предназначен для численного моделирования: трехмерного нестационарного течения в пористых средах; миграции многокомпонентных загрязнений; создания моделей подземных вод – виртуальных гидроэкологических моделей географических районов. Пакет может быть использован для решения широкого круга задач,

включая прогноз последствий штатной эксплуатации и аварийного воздействия предприятий на поверхностные объекты и подземное пространство.

«Призма» – программа, предназначенная для моделирования методом Монте-Карло переноса нейтронов, фотонов, электронов, позитронов и ионов в системах со сложной трехмерной геометрией. Программа служит для обоснования радиационной безопасности водо-водяных реакторов, транспортно-упаковочных контейнеров, хранилищ ядерного топлива, линий его переработки и других сложных физических установок.

В ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ создается также система поддержки жизненного цикла (СПЖЦ) «Цифровое предприятие». Цель проекта – создание полностью отечественной программной платформы, обеспечивающей работоспособность и прозрачность деятельности предприятия в цифровом виде, включая систему трехмерного проектирования сложной инженерной продукции, систему управления производством и систему управления предприятием.

В России также есть разработки в области инструментов имитационного моделирования по управлению бизнесом, необходимые для создания ЦД, направленного на оптимизацию логистических задач. Здесь прежде всего следует отметить российскую компанию AnyLogic, известную не только в России, но и за рубежом. Программное обеспечение, которое позднее получило название AnyLogic, было разработано группой ученых из Санкт-Петербургского Политехнического университета в конце 1990-х гг. Продукт получил название AnyLogic, потому что одновременно поддерживает несколько методов моделирования: системную динамику⁹³; дискретно-событийное моделирование; агентное моделирование⁹⁴ и их комбинации в пределах одной модели. Приложение позволяет разрабатывать модели во многих областях, включая производство, логистику и цепочки поставок, анализ рынка и конкуренции.

Компания AnyLogic имеет сеть дистрибьюторов по всему миру и предоставляет услуги по оптимизации процессов принятия реше-

⁹³ Метод моделирования поведения сложных систем во времени с учетом структуры элементов системы, взаимодействия между ними, причинно-следственных связей, петель обратных связей, задержек реакции и влияния среды.

⁹⁴ Метод имитационного моделирования, исследующий поведение децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом. В отличие от системной динамики аналитик определяет поведение агентов на индивидуальном уровне, а глобальное поведение возникает как результат деятельности множества агентов (моделирование «снизу вверх»).

ний на различных уровнях – от управления производством и логистикой до принятия стратегических решений. Клиентами AnyLogic являются более 40% компаний из списка Fortune 100 и ряд лидеров российского РБК 500. На базе программного обеспечения AnyLogic были созданы ЦД для ряда крупных клиентов.

Например, компания Alstom (французская машиностроительная компания – один из мировых лидеров в производстве железнодорожного транспорта, имеющая более 34 тысяч сотрудников, создала цифровой двойник процесса технического обслуживания парка поездов на железнодорожной магистрали в Великобритании⁹⁵ с использованием метода агентного моделирования на базе AnyLogic.

Другая крупная компания, создавшая ЦД на основе технологий AnyLogic – это CNH Industrial, один из лидеров на рынке товаров промышленного назначения, имеющая 66 предприятий и более 63 тысяч сотрудников. CNH Industrial, мировой производитель сельскохозяйственной, промышленной и коммерческой техники, использовал ЦД на своем заводе в Суззаре, Италия, где он производит фургоны Iveco [151]. В проекте также участвовала итальянская консалтинговая компания Fair Dynamics, которая входит в состав крупного поставщика программного обеспечения и IT-услуг. ЦД был применен на линии сварки шасси грузовика Iveco van. Созданный ЦД позволяет прогнозировать вероятность отказа критических компонентов, запускать сценарии «что, если», сравнивать различные режимы эксплуатации и технического обслуживания, чтобы оптимизировать расходы на техническое обслуживание и запасные части, минимизируя запланированные и незапланированные простои.

Крупный проект по созданию ЦД был реализован также на базе ПО AnyLogic компанией decisionLab совместно с компанией Siemens. В проекте была разработана многоагентная модель работы и технического обслуживания турбин (ATOM, Agent-based Turbine Operations & Maintenance Model), которая позволила оптимизировать операции по техническому обслуживанию и капитальному ремонту авиационных газотурбинных установок Siemens по всему миру.

⁹⁵ Более подробно о проекте рассказывается в третьей главе.

ПО для построения других компонентов ЦД

Есть также ряд отечественных компаний, обладающих экспертизой и разработками программного обеспечения для решения задач промышленной автоматизации.

Например, компания ОВЕН – российский производитель контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации, является разработчиком ряда SCADA-систем, включая SCADA-системы ОВЕН Телемеханика ЛАЙТ – инструмента для проведения полного цикла работ по настройке сбора данных и управлению, заданию алгоритмов обработки, формированию сигналов тревог, настройке баз данных истории, формированию технологических и оперативных схем отображения информации. Компания «ИнСАТ» предоставляет программное обеспечение собственной разработки для систем автоматизации и диспетчеризации, включая SCADA-системы.

«НБТ-Системы» предоставляет программно-технические комплексы и услуги по созданию АСУ ТП электрических станций, нефтехимических, металлургических и других сложных технологических производств.

Говоря о разработках в области IoT, следует упомянуть компанию СИГНУМ, разработчика российской платформы для промышленного интернета вещей Winnum, которая служит для оперативного создания и запуска приложений для удаленного мониторинга, диагностики и оптимизации работы изделий и процессов их эксплуатации.

Платформа служит для мониторинга и контроля производственных процессов: работы оборудования, персонала, а также создания трехмерных цифровых двойников.

Есть также наукоемкие отечественные разработки диагностики и прогноза состояния промышленного оборудования на базе IIoT-технологий. В качестве примера следует привести решение ПРАНА промышленного холдинга РОТЕК, входящего в группу компаний «Ренова». Система осуществляет комплексный анализ сложных промышленных систем, выявляет большой процент дефектов оборудования задолго до срабатывания аварийной сигнализации, уменьшает время простоя оборудования, позволяет определить остаточный ресурс оборудования, вероятность и время наступления аварийного события. В основе системы лежит техника оценки многомерных состояний (MSET Multivariate State Estimation Technique), технологии

машинного обучения и искусственного интеллекта. Модель оборудования создается и настраивается на основе статистических архивных данных [152].

Следует отметить также наличие разработок отечественных компаний в области СУБД, необходимых для хранения и обработки данных в решениях класса ЦД. На рынке присутствуют решения, построенные как на базе открытого ПО, так и написанные исключительно отечественными программистами. Примером успешного разработчика СУБД на базе открытого ПО является компания Postgres Professional, которая разрабатывает и поддерживает коммерческий продукт Postgres Pro на базе PostgreSQL. На российском рынке присутствует также отечественная СУБД ЛИНТЕР, которая развивается в рамках научно-производственного предприятия РЕЛЭКС (Реляционные экспертные системы), «Ред База Данных» от компании «Ред Софт», а также СУБД «Заря» от компании ФГУП ЦНИИ ЭИСУ.

Российские поставщики комплексных решений класса ЦД

Определив категорию «российские поставщики комплексных решений класса ЦД», мы собрали информацию о компаниях, которые именуют свои решения «цифровыми двойниками», предлагают их на рынке в качестве продукта или услуги и позиционируют себя отечественными игроками.

В этой категории мы попытались осветить деятельность именно рыночных игроков и не рассматривали проекты внутренних ИТ-отделов и научных центров, которые создают решения класса ЦД для внутрикорпоративных целей, – такие отечественные проекты будут рассмотрены в главе 3 при анализе проектов в разных отраслях.

Следует отметить, что пока таких игроков в России немного, – российский рынок ЦД находится в самом начале своего пути, и решений класса ЦД, построенных исключительно на российских технологиях, нет.

Можно сказать, что здесь есть определенная системная проблема: с одной стороны, создание ЦД продиктовано желанием победить соперников, работая во все более конкурентной среде, а для этого необходимо выбрать наиболее совершенное в мире ПО и, базируясь на опыте, вложенном в него, создать лучший продукт, вывести его на

рынок раньше других и получить прибыль. С другой стороны, в России развивается концепция импортозамещения, предписывающая создание собственного ПО, на котором строились бы решения класса ЦД.

Обе концепции имеют свою логику, но решить обе задачи одновременно чрезвычайно сложно.

На российском рынке не более десятка компаний, которые позиционируют себя как разработчиков и поставщиков решений класса ЦД, и это компании разного калибра компетенций и времени пребывания на рынке.

Среди рыночных поставщиков решений и услуг по построению цифровых двойников есть явный лидер, вокруг которого формируется научная школа, профессиональное сообщество и консорциум компаний, заинтересованных в проведении цифровизации промышленности в существенной мере с опорой на технологии цифровых двойников. Этим лидером является Центр компетенций НТИ «Новые производственные технологии» СПбПУ, о котором будет рассказано подробнее.

Центр НТИ СПбПУ

Центр компетенций НТИ СПбПУ – это российский научный центр с проектным консорциумом по направлению «Новые производственные технологии» (цифровое проектирование и моделирование, цифровые двойники, новые материалы, аддитивные технологии), созданный на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Центр выполняет одновременно около 100 проектов в 10 высокотехнологичных отраслях совместно с предприятиями России, Германии, Великобритании, Швеции, Франции и КНР. В решении наукоемких мультидисциплинарных задач центр опирается на консорциум Центра компетенций, который объединяет лидеров науки, образования и промышленности (автомобилестроение, авиастроение, двигателестроение, энергомашиностроение, нефтегазовое и атомное машиностроение, судостроение и кораблестроение, ракетно-космическая отрасль и др.) в сфере разработки, развития и применения передовых производственных технологий.

В состав консорциума, по состоянию на май 2020 г., входит 74 организации. Среди них 19 университетов, включая СПбПУ, МГУ имени М. В. Ломоносова, СПбГУ, «Московский Политех», РХТУ, МГТУ «Станкин», «Сколтех», «Иннополис» и другие. Шесть крупнейших

промышленных корпораций («Ростех», «Росатом», ОАК, ОДК, ОСК и РЖД). Членами консорциума являются крупные промышленные высокотехнологичные предприятия, такие как «АвтоВАЗ», УАЗ, ИЛ, ОДК-САТУРН и др.; крупнейшие научные центры (НИЦ «Курчатовский институт», РФЯЦ-ВНИИЭФ, ЦНИИ РТК, ИПХФ РАН, ВНЦ РАН) и целый ряд других организаций.

Центр НТИ СПбПУ работает над проектами по таким направлениям, как цифровое проектирование и моделирование, разработка цифровых двойников изделий и производственных процессов; создание виртуальных испытательных стендов и полигонов и технологий управления производством. Ключевым объектом разработки центра являются «умные» цифровые двойники, в некоторых случаях – в сочетании с использованием аддитивных технологий и новых материалов (рис. 2.41).

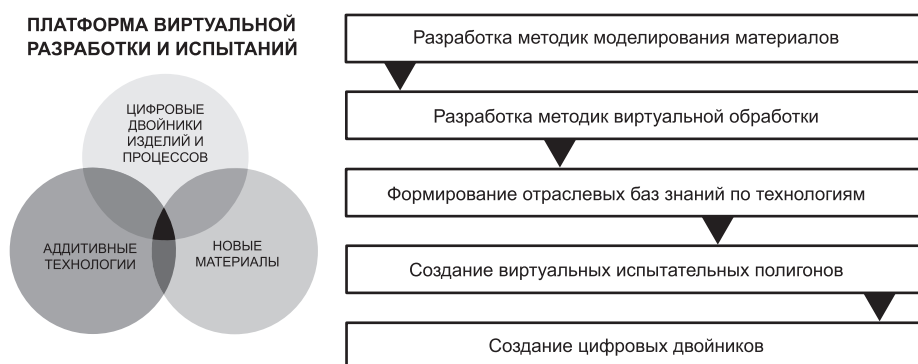


Рис. 2.41. Ключевые направления деятельности Центра НТИ СПбПУ. Источник: Центр НТИ СПбПУ

Центр НТИ СПбПУ опирается на развитую инфраструктуру, в которую входят «платформа виртуальной разработки и испытаний», на базе которой создаются «умные» цифровые двойники; высокопроизводительные вычислительные системы, широкий спектр инженерного программного обеспечения мирового уровня; базы данных материалов, характеристик и моделей изделий и процессов; центр (виртуальный испытательный полигон) тестирования, верификации и валидации программного обеспечения, математических моделей и численных результатов, инфраструктура специального испытательного, научно-производственного оборудования [153].

Центр НТИ СПбПУ объединяет целый ряд подразделений, включая Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab) под руководством профессора А. И. Боровкова, который был создан в 2013 г. на базе учебно-научной лаборатории «Вычислительная механика» СПбПУ – первой в СССР лаборатории вычислительной механики, организованной в 1987 г. Центр специализируется в области цифрового проектирования и моделирования, компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга, компьютерных технологий оптимизации и аддитивных технологий, разработки цифровых двойников.

Команда Центра НТИ СПбПУ (около 800 сотрудников) обладает многолетним опытом выполнения работ в интересах российских и зарубежных компаний.

В распоряжении команды Центра – мощности Суперкомпьютерного центра «Политехнический», одного из самых высокопроизводительных в России (суммарная пиковая производительность которого превышает 2,5 ПФлопс).

Команда Центра НТИ СПбПУ обладает коммерческими и академическими лицензиями на широкий спектр CAD/CAE/CFD/FSI/MBD/EMA/CAO/CAM/CAAM/PDM/PLM/HPC-технологий.

Для эффективного управления процессами разработки в Инжиниринговом центре СПбПУ и группе компаний CompMechLab создана собственная цифровая платформа CML-Bench для разработки цифровых двойников изделий и производственных процессов, управления процессом цифрового проектирования, математического моделирования и компьютерного инжиниринга.

Ядро цифровой платформы составляет SPDRM-система (SPDRM – Simulation, Process, Data & Resources Management) собственной разработки, позволяющая автоматизировать выполнение инженерных расчетов, структурировать все расчетные модели и варианты, упростить работу с базами данных расчетных моделей, результатов вычислений и расчетных вариантов, улучшить возможность представления, визуализации и сравнения результатов инженерных работ, а также для автоматизированной генерации отчетов об инженерной деятельности.

Цифровая платформа CML-Bench обеспечивает глубокое взаимодействие десятков разнообразных CAD/CAE/CFD/CAO/HPC программных систем мирового уровня, используемых в инженерно-кон-

структурских разработках для выполнения инженерных и расчетных работ на различных стадиях подготовки и проведения численного моделирования, виртуальных испытаний и обработки результатов вычислений.

Платформа служит для формирования многоуровневой гиперматрицы требований/целевых показателей и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных, экологических, контрактных, например, контрактов жизненного цикла, и других), разработки математических моделей, выполнения виртуальных испытаний, разработки виртуальных испытательных стендов и полигонов, разработки цифровых двойников, автоматизации инженерных расчетов, каталогизации моделей и расчетных вариантов, подготовки сборочных файлов, а также визуализации результатов вычислений и автоматизированной генерации отчетов.

CML-Bench представляет собой клиент-серверное веб-приложение, состоящее из пользовательского интерфейса (рис. 2.42), серверной части, системы управления базами данных и сервиса-решателя.

Платформа позволяет объединить инженеров, конструкторов, расчетчиков и технологов в одном проекте, принимать решения с использованием интеллектуальных помощников, что представляет собой развитие в направлении применения искусственного интеллекта в процессе проектирования наукоемких изделий.

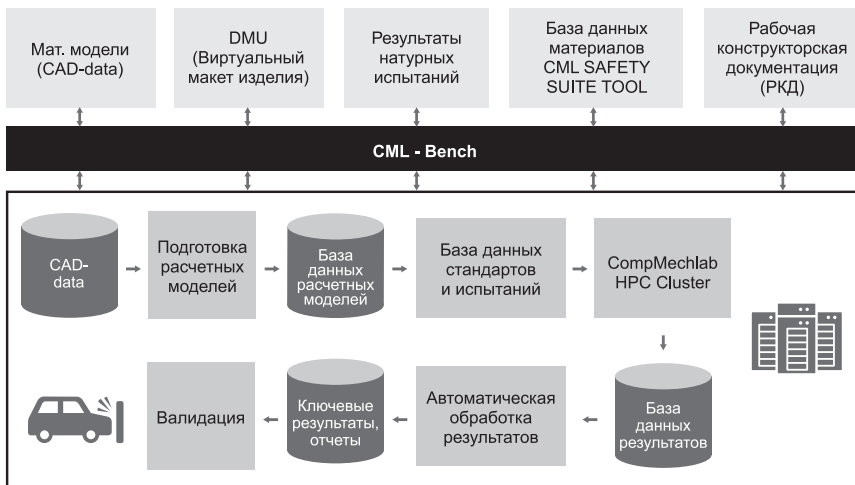


Рис. 2.42. Структурная схема платформы CML-Bench.
Источник: Центр НТИ СПбПУ

Платформа обеспечивает взаимодействие десятков разнообразных CAD-CAE приложений, позволяет осуществлять мониторинг изменений конструкторских решений, эволюцию и модификацию расчетных моделей, расчетных вариантов, визуализировать результаты цепочек вычислений, выполненных при математическом моделировании и оптимизации изделий или конструкций.

Платформа CML-Bench обеспечивает единый интерфейс между удаленными центрами и поставщиками инженерных услуг, обеспечивает прозрачность процесса проектирования и мониторинг разработок, в том числе со стороны заказчиков; обеспечивает привязку документации и баз данных внутри единой структуры проекта.

Наряду с цифровой платформой CML-Bench для одновременного удовлетворения в процессе проектирования десяткам тысяч требований/целевых показателей и ресурсных ограничений применяется специально разработанная CML-система интеллектуальных помощников CML-AI (разработка Инжинирингового центра СПбПУ и группы компаний CompMechLab), которая позволяет эффективно работать с базой данных проектных решений и виртуальных испытаний. Сейчас в системе CML-Bench представлено более 200 000 проектных решений, в любой момент времени можно ознакомиться с принятыми ранее решениями, их обоснованием, а также с причинами отказа от тех или иных предложений.

За время существования ИЦ CompMechLab выполнены сотни проектов, в рамках которых создавались ЦД различных наукоемких высокотехнологичных продуктов/изделий/машин/конструкций и физико-механических/технологических процессов.

Наиболее известный проект – это создание цифровых двойников для проекта разработки Единой модульной платформы «Кортеж» (головной исполнитель – ФГУП НАМИ), автомобиля которого теперь официально называются серией Augus. Для разработки цифровых двойников автомобилей семейства Augus были разработаны математические модели высокого уровня адекватности, выполнены десятки тысяч виртуальных испытаний, в том числе на разработанных виртуальных стендах и виртуальных полигонах.

Весной 2016 г. был изготовлен опытный образец автомобиля Aurus Senat, который фактически с первого раза прошел все необходимые натурные испытания, получив высшие баллы по пассивной безопасности. Это стало возможным благодаря тому, что при разра-

ботке цифровых двойников были сформированы многоуровневые матрицы требований/целевых показателей и ресурсных ограничений, включающие десятки тысяч характеристик (суммарно свыше 125 тысяч характеристик, что в настоящее время является рекордным показателем), разработаны, верифицированы и валидированы математические модели высокого уровня адекватности реальным материалам, элементам конструкций и реальным физико-механическим и технологическим/производственным процессам; проведены десятки тысяч виртуальных испытаний материалов, деталей и конструкций в целом. Все это позволило значительно сократить объемы натурных испытаний, снизить себестоимость и сроки разработки, аналогов которой в России не было.

Проектирование полностью выполнялось на основе цифровой платформы CML-Bench с помощью системы интеллектуальных помощников CML-AI. В июле 2017 г. цифровая платформа CML-Bench в конкурсной борьбе победила среди десятков лучших высокотехнологичных разработок и была удостоена Национальной промышленной премии Российской Федерации «Индустрия». Более подробно об этом проекте будет рассказано в главе 3.

С 2018 г. ИЦ CompMechLab выступает головным исполнителем по проекту «Универсальная модульная платформа автобуса, электробуса, троллейбуса», реализуемому в интересах ПАО «КАМАЗ». В этом проекте также вся разработка ведется на цифровой платформе CML-Bench, на основе сформированной матрицы требований/целевых показателей и ресурсных ограничений, множества разработанных математических моделей высокого уровня адекватности, десятков тысяч виртуальных испытаний, в том числе на специализированных виртуальных стендах и виртуальных полигонах, что позволило разработать цифровые двойники для различных вариантов исполнения Универсальной пассажирской платформы и ее производства [154].

Другой пример проекта на базе ЦД – это проект для топливной компании АО «ТВЭЛ»/НПО «Центротех» – российского производителя ядерного топлива, входящего в состав Госкорпорации «Росатом», где был создан ЦД ключевого компонента системы очистки бурового раствора – вибросита высокой надежности. Именно наличие цифрового двойника позволило создать изделие, которое выдерживало высокие вибрационные нагрузки (уровень виброускорений в рабочем

режиме – более 7 g) без разрушения. В этом проекте удалось решить проблему импортозамещения, причем, обеспечить эксплуатационные режим 8,8 g, что спустя два года является недостижимым для зарубежных компаний – мировых лидеров.

Еще один уникальный проект Центра НТИ СПбПУ, в котором использовалась технология ЦД – это проект по созданию Антарктических саней для перевозок на Южный полюс тяжелых грузов, весом до 60 тонн, на расстояния в 1,5 тысячи километров, в условиях экстремально низких температур (до минус 60 градусов), разреженного воздуха, сильных порывов ветра, торосов, подъемов и спусков ледяной дороги.

Проект был выполнен инженерами Центра НТИ СПбПУ и специалистами Завода им. «Комсомольской правды» в 2018 г. Разработка в кратчайшие сроки ЦД позволила спроектировать уникальную металлокомпозитную конструкцию, промоделировать широкий спектр штатных и нештатных ситуаций при эксплуатации саней в условиях Антарктиды. Спроектированные и изготовленные за четыре месяца Антарктические сани для транспортировки крупногабаритных и многотоннажных грузов успешно прошли испытания в Антарктиде, что позволило получить исчерпывающие данные для дальнейшего совершенствования конструкции. Отметим, что проект имеет стратегическое значение для освоения территорий Арктики и Антарктики.

Не все проекты, в рамках которых были разработаны полноценные и полномасштабные ЦД, являются открытыми, достаточно перечислить клиентов, с которыми работали специалисты ИЦ CompMechLab, – это такие высокотехнологичные компании, как Airbus Group, Audi, Boeing, BMW, Daimler/Mercedes, General Electric, General Motors, LG Electronics, Porsche, Rolls-Royce, Schlumberger, Siemens, Volkswagen, Weatherford.

Среди ключевых российских партнеров: Росатом, РЖД, Газпром, Газпром нефть шельф, ОДК-КЛИМОВ/ОДК/госкорпорация Ростех, ВР-Технологии/Вертолеты России/госкорпорация Ростех, Корпорация «ИРКУТ»/ОАК/госкорпорация Ростех, ФГУП НАМИ, КАМАЗ, АВТОВАЗ, УАЗ, «Силовые машины», «Трансмашхолдинг», «Синара – Транспортные машины», СПМБМ «Малахит»/ОСК, Средне-Невский судостроительный завод/ОСК, АНО Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез – международные проекты» (УТС-Центр) / НИЦ «Курчатовский институт», ЦНИИ «Электроприбор» и многие другие.

«Цифра»

Образованная в 2017 г. компания «Цифра» – занимается разработкой и внедрением технологий для цифровизации промышленности, мониторинга промышленного оборудования, развитием технологий IIoT, искусственного интеллекта и созданием цифровых двойников. Компания входит в Энергопром (ГК «Ренова») – работает в России под брендом «Цифра» и под брендом Zuyfra – в Хельсинки.

Ключевыми отраслями для компании являются машиностроение, металлургия, горная добыча, нефтегазовый сектор и химическая промышленность.

Компания «Цифра» активно приобретает активы, которые позволили ей развить компетенции в области создания цифровых двойников. В частности, в 2018 г. «Цифра» приобрела и объединила две крупнейшие российские системы мониторинга промышленного оборудования – Диспетчер⁹⁶ и СМПО Foreman⁹⁷.

В том же году «Цифра» нарастила свои компетенции в области ИИ за счет приобретения стартапа Theta Data Solutions. Несмотря на то, что к моменту приобретения стартап работал всего около года на рынке, на его счету уже были такие крупные проекты, как проект оптимизации логистики нефтепродуктов для «Газпром нефти», в рамках которого была создана система предиктивных цифровых моделей для оптимизации рецептур и обеспечения качества выпускаемой продукции.

Еще одно приобретение 2018 г. – это приобретение разработчика промышленного софта «ВИСТ групп», специализирующегося на разработке и внедрении IT-систем для горнодобывающей промышленности, а также создании софта для беспилотной техники. Эту компанию «Цифра» приобрела за 2 млрд рублей.

В 2019 г. «Газпром нефть» и «Цифра» объявили о создании СП по развитию цифровых продуктов. В этом же году «Цифра» за 9 млн долларов приобрела компанию «Геонавигационные технологии» разработчика технологий «умного бурения».

⁹⁶ Система мониторинга производства «Диспетчер» позволяет контролировать состояние станков, предоставляет информацию о простоях, загрузке, наработках на отказ и технологиях каждой машины.

⁹⁷ Программно-аппаратный комплекс, который обеспечивает круглосуточный контроль над оборудованием, интерактивное взаимодействие с оператором, прием и передачу УП, доступ к аналитической информации с ПК и мобильных электронных устройств. Позволяет объединить в единое информационное пространство как новейшие импортные, так и отечественные станки предыдущих поколений.

На счету компании «Цифра» уже несколько проектов класса ЦД.

В 2018 г. «Цифра» и «Газпром нефть» подписали соглашение о сотрудничестве в реализации технологического проекта «Цифровой завод», который должен повысить эффективность управления логистикой, производством и сбытом нефтепродуктов. В основе решения лежат цифровые двойники установок нефтеперерабатывающего завода, которые базируются на описании физико-химических процессов, процессов потребления и выработки энергии, параметрах входного сырья и продуктов производства и должны представлять информацию о характеристиках инженерных систем, средств автоматизации, их сроках службы, периодах обслуживания и т. д.

В частности, компания создала цифрового двойника для установки по производству полимерно-битумных вяжущих. Для получения конечного продукта в битум добавляют различные присадки, в основном полимеры, доля которых в себестоимости продукции доходит до 60–70%. Оптимизация дозировки дорогостоящих присадок позволяет снизить стоимость конечной продукции. Эту задачу решает цифровой двойник, который описывает работу оборудования, определяет, как дозировка влияет на качество продукта, позволяет моделировать различные исходы с использованием технологий машинного обучения и выдает оператору рекомендации по управлению установкой.

Еще один проект – это создание цифрового двойника установки для производства хлорметанов для предприятия «Химпром». Созданный цифровой двойник в режиме реального времени собирает данные о протекании процесса и дает оператору рекомендации, как нужно менять режимы работы установки, чтобы приблизиться к оптимальным показателям выпуска.

Еще один проект, выполненный компанией «Цифра», – это создание «Цифрового двойника цеха» на базе системы мониторинга оборудования «Диспетчер» на производственном комплексе «Салют». Программно-аппаратный комплекс позволяет в реальном времени осуществлять мониторинг ресурса оборудования, контролировать степень его загрузки и управлять производственными заданиями.

«Фабрика Цифровой Трансформации»

Большинство игроков, которые создают комплексные решения класса ЦД в России используют свои наработки и зарубежное про-

граммное обеспечение. По этому пути, например, идет компания «Фабрика Цифровой Трансформации» – инжиниринговая компания, имеющая более двадцати разработчиков в своем штате и занимающаяся внедрением технологий ЦД на промышленном уровне.

«Фабрика Цифровой Трансформации», специализируется на построении решений класса ЦД на основе промышленного интернета вещей и позиционирует себя как поставщика решений и услуг по созданию комплексных цифровых двойников – промышленных экспертных систем, обеспечивающих автоматизированный интеллектуальный мониторинг технологического оборудования, раннее выявление дефектов, прогнозирование технического состояния и оптимизацию режимов работы оборудования (рис. 2.43).

Компания базируется на коммерческих программных продуктах лидеров мирового рынка: PTC (промышленный интернет, машинное обучение и нейронные сети); Kerware (сбор и унификация полевых данных); Vuforia (дополненная реальность); ANSYS (численное моделирование, многокритериальная оптимизация, системное 1D моделирование, функциональная безопасность).



Рис. 2.43. ЦД на базе IIoT от компании «Фабрика Цифровой Трансформации». Источник: «Фабрика Цифровой Трансформации»

Компания реализует в России несколько пилотных проектов в горнодобывающем секторе, в нефтегазовой отрасли, в металлургии и в пищевой промышленности.

ООО «Нова-Инжиниринг»

Компания ООО «Нова-Инжиниринг» была создана в 2015 г. и является резидентом Технопарка Высоких Технологий Свердловской области (Уральский оператор «Сколково»). Основные направления деятельности: компьютерное моделирование технологических процессов и физики твердого тела, промышленный инжиниринг, цифровизация производства. Приоритетным направлением в компании является проектирование и внедрение технологии цифровых двойников для высокотехнологичных отраслей промышленности, проведение обучений и тренингов в области моделирования изделий машиностроительного профиля и технологий производства (литейного, штамповочного, сварного и т. д.). Компьютерное моделирование и инженерный анализ в виртуальной среде позволяют заказчику оптимизировать технологию производства на ранней стадии и значительно увеличить выход годной продукции. За время своего существования ООО «Нова-Инжиниринг» реализовала множество проектов. В частности, выполнены расчеты в области аэродинамики для строительной компании Красноярского края; осуществлено моделирование процессов литья, штамповки, сварки для компаний «Рус Инжиниринг», ИТЦ «РУСАЛ», холдинга «Сибирская угольно-энергетическая компания» (СУЭК) и многих других; выполнено физико-математическое моделирование процесса детонации смесей для комплексной оценки безопасности при аварийных ситуациях для Федерального предприятия «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности. Реализован проект по созданию цифрового двойника установки ультразвуковой обработки расплава при его непрерывной разливке для крупной металлургической компании. Проект позволил оптимизировать свойства и микроструктуры плоских слитков, а также повысить срок службы волновода. В процессе реализации находится проект по созданию ЦД перспективного двигателя ПД-14, что позволит прогнозировать износ узлов агрегата и проводить своевременную замену и ремонт, а также снизить затраты на сервисное обслуживание двигателя. Расчеты и моделирование производятся на базе программных комплек-

сов ANSYS, ESI, SIEMENS, ESI ProCast, ESI PAM STAMP, QForm, SYSWELD. В сотрудничестве со специалистами ведущих металлургических компаний разработано собственное программное обеспечение «Bazis» для моделирования процессов сварки и термообработки. В 2018 г. «Нова-Инжиниринг» зарегистрировала дочернюю компанию Nova-Engineering LLC в г. Дубаи, ОАЭ, с лицензией на право оказания инжиниринговых услуг предприятиям ОАЭ и мира. Специалисты компании проводят инженерные расчеты для одного из крупнейших мировых производителей алюминия – компании Emirates Global Aluminium (EGA, Дубаи, ОАЭ).

«ПрограмЛаб»

Компания «ПрограмЛаб» – это стартап – официальный резидент Сколково, компания занимается разработкой программного обеспечения, программно-аппаратных научно-исследовательских и учебных комплексов, с использованием систем виртуальной и дополненной реальности.

«ПрограмЛаб» разрабатывает автоматические системы управления технологическими процессами с интерактивной трехмерной визуализацией и виртуальные учебные симуляторы АСУ ТП, занимается разработкой математических моделей оборудования, расчетами с использованием суперкомпьютерной базы, решением оптимизационных задач на основе расчетного анализа (механика, гидродинамика, тепло) для разработки новых прототипов оборудования и анализа работоспособности существующего оборудования в заданных условиях.

В перечне услуг компании – создание цифровых двойников предприятий и изделий для повышения эффективности процессов конструкторско-технологического проектирования, управления и производства за счет создания виртуальной копии реальных объектов технологических линий и производственного оборудования.

«ПрограмЛаб» разрабатывает платформу PL Twin – комплексную платформу по созданию «цифровых двойников» – виртуальных копий промышленного оборудования и различных технологических процессов [155]. «ПрограмЛаб» также производит интерактивные макеты для презентаций архитектурных, строительных и промышленных объектов, визуализации технологических процессов, наглядной демонстрации принципов работы и устройства проектируемых объектов (от ма-

логабаритных изделий и оборудования до производственных цехов и заводских линий, архитектурных и градостроительных проектов).

В качестве реализованного проекта класса ЦД специалисты компании называют проект по созданию ЦД, имитирующего работу оборудования на Волжском трубном заводе. Виртуальная модель трубного производства включает несколько стадий – от переработки сырья до проката и получения конечных изделий. Что позволяет еще на проектной стадии смоделировать технологические процессы, внести коррективы и избежать сбоев реального производства. Проект вошел в топ-5 виртуальной индустрии на международной выставке в Японии. А в октябре 2019 г. PL-Twin на прошедшем в Челябинске финале конкурса STEEL Start занял призовое место [156].

«Национальное Бюро Информатизации»

Акционерное общество «Национальное Бюро Информатизации» – разработчик платформы «EMAS», создает решения класса ЦД (цифровые модели электростанций). «EMAS» – это комплексное решение автоматизации планирования и мониторинга режимов работы ТЭС для повышения маржинальной прибыли от производства и сбыта тепловой и электрической энергии. Платформа «EMAS» используется на 166 электростанциях, общей установленной электрической мощностью более 73 ГВт, что составляет более 31% от всей установленной мощности генерирующих объектов ЕЭС РФ.

Примеры внедрений: ПАО «Мосэнерго», ПАО «ТГК-1», ПАО «Татнефть», ПАО «Лукойл», ПАО «РусГидро», ПАО «Квадра», ПАО «Т-Плюс», ООО «Ново-Салаватская ТЭЦ», ООО «ВО «Технопромэкспорт».

«EMAS.OPT» позволяет создавать цифровые двойники электростанций, которые могут использоваться для оптимизации работы ТЭС. Лежащие в основе ЦД модели включают технологическую схему производства электрической и тепловой энергии с привязкой к договорам на поставку топлива и к договорам на продажу тепловой и электрической энергии.

Реализованный подход позволяет решать не только технологическую задачу оптимального распределения нагрузки, но и экономические задачи, включая поиск оптимальных режимов работы ТЭС по маржинальной прибыли, по оптимизации расхода топлива, а также

исходя из инвестиционных оценок технического перевооружения и ремонта оборудования.

«EMAS.OPT» применяет метод оптимизации, позволяющий находить глобальный оптимум с учетом специфики, характеристик и ограничений объектов автоматизации (метод смешанно-целочисленного линейного программирования, MILP). Преимуществом решения является нахождение режимов работы ТЭС, обеспечивающих максимум маржинальной прибыли при заданных условиях и технологических ограничениях.

Для решения этой задачи «EMAS.OPT» использует цифровую модель объекта со всеми технологическими связями, особенностями и ограничениями. Для нахождения оптимальных решений в темпе, необходимом для бизнес-процессов, используется специализированный решатель (Solver), применение которого позволяет за приемлемое время осуществить выбор наилучшего решения среди миллионов возможных вариантов. Решение задачи оптимизации может быть описано функциональной схемой (рис. 2.44).

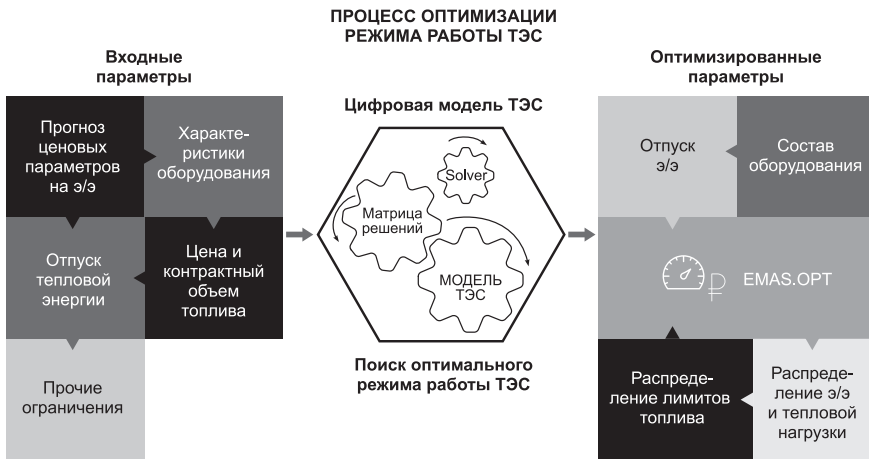


Рис. 2.44. Функциональная схема системы оптимизации.
Источник: АО «НБИ»

Для определения оптимального состава оборудования, плана выработки и распределения нагрузки между оборудованием, «EMAS.OPT» осуществляет выбор среди всех возможных вариантов, удовлетворяющих заданным ограничениям.

В «EMAS.OPT» реализован механизм моделирования тепловой и технологической схемы объекта автоматизации. Для упрощения создания, настройки и редактирования цифровой модели объекта автоматизации используется визуальное представление всех связей и объектов моделирования в виде топологической схемы. Поскольку цифровая модель является основой для проведения оптимизационных расчетов по критерию максимизации маржинальной прибыли, в ней содержится не только техническая информация о тепловой и технологической схемах станции, но и ряд параметров, позволяющих производить сведение балансов и калибровку модели с использованием фактических данных с различных систем сбора производственно-технической информации. В рамках реализованных проектов, специалистами АО «НБИ» разработано более 60 моделей электростанций.

Инфосистемы Джет

ИТ-компания «Инфосистемы Джет» развивает направление «Искусственный интеллект и машинное обучение» в рамках одноименного Центра разработки ПО. В команде по данному направлению работают более 30 экспертов – специалистов в области аналитики данных, архитекторов, менеджеров проектов. В разработке моделей специалисты центра используют открытое ПО и собственные серверы для максимально быстрого прототипирования моделей с дальнейшим развертыванием у заказчика. В отдельных случаях разработка моделей может вестись целиком на площадке заказчика. На счету Центра машинного обучения более 50 реализованных проектов и пилотов за три года развития направления. Реализованные проекты относятся к сфере промышленности, информационной безопасности, образования, ритейла, транспорта, госуправления, финансов и страхования. Часть проектов компания «Инфосистемы Джет» позиционирует как проекты класса ЦД. В частности, разработан ЦД для металлургической отрасли, в основе которого лежит модель физических и химических процессов, определяющих режим плавки, а также модель, основанная на алгоритмах машинного обучения, использующая данные датчиков (исторические и получаемые в реальном времени). На основе построенных моделей разработчикам удалось решить ряд проблем клиентов, включая снижение расхода ферросплавов и уменьшение отсева «кокса» при выплавке стали.

Компания «Инфосистемы Джет» также развивает направление «Цифровой двойник» и работает над созданием «цифрового двойника» здания, в основе которого лежит блок управления инфраструктурой сооружения. Управление увязывается с климатическими и производственно-технологическими процессами предприятия, такими как контроль электричества, контроль водных ресурсов и теплоснабжения.

Глава 3. Примеры использования ЦД в разных отраслях

В первых двух главах мы пытались ответить на вопросы, что относится к технологии цифровых двойников и на основе каких элементов они создаются. Этот разговор будет неполным, если не рассмотрим конкретные проекты, которые разработчики позиционируют как цифровые двойники в разных индустриях.

ЦД в транспортном машиностроении и на транспорте

ЦД в автомобильной промышленности

Автомобилестроение – это высокотехнологичная отрасль с массовым производством, которая лидирует в плане внедрения технологий цифровизации. Жесткая конкуренция заставляет участников рынка искать все новые решения в борьбе за клиента. Автомобили меняются с огромной скоростью, собирая все технологические новинки, – переходят на электродвигатели, становятся «подключенными», требуют все больше данных. С ростом числа подключенных автомобилей растет количество данных о водителях, об их предпочтениях (пунктах назначения, маршрутах, любимой музыке, заправочных станциях, точках питания и т. п.), и перед автомобильными компаниями встает задача, как сохранить эти данные в безопасности и как их использовать наиболее эффективно. На наших глазах реальностью становится беспилотное автовождение.

Общий вектор всех этих изменений – это переход к практике «принятия решений, основанных на данных», которых становится все больше на всех этапах создания и эксплуатации автомобиля.

Как было отмечено ранее (рис. 1.45), автомобильная промышленность – это уникальная отрасль, где производителям удается постоянно снижать время выхода новых изделий на рынок, несмотря на рост сложности самих изделий (чего, кстати, пока не удается достичь ни в авиакосмической, ни в электронной промышленности).

Рост потребности в объединении цифровых инструментов в рамках общей платформы стимулирует внедрение технологии ЦД круп-

нейшими автопроизводителями. По словам ИТ-директора компании Daimler AG, «ЦД – это переломный момент в цифровой трансформации автомобильной промышленности... Это сумма всех данных, сгенерированных продуктом и для него, от CAD-информации, алгоритмов, описывающих поведение вождения, до списков деталей и текущих версий программного обеспечения. В совокупности все эти данные позволяют нам работать с каждым отдельным автомобилем еще до его сборки на производственной линии. Ключ к этому лежит в эффективном управлении данными о продукте» [157].

Цифровой двойник дает возможность создать высокоадекватные модели автомобиля и сопутствующих процессов, позволяя оптимизировать изделие и сервисы на его основе на всех этапах, включая этапы создания концепции автомобиля, его проектирование, изготовление компонентов, сборку, складирование, продажу, обслуживание и утилизацию.

Какие же проблемы удастся решить с помощью ЦД на этих этапах?

На этапе создания концепции нового автомобиля, где решаются такие вопросы, как определение целевого рынка, сравнительный анализ транспортных средств конкурентов, анализ истории продвижения предыдущих моделей, автомобильным компаниям остро необходима интеграция всей этой информации, и в том числе информации, касающейся автомобилей предыдущего поколения.

Казалось бы, современное автомобильное производство уже давно использует новейшие технологии, которые позволяют вывести на рынок идеальный продукт, однако если посмотреть новости автомобильных компаний, то нетрудно найти объявления об отзыве с рынка готовых автомобилей, что выливается в миллионные убытки.

Важен анализ опыта клиентов по использованию различных функций, информация о сбоях и поломках, данные о предпочтениях пользователей. Однако в большинстве используемых систем такая информация не интегрирована, решения в большей степени принимаются с опорой на мнения разработчиков, чем на опыт конечных пользователей [158]. Внедрение ЦД на этом этапе помогает объединить данные между транспортными средствами предыдущего поколения и текущей концепцией автомобиля в рамках единой цифровой модели, что позволяет улучшить коммуникации между проектировщиками, дизайнерами и конечными потребителями. Разработка новой модели – это длитель-

ный затратный процесс, который занимает не менее пяти лет от проектирования до запуска в производство. И чем позднее обнаруживаются допущенные ошибки, тем дороже это обходится владельцу бизнеса.

На этапе проектирования автомобиля, в процессе доработки функциональности, элементов внешнего вида, разработки инструментов и оборудования для коммерческого производства, остро требуются множественные испытания. Многие предприятия сталкиваются с тем, что при проведении дорогостоящих натуральных испытаний не хватает ресурсов и возможностей для воспроизведения полного набора ситуаций, с которыми продукт встречается в реальности. При этом недостаточное количество испытаний ведет к позднему обнаружению проблем, которые возвращают разработчиков на несколько шагов назад, требуя повторной итерации в проектировании, включая изменения в материальном снабжении, подготовке инструментов, оборудования и т. п. Использование ЦД на данном этапе дает возможность проведения многократных виртуальных испытаний, позволяет на более ранней стадии выявлять проблемы, проводить быструю оценку необходимых изменений и сокращать длительность цикла доводки изделия.

Несмотря на то, что краш-тесты в автомобилестроении для создания более безопасных автомобилей применяются уже с конца 70-х гг., результативность подобных экспериментов ограничена, поскольку производить множественные натурные испытания слишком дорого. Это касается и других типов натуральных испытаний, например, известно, что испытания в аэродинамической трубе необходимы для оптимизации аэродинамики кузовов автомобилей, но они так же сложны и дороги. С помощью технологии ЦД возможно «поместить» цифровой двойник в виртуальную аэродинамическую трубу и моделировать аэродинамику, оптимизировать параметры модели в самых широких пределах, а также виртуально провести краш-тест реального автомобиля с реальными сборочными усилиями, остаточными напряжениями от сварки и дефектами в конструкции.

Использование технологии цифрового двойника позволяет осуществить быстрое виртуальное тестирование, что обеспечивает существенное снижения затрат за счет проведения лишь незначительного количества испытаний в реальной аэродинамической трубе.

Цифровой двойник может значительно сократить потребности и расходы, связанные с тест-драйвами. ЦД могут быть «отправлены»

на виртуальный тест-драйв, сводя к минимуму число дорогих физических прототипов.

ЦД также позволяет решить многие задачи на этапе производства, которые возникают в условиях увеличения количества моделей, увеличения персонализации бизнеса и усложнения организации современных производственных процессов.

Прошло более столетия после того, как конвейерная лента произвела революцию, начав массовое производство. Она по-прежнему остается доминирующей технологией в большинстве цехов автомобильной промышленности, однако в условиях роста числа моделей и массовой кастомизации конвейер не всегда удобен. Автопроизводители рассматривают гибкое ячеечное производство FMC Flexible Cell Manufacturing как альтернативу традиционному конвейеру.

В случае перехода на FMC рабочие места не связаны между собой традиционными конвейерными лентами, работа ведется на модульных станциях, называемых гибкими производственными ячейками. Именно такой подход оказывается экономически оправданным по мере резкого роста кастомизации бизнеса. Автоматические управляемые транспортные средства – так называемые AGV⁹⁸, индивидуально транспортируют части автомобилей только на те сборочные станции, которые релевантны данной модели. Вместо следования стандартному конвейерному маршруту каждый продукт проходит только через те рабочие станции, которые соответствуют его спецификациям, и собирается в соответствии с оптимизированной технологической последовательностью.

Задача оптимизации при такой сложной системе разделения труда под силу только ЦД. Все оборудование (включая машины AGV и инструменты) в цеху и логистика соединены и постоянно передают данные о своем местоположении на ЦД цеха, где эти данные обрабатываются в режиме, близком к режиму реального времени, и используются для централизованного управления всеми операциями в цехе. AGV получают информацию о том, к какой сборочной станции приближаться в тот или иной момент времени и как реагировать на проблемы [159].

⁹⁸ Автоматически управляемое транспортное средство (англ. Automated Guided Vehicle, AGV) – мобильный робот, применяемый в промышленности для перемещения товаров и материалов в производственном процессе и складском хозяйстве. Устройство оснащается системой, позволяющей ему ориентироваться в пространстве.

Цифровой двойник становится интеллектуальным помощником человека на разных этапах. В том числе выступает в качестве основы для создания тренажеров, основанных на реальных процессах.

Нехватка квалифицированных кадров, большая мобильность персонала, более частая смена работы требуют быстрого переучивания. Кадры с универсальным опытом уходят. Количество новых направлений и технологий так быстро растет, что появляется все больше специалистов узкого профиля. Есть также проблема потери уникального опыта с уходом на пенсию специалистов с многолетним опытом. Разрыв поколений наблюдается особенно остро в отечественной индустрии, где был период малой востребованности инженерных кадров. Все это стимулирует внедрение тренажеров на базе ЦД.

Цифровой двойник позволяет увеличить надежность работ путем сбора информации о текущем местонахождении активов и анализа потенциально опасных ситуаций при переналадке производства, предотвратить сбои в работе оборудования. Автомобильная промышленность – это огромный глобальный бизнес. По оценкам [160], 1 минута простоя для автопроизводителя может обойтись убытком в 50 000 долларов.

Цифровой двойник весьма эффективен и на этапе маркетинга и продаж. Для автопроизводителей важно использовать информацию от транспортных средств, от клиентов и от партнеров по сбыту для постоянного улучшения характеристик их автомобилей, но подчас эта ценная информация фиксируется бессистемно, данные оказываются разрозненными. ЦД позволяет сохранить и интегрировать подобный опыт.

Поможет ЦД и в отслеживании истории изменений в автомобиле на протяжении его жизненного цикла, в том числе и при смене автовладельца. При смене собственности история обслуживания транспортного средства может потеряться из-за отсутствия интеграции учетных ИТ-систем. Остаточная стоимость машины часто бывает занижена из-за отсутствия прозрачности истории использования. ЦД автомобиля позволяет хранить все данные о производительности, включая данные датчиков, техосмотров, историю обслуживания, данные об изменении конфигурации, замене деталей и гарантии.

Одна из современных тенденций – это переход на сервисную модель, которая предполагает, что клиентам выгоднее платить по-

ставщику, основываясь на использовании функций автомобиля, а не платить авансом за все. Следуя этой тенденции, производители могут поддерживать ЦД для каждого VIN-номера (идентификационный номер транспортного средства) и по запросу пользователя включать/отключать определенные функции на определенный период времени.

Число настраиваемых функций в автомобиле увеличилось, что приводит к созданию огромного количества уникальных автомобилей. Для поставщика важно найти оптимальные конфигурации, востребованные рынком и выгодные для производителя. Наблюдения за предпочтениями пользователей в реальном времени могут быть получены с помощью ЦД автомобиля. Это поможет выявить набор функций, которые широко используются клиентами, и монетизировать данные конфигурации.

«Цифровая покупка» и обмен в онлайн становятся все более востребованы. Благодаря AR появляется практика, когда люди уже не идут в автосалон, чтобы протестировать автомобиль. Они могут почувствовать, как машина управляется, ведет себя на дороге, как звучит, не выходя из дома.

Клиенты, посещающие дилерский центр, тоже ожидают более качественного и персонализированного обслуживания, которое может быть улучшено за счет использования технологий дополненной реальности и создания более удобного и впечатляющего интерфейса общения с покупателем на торговой площадке, созданного на основе визуализации данных ЦД.

Уровень цифровых моделей позволяет имитировать глубокое погружение, то есть дает возможность не только визуализировать салон, но и воспроизводить акустические эффекты внутри него: можно будет услышать, как открываются и закрываются двери, шум мотора и даже шум дождя по крыше машины.

На каждом этапе жизненного цикла автомобиля генерируются данные. Большая часть этих данных остается изолированной внутри соответствующих этапов. Эта ситуация приводит к увеличению разрыва между физическими продуктами и их цифровыми копиями. Сближение физической и виртуальной копии на базе ЦД позволит решить многие проблемы, которые существуют сегодня в цепочке создания стоимости автомобиля.

Зарубежные проекты (примеры)

Можно упомянуть целый ряд конкретных компаний, использующих ЦД для создания и эксплуатации автомобилей.

Так, компания Maserati свидетельствует, что, для того чтобы более полно удовлетворять требования клиентов и сократить время выхода на рынок готовых изделий, внедрила технологии ЦД, используя решения от Siemens [161].

В частности, компания Siemens помогла Maserati разработать и внедрить технологии ЦД на заводе «Джованни Аньелли» (Avvocato Giovanni Agnelli Plant, (AGAP)), который находится недалеко от Турина и производит представительский седан Ghibli, а также более крупный спортивный седан Quattroporte.

С помощью программного обеспечения Siemens Maserati создала ЦД Ghibli, который до последнего винта соответствовал оригиналу и сыграл ключевую роль при разработке автомобиля, уменьшив затраты и сократив время разработки на 30%.

Volkswagen также свидетельствует, что внедряет технологию ЦД, которую в компании называют «virtual twin» (виртуальный двойник). Внедрение позволило Volkswagen создавать цифровые 3D-прототипы различных моделей автомобилей, таких как, например, Golf. ЦД поддерживают производственный процесс и разработку автомобилей, предоставляя сотрудникам компании в разных странах мира подробные данные модели в режиме реального времени.

В виртуальной инженерной лаборатории в Вольфсбурге Volkswagen развивает применение цифровых инструментов в сочетании с дополненной реальностью, используя технологию Microsoft HoloLens, что позволяет инженерам и дизайнерам просматривать и изменять цифровые двойники с помощью жестов и голосовых команд.

Компания Hero MotoCorp – крупнейший в мире производитель двухколесных транспортных средств, опубликовала информацию о том, что развивает проект класса ЦД, начиная с 2016 г. По свидетельству сотрудников, Hero MotoCorp была первой автомобильной компанией в Индии, взявшей за внедрение технологии ЦД. Решение строилось с использованием платформы 3DEXPERIENCE от компании Dassault Systèmes [162].

ЦД помог стандартизовать производственные процессы, создать единый репозиторий данных, планировать сборочный процесс суще-

ствующих и новых моделей, оптимизировать временные и материальные затраты.

Цифровой двойник производственного оборудования, которое потребуется в будущем, дал возможность работать с цифровой копией и вносить необходимые изменения прежде, чем инвестировать в реальное оборудование. Решение позволило производить оценку технологичности новых моделей транспортных средств, определять проблемы до начала производства, своевременно осуществлять корректирующие действия, сократить время выхода на рынок, а также обеспечить доступ к трехмерным учебным материалам и перейти на безбумажный документооборот. Использование ЦД упростило планирование логистики, обеспечило минимизацию складских запасов, оптимизировало использование погрузочно-разгрузочного оборудования и рабочей силы.

Американская компания Tesla, производящая электромобили, – это еще одна компания, которая инвестирует в технологию ЦД. Данные, собранные с датчиков, позволяют отслеживать рабочее состояние электромобиля, а также выявлять проблемы на ранних этапах, чтобы избежать дорогостоящего ремонта. Tesla использует приложение ЦД, чтобы обеспечить лучший сервис и надежность каждого продаваемого экземпляра электромобиля. После того как машина поступает в эксплуатацию, Tesla обновляет программное обеспечение на основе данных датчиков и загружает обновления в свои продукты. Этот процесс разработки программного обеспечения, основанный на данных, позволяет более эффективно распределять ресурсы и значительно улучшить взаимодействие с пользователем электромобиля [163].

Команды Формулы-1 также используют технологию ЦД для анализа влияния изменений в автомобиле и характере вождения на положительный результат. Анализировать множественные сценарии намного дешевле и быстрее с использованием ЦД, чем вносить изменения в реальный автомобиль [164].

О возможности радикальной оптимизации процесса разработки автомобильных компонентов с помощью ЦД сообщала также компания Mackevision. На форуме Daimler EDM CAE, в Штутгарте (2017 г.), она продемонстрировала ЦД двигателя Daimler. Модель была доступна как на экране, так и в качестве приложения для виртуальной реальности, предоставляя пользователю возможность оценить рабо-

ту двигателя, выполняя над ним различные манипуляции, – вращать, создавать поперечные сечения в любом месте и рассматривать поведение конкретных компонентов при различных оборотах двигателя.

Совместная работа инженеров и проектировщиков с подобной «работающей цифровой моделью» в режиме реального времени позволяет существенно ускорить принятие решений по внесению тех или иных изменений в конструкцию. Доступность подобных цифровых прототипов дает возможность существенно сократить цикл разработки, снизить время выхода на рынок.

Отечественные проекты (примеры)

Считается, что в России технология ЦД впервые была реализована именно в области автомобильной промышленности, в рамках проекта «Кортеж», – для разработки единой модульной платформы и проектирования кузовов лимузина, седана, минивэна и внедорожника [165].

Проект автомобиля для первых лиц государства требовал обеспечения комфорта премиум-класса в сочетании с уникальными характеристиками безопасности.

За проектирование кузова и виртуальные краш-тесты отвечали специалисты Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ. Головным институтом по разработке был московский НАМИ⁹⁹. Проект стартовал в 2013 г., и в апреле 2014 г. к нему присоединились специалисты Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, у которых к тому времени уже был опыт работы с мировыми лидерами автопрома.

В рамках создания ЦД специалистами Инжинирингового центра СПбПУ были разработаны многоуровневые матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений. Построенная модель позволила провести десятки тысяч испытаний на виртуальных моделях и с первого раза пройти необходимые натурные испытания.

В июне 2016 г., в Берлине, на независимом полигоне, седан получил с первого раза высший балл по пассивной безопасности.

Работа специалистов Инжинирингового центра СПбПУ заняла около полутора лет. По свидетельству его руководителя, профессора А. И. Боровкова, было проведено как минимум 50 тысяч виртуальных испытаний [166].

⁹⁹ Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомобильный институт «НАМИ» (ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»).

В том же году натурные испытания в Берлине, на независимом полигоне, по программе Euro NCAP (краш-тесты), где седан проекта «Кортеж» с первой попытки получил высший балл – 5 звезд, подтвердили высочайший уровень адекватности разработанных «умных» математических моделей, составлявших основу созданных цифровых двойников.

Этот уникальный для России результат стал возможным благодаря системному применению технологии цифровых двойников на этапе проектирования. Все работы, включая виртуальные испытания на разработанных виртуальных стендах и полигонах, были выполнены на цифровой платформе CML-Bench, которая, во многом благодаря этим работам, была в июле 2017 г. удостоена Национальной промышленной премии Российской Федерации «Индустрия».

Всего над проектом работали около 150 организаций. Экспорт автомобилей бренда «Aurus» планируется начать в 2020–2021 гг. [167].

Следует отметить, что Центр компетенций НТИ СПбПУ и группа компаний CompMechLab ведет проекты не только для российского автопрома.

Так, в 2016 г. компания выиграла международный тендер на модернизацию кузова китайского семиместного внедорожника. Компания-производитель китайского автомобиля – один из мировых лидеров автопрома BAIC Group – поставила российским инженерам жесткие условия, предписывающие необходимость изготовления машины из тех же материалов и на тех же станках без модернизации производственного процесса.

BAIC Group (Beijing Automotive Industry Holding Co., Ltd.) – крупнейшая государственная автомобильная корпорация Китая, основанная в 1958 г., – в рейтинге 2017 Fortune 500 Global List корпорация занимала 137 место, ее годовая выручка составила 62 млрд долларов.

Работа была выполнена инженерами Центра НТИ СПбПУ совместно с группой высокотехнологичных инжиниринговых компаний CompMechLab.

Изначальная масса кузова внедорожника составляла 400 кг. Перед инженерами была поставлена задача снизить этот показатель на 6–7%, то есть добиться уменьшения массы на 24–28 кг. Наиболее часто для подобных целей конструкторы выбирают такие решения, как

замена материалов и уменьшение толщины стенок отдельных узлов конструкции. Главный недостаток такого подхода – потребуются большие затраты времени и финансов. В данном случае проектная команда CompMechLab предложила тотально использовать метод топологической оптимизации конструкции и оптимального распределения материала для заданных нагрузок и граничных условий, соответствующих определенному набору целевых показателей, в первую очередь, в условиях высокоскоростных, сильно нелинейных процессов деформирования – краш-тест. «Принципиальная новизна подхода состоит в реализации комплексной стратегии снижения массы кузова автомобиля (BIW – Body in White) путем одновременного изменения топологии и параметрической многовариантной оптимизации конструкции» [168].

Для достижения поставленных целей инженеры использовали цифровую платформу CML-Bench, которая обеспечивает:

- автоматизацию инженерных расчетов;
- генерацию и обработку больших объемов содержательных данных (Smart Big Data);
- каталогизацию моделей расчетных вариантов;
- автоматизированную подготовку сборочных файлов;
- обработку и визуализацию результатов виртуальных испытаний;
- капитализацию результатов интеллектуальной деятельности и формирование Digital Brainware¹⁰⁰.

Разработанный инженерами «умный» цифровой двойник (Smart Digital Twin) внедорожника содержал информацию о каждом узле механизмов автомобиля (двигателя, подвески, капота и крышки багажника, стеклоподъемников и т. д.). Исчерпывающие данные о кинематических, динамических и прочностных особенностях узлов позволяли оценить качество функционирования этих механизмов в различных эксплуатационных режимах. Параллельно с оптимизацией инженеры проводили краш-тесты, виброакустический и прочностной анализы. Влияние каждого изменения в конструкции проверялось на все расчетные случаи.

«Опыт, получаемый в процессах разработки и краш-тестов, аккумулируется в системах больших данных (Smart Big Data) и закладывает основу для работы интеллектуальных помощников (AI assistants, система CML_AI) инженеров-разработчиков. Такая интеллектуализа-

¹⁰⁰ В данном контексте подразумевает преемственность научной школы, оцифровку всех имевшихся разработок, начиная с советского наследия.

ция и автоматизация процесса разработки позволяет выйти на принципиально новый уровень проектирования, учитывать в многоуровневой матрице требований/целевых показателей и ресурсных ограничений проекта до 40 000 характеристик проектируемого изделия, создавать решения, выходящие за рамки интуиции главного конструктора» [169].

При создании «умного» цифрового двойника внедорожника были использованы результаты более 1500 виртуальных испытаний, в ходе которых удалось фактически «запрограммировать» поведение каждого элемента конструкции в эксплуатационных и аварийных условиях. Древообразная структура ветвления решений позволяла отделять и развивать самые перспективные из них с точки зрения достижения целевых показателей.

После всех циклов оптимизации и выполнения краш-тестов, анализа виброакустических и прочностных характеристик, выбранная стратегия обеспечила уменьшение массы на 30 кг (7,5%). В кузове у 51 детали были заменены материалы на более прочные, а у 98 деталей была изменена толщина. Среднее улучшение результатов краш-тестов с точки зрения смещений внутрь салона составило около 30%.

Несмотря на целый ряд временных, технологических и производственных ограничений, российские инженеры завершили проект в рекордный для отрасли автомобилестроения срок – за 2,5 месяца.

Использование «умного» цифрового двойника для реализации проекта по снижению массы кузова автомобиля позволило реализовать следующие преимущества:

- оперативное управление изменениями и обеспечение непрерывного характера разработки;
- учет поведения до 200 различных материалов, среди которых металлы, сплавы, полимеры, композиционные материалы, метаматериалы¹⁰¹ с оптимальной микроструктурой;
- учет сопряжения элементов конструкции кузова между собой посредством сварных точек и швов, клеевых соединений, для каждого из которых характерна своя модель поведения при различных воздействиях;
- сокращение объемов натурных испытаний в 25 раз;
- сокращение на порядок срока разработки [170,171].

¹⁰¹ Композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой.

По данным ПАО «КАМАЗ» [172], на автогиганте активно ведутся работы по созданию цифрового двойника производства.

Внедрен продукт Siemens PLM Software – решение для создания цифровых двойников производства, технологических процессов и изделий.

Технология изготовления деталей и сборки автомобилей разрабатывается в Teamcenter Manufacturing; программы для управления станками – в NX CAM; материальные потоки моделируются в Plant Simulation. Полный двойник технологического процесса создается на базе Process Simulate, программного продукта, который дает возможность инженерам анализировать собираемость изделий и проводить виртуальную пуско-наладку оборудования.

По состоянию на конец 2018 г. были созданы 3D-модели 28 станков с ЧПУ и 20 универсальных станков, а также более 50 единиц различного технологического оборудования. Это – роботы, манипуляторы, кантователи, рольганги и другие приспособления. 3D-модели применяются при моделировании таких технологических процессов, как механообработка, сборка, для размещения оборудования на 3D-планировках заводов. В области проектирования новых производств технологи блока развития ориентированы на новый технологический уклад с элементами индустрии 4.0 и повышение качества автомобилей марки «КАМАЗ».

За 11 месяцев 2018 г. на ПАО «КАМАЗ» было спроектировано 1780 новых изделий различных видов оснастки – станочной, сборочной, сварочной, термической, разнообразного режущего инструмента, контрольных приспособлений, а также технологического оборудования. По разработкам конструкторов технологического центра изготовлено около 1800 изделий. Практически все они успешно внедрены в производство [173].

В 2018 г. ПАО «КАМАЗ» и СПбПУ начали сотрудничество по проекту «Универсальная модульная платформа автобуса, электробуса, троллейбуса». Головным исполнителем проекта выступает Инжиниринговый центр (CompMechLab) СПбПУ. Целью проекта является создание инновационной универсальной пассажирской платформы (УПП) для нового модельного ряда автобусов, электробусов, троллейбусов с применением виртуальных испытаний на соответствие сертификационным требованиям. В проекте используются цифровые двойники различных вариан-

тов исполнения универсальной пассажирской платформы и ее производства [174].

В проекте применяются передовые производственные технологии: новые и перспективные материалы специального назначения, аддитивные технологии производства, промышленная робототехника, разработка цифровых двойников различных вариантов исполнения УПП, ее элементов и сопутствующего производства, а также разработка виртуальных испытательных полигонов и проведение виртуальных испытаний УПП на соответствие сертификационным требованиям.

О внедрении технологии ЦД сообщают также специалисты Ульяновского автомобильного завода. По данным ИТ-директора УАЗа, на предприятии ведется проект «Цифровой двойник изделия», который на четверть ускорит выпуск УАЗ «Патриот» [175]. Для построения ЦД на заводе также выбрали решение от компании Siemens.

ЦД в аэрокосмической отрасли

Технология ЦД в существенной мере направлена на повышение уровня безопасности, исключение вероятности нештатных ситуаций, предотвращение аварий. Аэрокосмическая отрасль, безусловно, требует особой адаптации к аварийным ситуациям. На виртуальных моделях можно просчитать нештатные ситуации, которые невозможно отработать при летных испытаниях. Вероятно, именно поэтому специалисты аэрокосмической промышленности были первопроходцами в использовании ЦД для управления летательными аппаратами и обеспечения их жизнедеятельности.

Согласно отчету Business Wire [176] 75% руководителей военно-воздушных сил США высказывают доверие к технологии ЦД и полагают, что она позволит решить многие проблемы в аэрокосмической отрасли, прежде всего кардинально улучшив возможности обработки резко растущего объема данных о продуктах и услугах.

Представив в первой главе нашей книги схему эволюции ЦД самолета (рис. 1.61), мы уже говорили о том, что авиационные компании активно используют ЦД для всех этапов жизненного цикла летательных аппаратов. В этом разделе поговорим о конкретных проектах в данной отрасли.

Одной из первых среди авиационных компаний технологию ЦД внедрила Boeing. Еще в 2018 г. ее генеральный директор отметил,

что «в авиации наступает эра цифровых двойников. Технология ЦД станет крупнейшим драйвером повышения эффективности производства для крупнейшего в мире производителя самолетов в течение следующего десятилетия» [177]. Он сообщил, что Boeing переходит к проектированию на основе моделей, оцифровывая всю систему проектирования и разработки, включая информацию о цепочках поставок, данные из производственной системы, а также системы обслуживания и поддержки. В результате производителю самолетов с помощью технологии ЦД удалось на 40% улучшить качество деталей и систем, которые он использует для производства коммерческих и военных самолетов.

Наибольшее число публикаций, связанных с применением ЦД в авиационной отрасли, относится к стадии управления техническим состоянием самолета. Если первые системы управления техническим состоянием самолета контролировали только несколько ключевых элементов двигателя или планера, то сегодня, с развитием IoT, мониторинг сотен параметров стал реальностью.

Целый ряд компаний объявил о создании цифровых двойников авиационных двигателей и об использовании последних для обеспечения большей безопасности полета.

Один из пионеров разработки цифровых решений, компания General Electric, создала ЦД для своего семейства двигателей GE60, а также помогла разработать первый в мире цифровой двойник для шасси самолета (датчики, размещенные в типичных точках отказа, измеряют критичные параметры, такие как давление в гидросистеме и температуру в системе торможения, позволяя тем самым предсказать неисправности и оставшийся ресурс шасси).

Для этих целей GE Aviation использовала свой продукт Predix, который обеспечивает интегрированную платформу для хранения, анализа и создания ЦД в различных промышленных приложениях.

Согласно публикации специалистов центра глобальных исследований General Electric (г. Нискаюна, шт. Нью-Йорк) за 2017 г. [178] компания использует ЦД каждого производимого реактивного двигателя, что позволяет следить за его характеристиками на земле, пока реальный двигатель находится в воздухе. То есть у каждого реактивного двигателя компании есть свой ЦД, который позволяет команде в исследовательском центре следить за его состоянием на протяжении всего времени производства и эксплуатации.

Реактивные двигатели являются сложнейшими агрегатами, производство которых доступно крайне узкому кругу компаний.

Ведущие производители, такие как General Electric и Pratt & Whitney, а также британская компания Rolls-Royce Holdings – все обратились к использованию технологии ЦД.

Элементы двигателя работают при экстремальных условиях. Например, вращающиеся лопасти двигателя могут подвергаться воздействию газа при температурах до 1600°C и испытывать высокие нагрузки во время движения.

Сегодняшние авиационные двигатели имеют системы сбора и передачи данных, которые могут отслеживать и хранить данные, измеряемые в петабайтах. Эти данные могут быть основой для работы ЦД летательного аппарата, позволяющего проводить расширенную аналитику, прогнозировать сбои и снижать затраты на обслуживание [179].

Цифровой двойник позволяет рассчитывать параметры – температуру, давление, скорость воздушного потока, которые должны быть обеспечены в разных точках двигателя при его эксплуатации.

После того как двигатель изготовлен, на него устанавливают примерно тысячу датчиков, которые измеряют параметры в критических точках.

Операторы имеют возможность сравнить данные, собранные датчиками, с аналогичными данными, полученными с ЦД двигателя (цифровой двойник может проходить те же режимы, которые испытывает двигатель, когда он эксплуатируется в различных условиях и подвергается износу). Если наборы данных с физического и виртуального двойников не совпадают, следовательно, в двигателе происходит что-то нежелательное, и, вероятно, он нуждается в ремонте.

Понимание того, как каждый отдельный двигатель проходит свой жизненный цикл, помогает разработчикам создавать конструкции нового поколения.

Одна из важнейших особенностей ЦД заключается в том, что он учитывает огромное количество факторов, с которыми сталкивается двигатель в условиях реальной эксплуатации: на некоторых рейсах больше людей, чем на других (что создает большую нагрузку на двигатель), в разных городах разный климат (наличие песка в воздухе, повышенные или пониженные влажность и температура),

разные пилоты имеют свои особенности пилотирования. И от всех этих факторов будет зависеть режим работы двигателя и расход топлива. Каждый ЦД анализирует весь этот «жизненный опыт», и в совокупности это дает общее понимание картины, помогает настраивать действующие и модифицировать будущие конструкции двигателей. «Наработки» ЦД помогают сформировать рекомендации для эксплуатации двигателя с определенным сроком службы, получить статистику на основе персональных историй и понять, как создавать и эксплуатировать новые двигатели.

Специалисты Rolls-Royce также используют ЦД. В частности, команда в городе Дерби (Великобритания) публикует данные об использовании полнофункционального ЦД двигателя Rolls-Royce Trent¹⁰² на основе мультidisциплинарного цифрового моделирования [180]. Цифровой двойник дает возможность специалистам компании прогнозировать поведение двигателя в экстремальных условиях, которые невозможно моделировать в реальных испытаниях. Это позволяет Rolls-Royce проводить виртуальные тесты вероятных аварий, что улучшает анализ каждого возможного нештатного события. Например, ЦД позволяет имитировать такую редкую ситуацию, как разрушение лопатки двигателя, и моделировать вибрации во время продолжения полета, что является частью процесса сертификации двигателя.

Технологии ЦД применяются и в отечественной авиационной промышленности. Например, по данным компании «Ростех», АО «ОДК» (Объединенная двигателестроительная корпорация) использует цифровые двойники при проектировании, производстве и эксплуатации двигателей SaM146, ПД-14¹⁰³, ПД-35, морских газотурбинных двигателей и двигателя для Су-57.

По свидетельству генерального конструктора «ОДК» Ю.Н. Шмотина, ЦД позволяет сократить сроки разработки опытных образцов, ускоряет процесс их приведения в соответствие техзаданию, снижает стоимость эксплуатации и повышает скорость вывода изделия на рынок.

¹⁰² Серия авиационных турбовентиляторных двухконтурных двигателей.

¹⁰³ ПД-14 — семейство российских перспективных гражданских турбовентиляторных двигателей с тягой на взлете от 9 до 18 тонн, разрабатываемое корпорацией «ОДК». Головной разработчик — АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь), головной изготовитель — АО «ОДК-Пермские моторы» (г. Пермь).

Использование технологии ЦД при создании перспективных двигателей ПД-14 и SaM146 позволило сократить время получения первого натурального образца, отвечающего требованиям технического задания, до 3,5 лет [181].

ОКБ им. А. Люльки (входит в АО «ОДК») и ООО «Саровский Инженерный Центр» реализуют проект по интеграции технологии VR с технологией ЦД газотурбинного двигателя.

На этапе проектирования технология VR позволяет наглядно представлять данные, получаемые при использовании цифровых двойников, быстрее выявлять и исправлять ошибки в геометрии деталей, верифицируя математические модели. На стадии эксплуатации средства VR обеспечивают возможность оперативного анализа расчетных и фактических данных состояния двигателя, позволяя выявлять неисправности, сокращать затраты на регламентное обслуживание.

Можно также привести примеры использования ЦД для оптимизации процесса производства самолетов. В частности, цифровой двойник применяется в компании Airbus, обеспечивая цифровые модели продуктов и производственных линий данными в реальном времени и помогая оптимизировать процесс планирования и управления производством самолетов [182].

При этом в Airbus отмечают, что авиационная промышленность весьма консервативна и цифровые новшества должны быть тщательно спланированы.

Это связано со строгими требованиями к ИТ, которые должны поддерживаться на протяжении всего жизненного цикла серии самолетов (который может составлять 70 лет и более).

На разработку новой модели уходит примерно десять лет, затем самолет производится и эксплуатируется не менее 30 лет. Проходит еще 30 лет, прежде чем последний доставленный самолет выйдет из эксплуатации. Документы должны храниться в течение всего этого периода. Поэтому ИТ-среду можно перестраивать только при запуске новой программы. Изменение системы требует повторной сертификации, что увеличивает стоимость нового решения.

В 2017 г. у Airbus было почти 6900 заказов, что должно обеспечить компании загрузку как минимум на ближайшие 10 лет. При этом подобная загрузка ставит перед компанией задачу увеличения производительности, обеспечения оптимизации процессов производства

и сборки. Одной из проблем являются большие затраты времени на оценку состояния изделия и выявление неисправностей, в результате чего остается мало времени для ее решения. ЦД, разработанный совместно Airbus и производителем программного обеспечения ASCon Systems в рамках проекта Prostep ivip, обеспечивает мониторинг хода работ на заводе с помощью датчиков с последующей обработкой данной информации (обработка ведется практически в реальном времени), что позволяет снизить разрыв между реальным производством и его виртуальными моделями, сделать работу в цехе более прозрачной.

Самая большая проблема, с которой сталкивается авиационная отрасль, – это сложность и дороговизна обслуживания летательных аппаратов. Расходы на техническое обслуживание и ремонт воздушных судов продолжают расти, несмотря на все нововведения в методах технического обслуживания. Качественная поддержка самолетов – это снижение рисков отмены рейсов из-за незапланированного технического обслуживания и, следовательно, залог предоставления высокого уровня сервиса для клиентов.

Требуются огромные затраты, чтобы гарантировать, что все части самолета готовы к работе, а проведение проверок перед каждым полетом для обеспечения необходимого уровня безопасности требует немалых людских ресурсов. У специалистов есть предел в восприятии информации, и в этой связи использование технологии ЦД, которая позволяет автоматизировать мониторинг состояния и структуры деталей самолета в реальном времени, весьма перспективно.

Об использовании цифровых двойников для мониторинга состояния самолетов свидетельствуют не только крупнейшие авиационные компании. Например, один из лидеров на рынке сельского хозяйства – компания AmVac, сообщает, что ей удалось повысить эффективность своих летательных аппаратов (самолетов, дронов) для мониторинга полей коммерческих сельскохозяйственных культур именно за счет применения ЦД для анализа и прогнозирования состояния и технического обслуживания самолетов.

С помощью цифровых двойников авиакомпания могут с высокой точностью прогнозировать оставшийся ресурс критически важных систем, осуществлять упреждающее обслуживание двигателей и других систем, чтобы повысить эксплуатационную готовность

и эффективность, продлить полезный жизненный цикл и снизить стоимость обслуживания. ЦД способны смягчать последствия повреждений или деградации материалов, активируя механизмы самовосстановления или рекомендуя изменения в режиме полета для уменьшения нагрузки, увеличения продолжительности жизни систем и надежности полета.

ЦД в судостроении и эксплуатации водного транспорта

Судя по числу публикаций о применении ЦД в судостроении, эта отрасль отстает от автомобилестроительной и авиационно-космической отраслей. Учитывая достаточно длительный цикл разработки в судостроительной отрасли, она медленнее внедряет современные решения в области цифрового проектирования. Тем не менее конкуренция заставляет проводить цифровизацию на судостроительных верфях. А такие сопутствующие процессы, как, например, рост общественного давления, направленного на сокращение выбросов оксидов углерода и других вредных воздействий на морские экосистемы, стимулируют применение цифровых технологий и технологий ЦД в том числе.

Например, финская машиностроительная компания Wartsila, которая работает также и в области судостроения (судовые двигатели), сообщает об успешном опыте использования технологии ЦД для создания инновационных конструкций судов.

Аналитическая компания StartUS Insights, занимающаяся исследованием технологических трендов, опубликовала отчет [183], в котором проанализировала 77 проектов, направленных на создание цифровых двойников для судостроительной отрасли, и выделила из них четыре наиболее важных.

Одним из наиболее интересных и масштабных проектов, упомянутых в исследовании, является проект Open Simulation Platform.

Он стартовал в 2018 г., когда консорциум судостроительных компаний объединил усилия для совместного создания цифровых двойников для проектирования, ввода в эксплуатацию и обслуживания сложных интегрированных систем в области судостроения.

Для достижения этих целей и был создан совместный отраслевой проект Open Simulation Platform. Соучредителями выступили DNV GL, Kongsberg Maritime, NTNU и SINTEF Ocean, а также еще 20 партнеров, включая британскую Rolls-Royce Marine и Hyundai Heavy

Industries. Согласно заявлениям участников этот высокопрофессиональный союз выведет практику внедрения ЦД в судостроении на уровень, соизмеримый с уровнем развития ЦД в автомобилестроении и авиапроме.

В рамках проекта разрабатывается одноименная платформа с открытым исходным кодом, которая объединяет технологии облачных вычислений и машинного обучения для анализа и прогнозирования состояния критичных элементов системы, определяющих эксплуатационные характеристики судна.

Участники консорциума отмечают, что, по мере того как разработчики стремятся оснастить суда все большим числом цифровых решений от разных поставщиков, конечные изделия становятся все более сложными и уязвимыми для сбоев. Цель проекта – удовлетворить растущую потребность промоделировать совместную работу разных систем и снизить вероятность дорогостоящих непредвиденных аварийных ситуаций.

По словам участников консорциума, несмотря на то, что некоторые поставщики уже предлагают услуги ЦД, их применение ограничено высокой стоимостью, проблемами функциональной совместимости моделей от разных производителей, а также отсутствием общей инфраструктуры моделирования.

Одной из целей проекта Open Simulation Platform является создание стандарта для моделирования и виртуальных испытаний в судостроительной отрасли, позволяющего как повторное использование моделей, так и совместные виртуальные испытания систем для решения задач при проектировании, постройке и эксплуатации судов.

Другой проект, отмеченный в отчете StartUS Insights, – это проект по созданию платформы принятия решений на основе анализа данных Veristar AIM 3D.

Французская корпорация Bureau Veritas Group, специализирующаяся в области испытаний, инспекции и сертификации, заключила партнерское соглашение с Dassault Systèmes для разработки сложной платформы управления целостностью активов (Asset Integrity Management, AIM) – Veristar AIM 3D, которая позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы, повысить безопасность судна, облегчить сбор данных и принять решение о надлежащем обслуживании судов и возможном выводе их из эксплуатации в конце жизненного цикла.

В основе платформы лежит цифровой двойник судна на базе 3D-модели, который дает возможность пользователям увеличить масштаб и подробность отображения конкретного объекта или узла и получить доступ к параметрам их производительности, условий эксплуатации и т. д.

Следующий проект, отмеченный аналитиками StartUS Insights, – это система, разработанная старейшей испанской государственной судостроительной компанией Navantia, которая специализируется на проектировании и строительстве высокотехнологичных военных и гражданских судов, активно развивая цифровые технологии.

Центральное место в программе цифровизации Navantia занимает создание цифрового двойника, который используется на всех стадиях жизненного цикла судна, включая участие в конкурсе, проектирование, производство, тестирование, обслуживание. ЦД развивается параллельно созданию реального судна и имеет элементы, относящиеся к наземному и бортовому оборудованию, – обе эти части передаются клиенту [184]. Согласно данным компании, использование ЦД позволяет решать многие задачи, включая возможность моделирования работы критических систем судна, оптимизировать проектирование, стадию тестирования и валидации, осуществлять мониторинг систем в реальном времени, организовать прогнозное обслуживание, осуществлять поддержку принятия управленческих решений и снабжать сотрудников постоянно обновляемой информацией.

Четвертый проект, на который обратили внимание авторы исследования применения ЦД в судостроении, – это проект американской ИТ-компании DXC Technology. Созданная в 2017 г. (на базе объединения активов компании Computer Sciences Corporation и подразделения корпоративных ИТ-услуг HPE Enterprise Services корпорации Hewlett Packard Enterprise) DXC Technology специализируется на оказании услуг в сфере информационных технологий, в том числе на ИТ-консалтинге, ИТ-аутсорсинге, обслуживании ИТ-техники и системной интеграции.

DXC Technology участвует в проектах для военно-морских компаний, в которых изучаются возможности использования ИИ в цифровых двойниках для прогнозирования отказов критических элементов судов. В частности, речь идет об использовании ЦД для моделирования чрезвычайных и боевых ситуаций, таких как, например, распространение пожара в случае атаки на военно-морские боевые корабли.

Российские судостроители также сообщают о том, что активно внедряют цифровые технологии и занимаются созданием цифровых двойников. Так, Средне-Невский Судостроительный Завод (СНСЗ) еще в 2017 г. объявил о реализации программы «цифровая верфь». В рамках этой программы запланировано создание цифровых двойников, которые позволят проводить виртуальные испытания, существенно сократив затраты предприятия. По словам руководства [185], проект предполагает интеграцию всех программных продуктов, которые будут использованы в производственной деятельности верфи, создание электронного каталога и базы данных, описывающих весь продукт, начиная от базовых свойств материалов и комплектующих и заканчивая списком поставщиков. Проект предполагает также создание цифровых двойников, на которых можно провести виртуальные испытания, что позволит минимизировать затраты, сокращать время, менять конфигурацию изделий.

По информации генерального директора Санкт-Петербургского морского бюро машиностроения «Малахит», на предприятии решается задача создания цифрового двойника атомной подводной лодки, воспроизводящего не только форму, но также свойства и поведение уже построенного объекта. С этой целью «Малахит» взаимодействует с математиками и специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров, Нижегородская область), сотрудниками ОКБМ «Африкантов», осваивает технологии суперкомпьютерных вычислений и внедряет пакет программ «Логос» [186].

ЦД в железнодорожном транспорте

Железная дорога – это сложная, многокомпонентная транспортная система, расположенная на большой площади.

В отрасли активно осваивают технологии ЦД для моделирования как элементов и систем подвижного состава, так и поведения потоков поездов, а также для прогнозирования обслуживания инфраструктуры и оптимизации ремонтных работ.

Среди первых разработки в этой области представила компания General Electric, создав ЦД своего локомотива серии Evolution под названием Trip Optimizer, который позволяет оптимизировать поездку на основе информации с датчиков, постоянно собираемой в процессе эксплуатации. Датчики могут контролировать до 250 параметров,

включая вибрации, температуру двигателя, деформации и давление в ключевых точках. Набор алгоритмов обрабатывает информацию, оптимизирует режим работы и сигнализирует о потенциальных проблемах операторам GE Transportation.

По оценкам подразделения GE Transportation, цифровой двойник может помочь клиентам General Electric сэкономить 8–10% на топливе и снизить выбросы на 174 тыс. тонн в год [187].

Компания Alstom, которая производит поездные составы, транспортные системы, оказывает услуги по ремонту и техническому обслуживанию поездов и железных дорог, и немецкая консультационная компания SimPlan AG, специализирующаяся в области математического моделирования для автомобилестроения и логистики, разработали ЦД для поддержки принятия решений в сфере технического обслуживания парка поездов. Работа выполнена в рамках финансируемого Европейской комиссией проекта EU OPTIMIZED.

Компания Alstom, осуществляя техническое обслуживание парка поездов на железной дороге западного побережья в Великобритании, сталкивается с необходимостью оптимизации планирования технического обслуживания составов, включая такие задачи, как оценку необходимого количества поездов, пути их следования, режимы (периодичность технического обслуживания, внеплановое обслуживание в случае поломок и т. п.).

Для решения задачи многопараметрической оптимизации технического обслуживания было решено создать цифровой двойник с помощью AnyLogic – одного из лидеров в разработке приложений имитационного моделирования для бизнеса. Описание проекта доступно в статье, представленной на конференции в «A Case Study On Simulation Of Railway Fleet Maintenance» (2018 г.) [188].

Для создания этой модели разработчики выбрали метод агентного моделирования, что позволило виртуально отразить железнодорожную сеть и ее множественные элементы. Решение предлагает интерактивный интерфейс, отображающий на карте все процессы, в которых участвуют железнодорожные составы. Щелчок мыши по любому элементу интерфейса позволяет получить справку, в том числе данные о суммарном количестве отработанных поездом часов; о профилактических операциях по техническому обслуживанию и ремонту, которые уже были проведены или только запланированы, а также о задействованных в этих операциях депо; о времени, ко-

торое, в соответствии с расписанием, поезд может простаивать для проведения технического обслуживания.

Развитие модели предполагает установку датчиков на поезда, с тем чтобы данные с них поступали непосредственно в модель, также планируется ввести в модель элементы машинного обучения для более эффективного осуществления прогностического планирования.

Цифровой двойник позволяет оценить работу системы и выявить узкие места, оптимизировать техническое обслуживание в цифровой среде, принять обоснованные решения, проиграть различные сценарии «что, если», принять решение в случае нештатных ситуаций.

Другой пример связан с использованием ЦД в компании, занятой повышением безопасности на железных дорогах Дании.

Инжиниринговая компания Fugro получила четырехлетний контракт на создание цифрового двойника железнодорожной сети Дании [189].

Для этого компания-разработчик будет осуществлять сканирование с использованием лидаров¹⁰⁴ на борту поездов, создавая виртуальную копию всей инфраструктуры, собирая информацию о путях и объектах вдоль железнодорожного коридора протяженностью 3000 км.

Компания Fugro была выбрана для реализации проекта «Цифровой двойник» компанией Banedanmark, национальным железнодорожным оператором Дании.

Предназначенный для повышения как безопасности, так и эффективности, цифровой двойник будет представлять модель железнодорожной сети высокой точности. Данные, собираемые в единое хранилище, будут использоваться для технического обслуживания, для прогнозирования и оптимизации работ по поддержке инфраструктуры, для управления активами, ландшафтного дизайна и для оказания помощи в работе строительных и сигнальных групп.

В России также ведутся работы по созданию ЦД для нужд железнодорожной отрасли. В частности, во «ВНИИЖТ» разрабатываются цифровые двойники верхнего строения пути, локомотива, перевозочного процесса [190].

Кроме того, во ВНИИЖТ реализован ЦД подвижного состава, который включает в себя модели узлов и процессов, происходящих

¹⁰⁴ Лидар – (LIDAR Light Detection and Ranging – «обнаружение и определение дальности с помощью света») – технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем.

в несущих элементах. Разработан ЦД электродвигателя НБ418К6, что позволило существенно увеличить срок его службы.

Создан цифровой двойник, в основе которого лежит прогнозная макромодель движения поездов, имитирующая работу не только физических устройств, но и комплекс процессов, связанных с управлением движения поездов. В 2019 г., в научном центре «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» АО «ВНИИЖТ» фактически была создана модель цифровой железной дороги, позволяющая прогнозировать транспортную ситуацию на заданный горизонт времени.

Основой ЦД является имитационная модель, воспроизводящая процессы движения поездов с учетом параметров инфраструктуры и условий пропуска, характеристик потоков и системы организации «окон» для проведения ремонтных работ. Созданный инструмент позволяет прогнозировать пропуск потока поездов с учетом возможностей инфраструктуры участков, а также прогнозировать сценарии развития инфраструктуры.

Российская железнодорожная отрасль активно развивается: прокладываются скоростные магистрали, внедряются передовые технологии, цифровизация и автоматизация, в том числе разрабатываются проекты класса ЦД.

Например, в рамках «Трансмашхолдинга» на Новочеркасском электровозостроительном заводе реализуется проект «Цифровой завод».

В рамках проекта запущено более 40 мероприятий, направленных на сбор фактических данных из разных сегментов деятельности предприятия.

На основе этих данных рассчитывается технологический процесс, который включает: производство, контроль загрузки оборудования, планово-предупредительные ремонты оборудования, контроль логистики и трудовых ресурсов.

ЦД в архитектурном проектировании и строительстве

В строительной индустрии и в архитектурном проектировании возникают задачи, сходные с теми, которые были рассмотрены выше (применительно к задачам машиностроения), хотя, конечно, в них есть своя специфика.

Разработчики строительных конструкций, создающие новый проект, должны обеспечить соответствие новых решений всем требованиям безопасности, провести натурные испытания, которые требуют времени и больших финансовых вложений.

Возможность протестировать свои идеи на виртуальных моделях, в которых учитывается максимальное число факторов влияния внешних условий, таких как погода, климат, ветровая нагрузка и т. п., существенно сокращает время разработки и вывода объекта на рынок. Что, собственно, и приводит к необходимости и целесообразности использования технологии ЦД.

Цифровой двойник, который позволяет осуществлять проведение испытаний на виртуальных прототипах, экономит существенные средства. При этом виртуальные испытания позволяют моделировать ситуации, которые практически невозможно имитировать при проведении натурных испытаний, например, когда речь идет о моделировании стихийных бедствий, таких как землетрясение или цунами.

ЦД в строительной отрасли применяются не только на стадии проектирования, но и на стадии обслуживания городской инфраструктуры. Доступ к моделям, которые постоянно синхронизируются с реальным объектом, дает возможность проанализировать различные траектории выполнения строительных работ, оценить их эффективность, стоимость и выбрать наиболее оптимальные, оценить прогресс выполнения работ и степень соответствия планам и спецификациям.

Цифровизация в строительной отрасли инициировала целый ряд IoT-проектов, в рамках которых датчики могут контролировать большое число параметров, получая информацию о проблемах с техническим обслуживанием (утечки воды, повреждения сооружений, нарушение климатических параметров и т. д.). Преодоление проблемы слабой интеграции между системами автоматизации достигается за счет применения технологии ЦД.

Основные преимущества использования ЦД в строительной отрасли (со ссылкой на компанию Willow, работающую в индустрии «умных» зданий) приведены в таблице 3.1 [191]. Несмотря на то, что отмеченные преимущества абсолютно справедливы, следует добавить, что ЦД также имеет важное значение на стадиях проектирования, концептуального дизайна и стадии вывода объекта из эксплуатации, которые играют важную роль в строительной индустрии.

Таблица 3.1

Положительный эффект от внедрения ЦД в строительной отрасли. Источник: Willow

Улучшения общего плана	Сдача и ввод в эксплуатацию	Эксплуатация	
Единый источник истины	Контроль доставки в цепочках поставок	Улучшенная аналитика производительности	Новые возможности получения дохода
Контроль за бизнес-информацией	Улучшенный инструмент для сдачи и ввода в эксплуатацию	Улучшенное управление соответствиями нормам	Сокращение риска, времени и затрат за счет интеграции систем
	Улучшенное управление утверждениями	Упрощенное отслеживание гарантий, графика амортизации, планирования капитальных и эксплуатационных расходов	Внедрение новейших технологий интеллектуального обслуживания
	Ускоренное отслеживание сроков ответственности за дефекты исполнения	Дальнейшее повышение экологической эффективности	Доступ к новейшим технологиям интеллектуальных зданий

Приложения класса ЦД набирают популярность в проектировании урбанистической среды на разных этапах ее жизненного цикла. Данные приложения по своей функциональности пересекаются с программным обеспечением BIM (Building Information Modeling) [192]. Причем на этапе проектирования BIM и ЦД имеют наибольшее пересечение.

Развитие систем BIM дает возможность говорить о создании нового класса информационных моделей со свойствами ЦД, позволяя обеспечить бережливое и эффективное управление инженерными и сервисными системами здания во взаимной увязке с городской инфраструктурой. ЦД здания позволяет повысить эффективность управления имущественным комплексом и его стоимостными параметрами за счет обратной связи с резидентами, посетителями и тонкой настройкой сервисного меню.

Технологии BIM и ЦД ведут свою историю с начала 80-х гг., еще до того, как сами термины были зафиксированы в их сегодняшнем виде. Распространение технологии, известной ныне как BIM, началось после того, как компании Autodesk и Bentley Systems начали популяризировать ее в начале 2000-х гг.

Позднее в строительной индустрии стали развиваться приложения, основанные на анализе коммерческой недвижимости для увеличения эффективности использования пространства, что поставило новые задачи моделирования и оптимизации взаимодействия человека с городской средой, которые стали успешно решаться на базе технологии ЦД.

В основе такого цифрового двойника лежит модель, генерирующая информацию о текущем состоянии подсистем, с учетом влияния внешних воздействий, погодных условий и поведения людей, и позволяющая прогнозировать какие системы и при каких условиях могут выйти из строя. Причем данная модель постоянно развивается по мере эксплуатации конкретного объекта.

По мере того как при проектировании здания все в большей степени пытаются учитывать запросы клиентов, требуются моделирование поведения людей и анализ возможности изменения дизайна пространства под их предпочтения, в ЦД здания добавляется очередной «слой» оптимизационных задач.

Вполне вероятно, что ЦД со временем полностью заменит BIM-продукты даже на таких этапах жизненного цикла, как проектирование и сборка объекта¹⁰⁵. Со временем появятся интегрированные ЦД, которые могут оптимизировать все этапы создания зданий и сооружений, включая проектирование, оптимизацию работ на строительной площадке, введение в эксплуатацию, поддержку и утилизацию урбанистической среды.

Мониторинг строящихся объектов

Важное применение ЦД в строительной отрасли – это мониторинг и анализ строящихся объектов. Захват данных в виде 3D-моделей реальности высокой точности (с привязкой к местности) позволяет интегрировать работу многочисленных проектных групп (создать так называемый «единый источник истины»), значительно снижает по-

¹⁰⁵ Следует отметить, что единой точки зрения по этому вопросу не существует. Ряд специалистов полагают, что технологии ЦД скорее дополняют технологии BIM.

требность в физическом посещении объекта.

Существенное ускорение в создании подобного рода моделей обеспечивают новые технологии захвата и обработки данных. В частности, активно применяется лазерное сканирование¹⁰⁶. Полученная таким образом цифровая модель может использоваться для контроля качества строительства и актуализации исполнительной документации объекта, подлежащего реконструкции.

Традиционные способы сбора информации о геометрии объекта связаны с множественными замерами и необходимостью стыковки фрагментов, что влечет ошибки за счет так называемого человеческого фактора и часто приводит к необходимости повторных выездов на объект и, соответственно, к увеличению сроков строительства. Лазерное сканирование позволяет минимизировать ошибки вышеописанных подходов.

Технология лазерного сканирования приводит к существенному сокращению полевых работ, а избыточный объем данных лазерного сканирования дает возможность получить максимально объективную информацию.

Современный лазерный сканер позволяет производить до нескольких сотен тысяч измерений в секунду в зависимости от требуемой плотности и точности измерений. Полученный набор (облако точек) представляется в виде трехмерной модели на базе огромного объема исходной измерительной информации.

В современных моделях осуществляется интеграция фотокамеры и лазерного сканера в одном устройстве, что упрощает задачу идентификации объектов, позволяя совмещать облака точек и цифровые фотографии. Лазерное сканирование дает возможность существенно увеличить точность геометрической модели, оперативно и точно контролировать отклонения реального объекта от проектного, создавать 2D-чертежи (планы, проекции, разрезы, сечения и т. п.).

Облака точек могут составлять терабайты информации и с высокой точностью описывать объекты инженерной инфраструктуры. Сканирование больших объектов позволяет мониторить профиль застройки целых кварталов.

Использование съемки с беспилотных летательных аппаратов позволяет еще более усовершенствовать создание трехмерных

¹⁰⁶ Лазерное сканирование позволяет оценить дальность объекта относительно источника излучения и на основе данной информации строить геометрическую модель объекта.

моделей. Показательным примером является создание цифрового двойника в рамках проекта по строительству в западной части штата Пенсильвания химического завода для производства полиэтилена компании Shell стоимостью в несколько миллиардов долларов [193]. Проект был признан новаторским, и компании Shell Chemical Appalachia LLC и Eye-bot Aerial Solutions были отмечены специальным призом компании Bentley Systems за разработку ЦД. Информация о проекте была представлена в презентации от Eye-bot Aerial Solutions на конференции SPAR3D2019 в рамках доклада «Использование дронов для создания единого визуального источника истины с помощью моделирования реальности».

Беспилотные летательные аппараты использовались для сбора информации в режиме реального времени, охватывая около двух квадратных километров территории. Трехмерная сетка была сгенерирована на основе 8000 еженедельно получаемых фотографий с использованием программного обеспечения Bentley ContextCapture и облачных сервисов Bentley.

Трехмерные данные оптимизировали совместную работу клиента и подрядчиков из 10 компаний, объединив более 500 конечных пользователей, занятых по разным направлениям проекта. ЦД обеспечил мониторинг хода строительства, позволил выявлять потенциальные проблемы на ранней стадии, облегчил контроль использования ресурсов и управление системами аварийного реагирования.

Цифровой двойник также может быть эффективен для оптимизации работ на строительной площадке. Согласно данным строительной индустрии, около 25% производительного времени тратится на ненужное перемещение и обработку материалов [194]. Технология ЦД, обеспечивая автоматизированный мониторинг использования техники и материалов, отслеживания отходов, перемещения работников по строительной площадке, позволяет более эффективно подходить к управлению ресурсами. ЦД подобного рода может также использоваться спасательными командами в случае чрезвычайной ситуации. Не стоит забывать, что строительная индустрия является одной из самых опасных отраслей в мире. По данным Бюро статистики труда, в Соединенных Штатах, в период с 2008 по 2012 г., на строительных площадках погибли более четырех тысяч строителей [195]. Цифровой мониторинг строительной площадки в реальном времени

с использованием ЦД позволяет предотвратить рискованное поведение людей, использование небезопасных материалов и деятельность в опасных зонах. Благодаря ЦД можно существенно увеличить безопасность строительных работ – спасти жизнь в реальном мире, используя мир виртуальный.

Оптимизация энергопотребления и использования пространства

Важна и весьма востребована роль ЦД в индустрии создания «умных» зданий для построения систем повышения операционной эффективности и оптимизации энергопотребления как на уровне отдельных зданий, так и на уровне целых кварталов. В этой области трудится целый ряд компаний. Например, компания IES (Integrated Environmental Solutions) использует технологии ЦД для оптимизации расхода энергии при проектировании инфраструктуры «умного города». Компания создала платформу ICL (Intelligent Communities Lifecycle) – набор взаимосвязанных инструментов поддержки принятия решений, которые облегчают планирование, проектирование, эксплуатацию и обеспечение оптимальной энергоэффективности архитектурной среды, используя IoT-технологии для определения способов экономии энергии.

Платформа ICL компании IES предназначена для архитекторов, инженеров градостроителей и менеджеров по энергетике.

В частности, IES разработала интерактивную модель трехмерной визуализации и генерального планирования для Технологического университета Наньянга (NTU) в Сингапуре, которая наряду с виртуальным тестированием, детальным эксплуатационным моделированием и оптимизацией производительности позволила на 31% (4,7 млн долл. США) снизить необходимость потребления энергии на территории всего кампуса.

Другой пример – компания Priva ECO из Нидерландов, которая применяет технологию ЦД для более рационального использования энергии и улучшения климата в здании. Искусственный интеллект использует мощности Microsoft Azure и интеллектуальные алгоритмы, разработанные Priva ECO. Интеллектуальная система мониторит «поведение здания», учитывая влияние таких факторов, как характер эксплуатации, уровень занятости помещений, характер тепловой нагрузки от людей и машин, условия в помещении для каждой

комнаты или зоны, температура наружного воздуха, прогноз погоды. На основании этой информации оптимизируется расход энергии для обеспечения комфортных климатических условий в здании.

Еще один метод создания ЦД на базе технологий Microsoft предлагает компания ICONICS – разработчик программного обеспечения для систем визуализации, интеллектуальной автоматизации и аналитики. ICONICS использует телеметрию оборудования для поиска возможных вариантов снижения эксплуатационных расходов арендаторов. Цифровые двойники ICONICS направлены на повышение энергоэффективности и занимаются отслеживанием фактических состояний и прогнозированием неисправностей, а также анализом степени заполненности пространства и уровнем его комфорта. Разработка ICONICS, получившая название Smart Spaces («умные» пространства), служит для поддержки принятия решений различными группами пользователей: менеджерами службы эксплуатации, экономистами, руководителями, собственниками объектов недвижимости.

Решение Smart Spaces предлагает визуализацию в масштабе реального времени, сбор и анализ данных по энергопотреблению и работе оборудования от инженерных систем автоматизации зданий или от IoT-сенсоров. Собранные модулями ICONICS данные интегрируются в платформу с машинным обучением Azure Machine Learning.

Еще одна важная задача, которая может быть решена с помощью технологии ЦД, – это оптимизация пространства. Компания Steelcase, имеющая более чем столетнюю историю проектирования рабочих помещений, представила решения, которые позволяют оптимизировать пространство с помощью ЦД.

Steelcase использовала Azure Digital Twins для создания советника Steelcase Workplace Advisor и мобильного приложения Find. Steelcase Workplace Advisor помогает руководителям организаций видеть, как используется пространство их помещений, и создавать новые рабочие места. Steelcase приводит пример работы с заказчиком – быстрорастущей компанией, которая испытывала проблемы с пространством для сотрудников. Благодаря проекту оптимизации обнаружилось, что коэффициент использования рабочего места в компании составлял всего 35%. Применение данных и аналитики для реконфигурации пространства позволило за короткое время увеличить этот коэффициент до 51%.

ЦД транспортной инфраструктуры

Бесперебойная работа транспортной инфраструктуры является крайне важной для жизни любого города. И эта задача также может быть решена с помощью технологии ЦД.

Интересный проект создания подобного ЦД был реализован в Швеции, где особое внимание было уделено моделированию состояния мостов, которые подвержены разрушениям под влиянием разного рода факторов, в том числе неблагоприятных погодных условий. Транспортная инфраструктура на западном побережье Швеции включает в себя множество крупных мостов, которые подвергаются воздействию сурового климата, – происходит активная коррозия из-за контакта с морской водой, негативное воздействие оказывают циклические нагрузки (замерзание-оттаивание).

На рисунок 3.1 показана схема формирования ЦД одного из мостов в Швеции. Проект выполняется в рамках финансирования из фонда «European Union’s Horizon 2020».

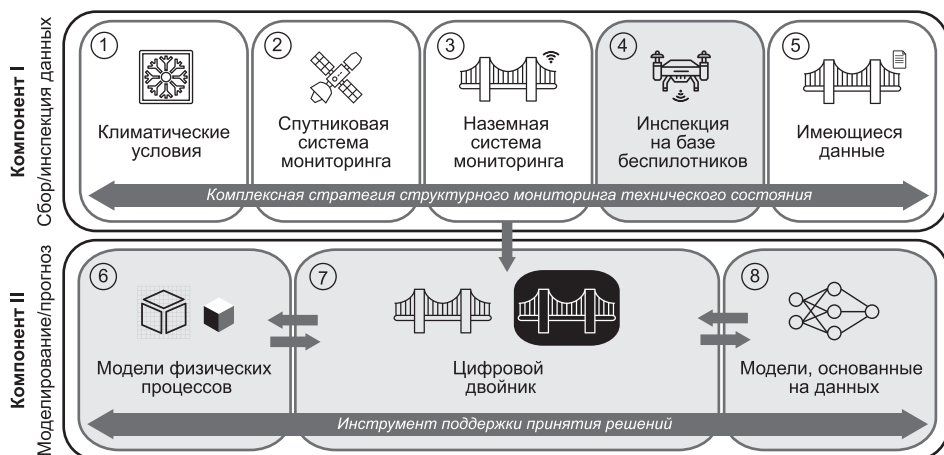


Рис. 3.1. Концепция ЦД транспортной инфраструктуры на примере ЦД моста. Источник: [196]

Цифровой двойник (рис. 3.1) является частью комплексной стратегии мониторинга технического состояния дорожной инфраструктуры и содержит два основных компонента.

Компонент I. Сбор/инспекция данных: интеграция наземных, спутниковых и авиационных наблюдений с данными о климатических

условиях, а также с историческими данными о состоянии и проектировании инфраструктуры.

Компонент II. Моделирование/прогноз: моделирование физических процессов, определяющих поведение объектов инфраструктуры, а также статистические модели, основанные на данных, получаемых от разного рода датчиков систем мониторинга.

Главной целью проекта является внедрение комплексного инструмента поддержки принятия решений, обеспечивающих устойчивость, доступность, экономическую эффективность и безопасность эксплуатации мостов в транспортной инфраструктуре. ЦД используется в качестве инструмента минимизации негативных воздействий на бесперебойную транспортировку и увеличение пропускной способности дорожной сети.

Проект развивается на базе сотрудничества между Техническим университетом Чалмерса (исследовательская группа «Бетонные конструкции»), Стэнфордским университетом (лаборатория «Конструкции и композиты»), а также городами Стокгольмом и Гетеборгом в качестве конечных пользователей.

ЦД «умных» городов

ЦД – это важный инструмент в индустрии создания «умных» городов (Smart Cities), который позволяет объединить средства автоматизации внутри дома, соединить умные здания между собой, а также с другими элементами инфраструктуры.

Цифровые двойники, связанные с моделированием больших участков городской инфраструктуры, могут решать проблемы уровня города, учитывая взаимосвязи между критически важными инфраструктурами, такими как транспорт, водоснабжение и энергетика, а также взаимодействие с социальными процессами.

При этом каждая из этих инфраструктур сама по себе является сложной системой.

Концепция цифровых двойников городов объединяет многие технологии и интересна компаниям, занятым разными аспектами создания «умных» городов. Цифровой двойник города – это виртуальная копия физических объектов города, которые связаны с цифровой копией постоянным информационным обменом. По сути, здесь реализуется та же концепция, что и в создании ЦД промышленных объектов, с той разницей, что рассматривается не промышленная, а городская инфраструктура.

Моделируемыми объектами могут быть не только здания, но также дороги, коммуникации и другие элементы инфраструктуры, а также городские сервисы. В то время, когда экологические проблемы усиливаются из-за быстрой урбанизации, включение ЦД в городское планирование и управление городским хозяйством может оптимизировать трафик, снизить вред, наносимый окружающей среде, улучшить качество жизни горожан.

Для связи модели с физическими объектами используются как исполнительные устройства и механизмы, так и различного рода датчики, которые поставляют информацию о геометрии объектов инфраструктуры, маршрутах движения транспорта и пешеходов, экологических и погодных условиях и т. п.

Поскольку «умные» города представляют собой сложные экосистемы, в которых множество элементов являются взаимозависимыми, использование ЦД может помочь определить скрытые зависимости влияния одного объекта на другой. Например, оценить влияние изменений погоды или транспортных пробок в отдельных районах на инвестиции в недвижимость.

По данным консалтинговой компании ABI Research, число цифровых двойников и моделей городов к 2025 г. превысит 500 [197].

Далее приведем сведения о реальных проектах по созданию ЦД различных городов мира.

Сингапур

Сегодня существует уже достаточно много проектов, которые можно отнести к ЦД городской инфраструктуры или ЦД «умного» города. Наиболее известен из них «Виртуальный Сингапур» – первый в мире город-цифровой двойник, который представляет собой цифровую копию реального Сингапура стоимостью 73 млн долл., созданную с использованием программного обеспечения французской компании Dassault Systèmes. «Virtual Singapore» – это динамическая трехмерная модель города и платформа для совместной работы, предназначенная для выполнения услуг как для государственных, так и для частных потребителей. Цель состоит не только в том, чтобы создать визуальное представление города, но и сделать еще один шаг вперед и использовать модель в совместных функциях принятия решений в сфере городского планирования или, например, борьбы со стихийными бедствиями.

Обладая широким набором данных, «Виртуальный Сингапур» представляет собой интегрированную платформу для разработки аналитических приложений. Например, для анализа транспортных и пешеходных потоков. В проекте используются различного рода датчики для получения информации о климате, демографии, перемещениях транспорта и т. п.

Модель, построенная на данных, позволяет повысить энергоэффективность. Например, используя такие данные, как высота зданий, площадь поверхности крыш и их освещенность, можно оценить потенциал с точки зрения использования солнечной энергии и просчитать эффективность энергосберегающих решений.

Сервисы на базе ЦД могут предоставляться коммерческим и образовательным учреждениям для совместных исследований и сбора данных, что позволяет сопоставлять имеющуюся информацию о текущей инфраструктуре с будущими проектами, согласовать проекты с архитекторами и лицами, ответственными за городское планирование.

Роттердам

Интересным примером в области создания ЦД города является проект, который развивается в голландском городе Роттердаме. До старта внедрения ЦД в городе уже существовал ряд цифровых проектов, таких как «интеллектуальная теплосеть», «умная парковка», «оптимизация транспортного движения». Новый проект «цифровой двойник города» был запущен как платформа для интеграции приложений городской цифровизации [198].

В ЦД Роттердама предусматриваются не только трехмерная модель города, которая точно представляет улицы, здания, общественные места, не только мониторинг людских потоков и транспортных средств, не только возможности отслеживания энергопотребления, расхода воды, работ по техническому обслуживанию, но и возможности лучшего реагирования на чрезвычайные ситуации. В частности, разрабатываются сценарии реагирования на чрезвычайные ситуации, когда пожарные смогут получить доступ к трехмерной модели здания, в которое они входят. Создаваемые ЦД, которые будут снабжены системой ИИ и данными об обитателях здания в реальном времени, позволят пожарным иметь представление о том, где находятся люди и как может распространяться пожар. По мере развития

технологии дополненной реальности вся эта информация сможет передаваться аварийным службам, позволяя видеть сквозь дым и стены. ЦД также позволит автоматизировать многие городские услуги. Например, у работников коммунального хозяйства появится возможность оптимизировать маршруты мусоровозов, используя мусорные контейнеры, оснащенные датчиками.

Еще одно применение ЦД в данном проекте связано с оптимизацией речного движения по многочисленным каналам для гармонизации водного и дорожного движения. Получая доступ к широкой сети камер и датчиков по всему городу, ЦД Роттердама отслеживает интенсивность движения как на дорогах, так и на водных путях, чтобы регулировать разведение и сведение мостов, оптимизируя оба потока (наземный и водный) так, что транспортные средства могут быть перенаправлены в режиме реального времени для ускорения общего транспортного потока.

Цифровой двойник Роттердама состоит из трех слоев. Первый – это источник данных: карты, чертежи зданий, информация о транспортной сети, датчики реального времени, которые вместе создают ЦД. Второй – это универсальная платформа, реализующая базовую функциональность ЦД, к которой могут обращаться заинтересованные клиенты. И, наконец, третий – это дополнительные приложения, использующие возможности цифрового двойника для создания сервисов по решению различных задач города. Многие из этих цифровых приложений уже давно реализованы в городе, в то время как ЦД помогает объединить все эти разрозненные системы в рамках единой платформы.

Амаравати

В качестве масштабного проекта с использованием технологии ЦД приведем пример планирования застройки города Амаравати, столицы штата Андхра-Прадеш (Индия). Проект был разработан компаниями Foster + Partners и Surbana Jurong на базе продукта Smart World Pro компании Cityzenith и принят правительством штата.

Строительство города было начато именно с цифровой копии, что позволило спрогнозировать заранее массу будущих параметров, включая динамику роста населения, потребности жителей, и оптимизировать строительство объектов инфраструктуры, развитие транспортной и других систем.

Решение, использующее технологию ЦД, позволило предоставить правительственным и коммерческим предприятиям, а также и рядовым гражданам единую платформу для получения целого ряда услуг, включая мониторинг хода строительства в режиме реального времени, мониторинг состояния окружающей среды, транспортных потоков и другой информации. Платформа Smart World Pro (которая уже используется для проектов более чем в 100 городах, включая Чикаго и Лондон) предлагает наглядную визуализацию для просмотра наземной и подземной инфраструктуры. Стоит отметить, что последние публикации о проекте [199] указывают на то, что он оказался весьма дорогим.

Стокгольм

Еще один пример создания ЦД можно привести на базе проекта в городе Стокгольме, столице и крупнейшем городе Швеции, с почти двумя миллионами жителей. Город быстро расширяется, и к 2030 г. планируется построить 140 тысяч новых квартир, чтобы удовлетворить высокий спрос населения.

Граждане часто недовольны изменением облика своего города. Новые проекты, особенно в исторической части, часто тормозятся из-за трудности достижения консенсуса. Вовлечение граждан на ранних этапах планирования имеет важное значение для минимизации официальных жалоб, задерживающих процесс городского планирования. В Стокгольме высоко оценили перспективность создания ЦД с широким использованием 3D-визуализации для привлечения инвесторов в регион, а также для вовлечения жителей в процесс планирования городской застройки на самых ранних стадиях.

В настоящее время в Стокгольме разрабатывается ЦД на базе 3D-модели города, которая обеспечит реалистичную визуализацию, а также моделирование и анализ городской инфраструктуры [200]. Первые шаги на пути к созданию ЦД уже реализованы. С помощью приложения ContextCapture от компании Bentley была создана реалистичная трехмерная модель городской инфраструктуры, охватывающая около 500 кв. км, для визуализации городского планирования. OpenCities Planner послужил платформой для 3D-визуализации и диалога как для жителей Стокгольма, так и для заинтересованных сторон проекта. Стокгольм стремится привлечь граждан и сделать их более активными участниками городского планирования. В центре

города открыт выставочный центр Stockholmsrummet, который демонстрирует 3D-презентацию развития города и привлекает тысячи посетителей. Реализовано несколько веб- и мобильных диалоговых проектов для сбора комментариев и мнений общественности, что существенно расширяет возможности диалога и взаимопонимания.

Ньюкасл

В разных проектах цифрового двойника уровня города есть свои акценты. Город Ньюкасл в Англии, создавая свой ЦД, помнил о знаменитом «Мультяшном муссоне» 2012 г. (Toon Monsoon), когда на город обрушился такой силы ливень, что с ним не справилась дренажная система, а убытки исчислялись миллионами фунтов стерлингов, что стало одним из стимулов создания ЦД города для прогнозирования и снижения таких рисков в будущем.

В связи с резкими изменениями климата, прогнозирование рисков может стать стимулом создания цифровых двойников городов для минимизации последствий аварий. В перспективе появятся несколько цифровых двойников города, сфокусированных на разных проблемах и взаимодействующих между собой.

Бостон

В последнее время число разработчиков ЦД уровня города выросло, и заказчики имеют возможность выбора платформ для построения цифрового двойника, часто сотрудничая с поставщиком, чтобы усовершенствовать продукт под свои индивидуальные потребности.

Бостонское агентство планирования и развития (BPDA) привлекло компанию Esri с целью создания ЦД Бостона для анализа развития городской инфраструктуры. Интересно отметить, что в Массачусетсе был принят закон, по которому строительство новых зданий в Бостоне должно производиться таким образом, чтобы тень от зданий затемняла бостонский парк минимальное количество часов. Один из акцентов нового цифрового двойника – это возможность определить местоположение и число этажей любого нового здания с точки зрения минимального затемнения парка.

Кронштадт

Разрабатываются решения класса «ЦД города» и в России. В частности, в 2019 г. МегаФон продемонстрировал «Цифровой двой-

ник» Кронштадта – модель управления городским пространством, объектами социальной и инженерной инфраструктуры [201]. ЦД агрегирует данные, необходимые для осуществления планирования городской жизни и управления, из разных источников. Модель можно использовать для градостроительных целей, планирования развития городских территорий, выявления нецелевого использования земельных участков, оптимизации инфраструктуры и транспортной сети, прогнозирования влияния различных факторов на состояние городских жителей, выявление и прогнозирование возникновения чрезвычайных ситуаций.

Проект является пилотным, планируется, что в дальнейшем опыт ЦД «Кронштадт» будет использован для построения виртуальной модели Санкт-Петербурга и поможет спрогнозировать рост населения, учесть его будущие потребности и на основании предиктивной аналитики определить оптимальные модели строительства, создания социальной, транспортной инфраструктуры и других городских систем.

ЦД в нефтегазовой отрасли

Цифровые двойники используются в нефтегазовой отрасли на всех этапах: на этапе добычи, транспортировки и переработки, помогают сократить капитальные затраты, ускорить добычу, увеличить коэффициент извлечения, ускорить процесс производства. По данным ARC Advisory Group, число нефтегазовых компаний, внедряющих интернет вещей и ЦД в период с 2018 по 2022 г., утроится [202].

В нефтегазовой отрасли реализованы не только ЦД отдельных элементов оборудования, но также разрабатываются двойники сложных комплексных систем («ЦД месторождения», «ЦД морской нефтедобывающей платформы», «ЦД нефтеперерабатывающего завода»).

Особенно актуальным является создание ЦД для управления процессом нефтедобычи в труднодоступных морских условиях. Нефтегазовая отрасль стремится повысить надежность и экономичность своих проектов и все чаще обращается к технологии ЦД.

В частности, компания Aker BP, которая занимается разведкой и добычей нефти на норвежском континентальном шельфе и эксплуатирует платформу Ivar Aasen в северной части Северного моря, создала при активном участии Siemens ЦД для дистанцион-

ного мониторинга состояния оборудования на удаленных объектах. Решение позволяет владельцу в реальном времени обеспечить непрерывный мониторинг объекта, находясь за пределами площадки, то есть перенести контроль операций с морской платформы на сушу. Проект по созданию пилотируемой платформы выполняется на Ivar Aasen с 2019 г. В традиционном режиме на платформе, находящейся на расстоянии 175 км от западного побережья Норвегии, работают около 70 человек, включая четырех операторов диспетчерской. Перенос элементов управления на сушу не означает, что платформа будет работать вообще без людей: часть специалистов остается на объекте, чтобы контролировать ситуацию в случае необходимости. Удаленное управление на базе ЦД дает существенную экономию, учитывая, что затраты на каждого человека, работающего на платформах в Северном море, составляют порядка миллиона евро в год [203].

В рамках развития проектов Aker BP по оцифровке своих активов и операций компания создала фирму-разработчика программного обеспечения Cognite, которая специализируется на создании операционных ЦД [204]. Платформа Cognite собирает и структурирует огромные объемы данных из всех типов промышленных систем, включая данные от датчиков реального времени, данные об иерархии оборудования, данные журналов технического обслуживания, диаграмм процессов и 3D-моделей объектов.

Cognite работает в ряде проектов, в том числе в сотрудничестве с международной инжиниринговой и производственной компанией Aker Solutions, которая специализируется в области проектирования и строительства нефтегазовых производственных объектов на шельфе. Альянс двух компаний позволяет объединить компетенции в области разработки программного обеспечения Cognite с инженерными знаниями Aker Solutions. Aker Solutions использует платформу Cognite для сбора и анализа больших объемов данных с морских объектов, предоставляя клиентам приложения, которые позволят принимать обоснованные решения в отношении офшорных активов на разных этапах их жизненного цикла.

В 2019 г. Aker Solutions объявила о проекте по созданию ЦД для месторождения Нова [205]. Компания заключила контракт на поставку подводной системы добычи для месторождения в начале 2018 г. с Wintershall – дочерним предприятием концерна BASF. Создаваемый

Aker Solutions ЦД должен обеспечить постоянное обновление инженерной информации, заменить традиционные бумажные справочники и документацию по оборудованию, организовать централизованное хранение технических данных в единой системе с возможностью поиска и в результате обеспечить мониторинг подводного оборудования, проактивное обслуживание инфраструктуры и оптимизацию процесса добычи.

Для разработки ЦД (помимо сотрудничества с Cognite) Aker Solutions создала новую компанию по разработке программного обеспечения и цифровых услуг под названием iX3¹⁰⁷, которая позиционируется как центр инноваций Aker Solutions.

В основе iX3 лежит ЦД-платформа Integral, которая позволяет объединить данные проектирования, производства и тестирования с операционными данными в реальном времени. Решение базируется на технологиях облачных вычислений, промышленного IoT и машинного обучения.

Британо-нидерландская нефтегазовая компания Royal Dutch Shell (крупнейшая нефтегазовая и 11-я по счету среди крупнейших публичных компании в мире на 2018 г. [206]) также работает в Северном море и тоже участвует в проекте по разработке ЦД морской платформы. В рамках совместного отраслевого проекта Royal Dutch Shell сотрудничает со швейцарской компанией Akselos, специализирующейся в области компьютерного моделирования, а также компанией LIC Engineering, занятой в области проектно-конструкторских разработок и консалтинга для внедрения новых подходов к управлению морскими активами. Проект включает в себя разработку модели платформы, которая будет использовать данные от датчиков для мониторинга состояния платформы и прогнозирования ее будущего состояния.

В 2018 г. Shell, Akselos и LIC Engineering заключили партнерство по участию в программе, которая направлена на улучшение управления морскими активами путем объединения цифровых двойников, для повышения безопасности работ и оптимизации проактивного обслуживания инфраструктуры. Проект состоит из двух этапов: первый – разработка подробных моделей выбранных объектов, второй – объединение их с данными, получаемыми с датчиков, для от-

¹⁰⁷ Название iX3 происходит от сокращения трех слов, начинающихся на «i» – «integrated insight through innovation» (интегрированное прогнозирование на базе инноваций).

слеживания состояния морских активов в режиме реального времени и прогнозирования состояния оборудования.

Можно упомянуть еще об одном альянсе игроков рынка морской добычи нефти, использующих технологию ЦД. Компания Noble, которая владеет и управляет одним из самых современных и технически совершенных флотов в индустрии морского бурения, сотрудничает с компанией General Electric в создании и эксплуатации цифрового бурового судна Noble Globetrotter I. Решение нацелено на повышение эффективности бурения и снижение эксплуатационных расходов на целевое оборудование. Суть решения та же – данные поступают с датчиков IoT и систем управления, собираются на судне, обрабатываются и затем передаются практически в реальном времени в Центр промышленной эффективности и надежности General Electric (IPRC – Industrial Performance & Reliability Center) для выработки управляющих решений на базе прогнозной аналитики.

Система позволяет регистрировать аномалии и генерировать оповещения о потенциальных сбоях, причем оповещения могут приходить заблаговременно, вплоть до двух месяцев до возникновения прогнозируемого события. В результате персонал, находящийся как на судне, так и на берегу, может получить представление о техническом состоянии судна и производительности каждого элемента оборудования в режиме реального времени. Цифровое буровое судно Noble Globetrotter I работает в акватории Мексиканского залива, где ведет бурение на нефть по 10-летнему контракту между его владельцем, подрядчиком по бурению Noble Corporation, и нефтяным гигантом Shell. При этом более чем за 1000 миль, в Лиле (Lisle), штат Иллинойс, за цифровым двойником судна Noble Globetrotter I следят инженеры Центра производительности и надежности General Electric (IPRC, Industrial Performance & Reliability Centre), который работает в круглосуточном режиме для выявления проблем и увеличения времени бесперебойной работы промышленных объектов [207].

Технологии General Electric были также использованы при создании ЦД райзера для морского бурения (рис. 3.2). В 2017 г. General Electric опубликовала данные о создании и испытании цифрового двойника водоотделяющей колонны (water trap column, water separator column) (райзера, marine riser) [208] для морского бурения, которая предназначена для разведки и добычи полезных ископаемых (нефти и газа) и для безопасного бурения скважины.

Подтверждение работоспособности цифрового двойника райзера было получено в том же году в Мексиканском заливе, на сверхглубокой буровой установке.

Райзер представляет собой трубу большого диаметра, предназначенную для изоляции скважины от внешней морской воды. Труба служит для последующего спуска в скважину буровой и обсадной колонн и отвода использованного бурового раствора. Водоотделяющая колонна верхней частью выходит на палубу морской буровой платформы, а нижней опирается на морское дно, заглубляясь в грунт для обеспечения доступа к устью скважины.

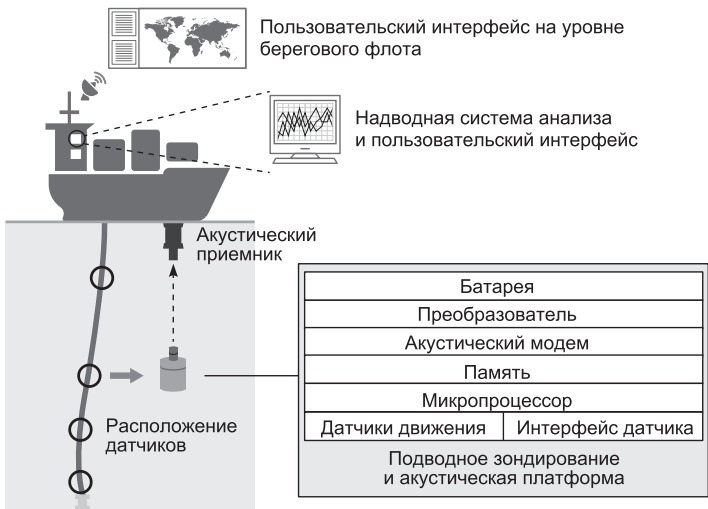


Рис. 3.2. Схема ЦД райзера для морского бурения. Источник: Greg Myers, General Electric Oil & Gas, May 1, 2017

Эксплуатация в тяжелых климатических условиях создает проблемы для эффективного развертывания и обслуживания морских райзеров. Высокие эксплуатационные нагрузки приводят к повреждению оборудования, в том числе в виде усталостных разрушений. Стоимость глубоководного бурения в существенной мере зависит от незапланированных простоев, связанных с суровыми условиями эксплуатации установки при наличии сильных течений, когда ресурсы приходится тратить на транспортировку оборудования и проверку стыков райзера на берегу.

Использование ЦД оказывается особенно эффективным в условиях ограниченного доступа к оборудованию, испытывающему тяже-

лые условия эксплуатации. Для анализа состояния райзера GE создала цифровой двойник (физическую и виртуальную модель райзера) с целью сокращения времени простоев и оптимизации графиков осмотра дорогих элементов подводной буровой инфраструктуры, которые могут простираться на несколько миль. Цифровой двойник позволяет General Electric Oil & Gas предоставлять операторам буровой установки возможность анализировать состояние объектов во время экстремальных условий эксплуатации и выбирать оптимальный режим управления активом.

Применение цифрового двойника райзера позволяет более эффективно обслуживать оборудование, снизить вероятность разрушения на основе анализа данных о состоянии оборудования и окружающей среды в полевых условиях, то есть перейти от регулярного обслуживания на обслуживание «по необходимости».

Решение на базе ЦД позволяет оптимизировать режим работы, например, прекратить бурение из-за сильных течений или других неблагоприятных условий и возобновить работу в более безопасный период. В отличие от традиционных методов, таких как использование тензодатчиков для непосредственного измерения деформаций и напряжений, система измеряет вибрации с помощью акселерометров в отдельных соединениях вдоль буровой колонны (рис. 3.2). Данные с датчиков передаются в систему сбора данных (на буровое судно). Методы машинного обучения в сочетании с моделью физических активов используются для расчета оценок усталостного ресурса всех стыков райзера.

Виртуальная модель райзера, которая базируется на машинном обучении, постоянно обновляется на основе получаемых данных. Постоянное изучение и обновление цифровой модели позволяет рассчитывать усталостную долговечность райзера и оптимизировать условия эксплуатации практически в реальном времени. Визуализация и функции оповещения, построенные на базе анализа полевых данных, обеспечивают поддержку принятия оперативных решений операторами буровой установки.

Следует упомянуть еще несколько проектов по морской добыче нефти, где были использованы технологии ЦД. Речь идет о разработках компании McDermott, которая занимается проектированием и созданием комплексных инфраструктурных и технологических решений для транспортировки и переработки нефти и газа. В частности, циф-

ровой двойник McDermott, основанный на программной платформе Gemini XD, был использован в проекте ВР по разработке подводных месторождений Tortue-Ahmeuim у берегов Мавритании и Сенегала.

Цифровые двойники применяются нефтяными компаниями как в море, так и на суше, и они необходимы для оптимизации не только уникального, но и массового оборудования.

Например, насосные системы массово применяются в нефтегазовом секторе, и оптимизация их работы сулит огромный экономический эффект. По данным Министерства энергетики США, на насосные системы приходится почти 20% мировой энергии, потребляемой электродвигателями. Насосы – это именно те устройства, которые перемещают сырую нефть через трубопроводные сети и таким образом играют ключевую роль в транспортировке углеводородов. Ключевые поставщики в нефтегазовой отрасли разрабатывают ЦД, которые могут использовать аналитику данных для оптимизации производительности насосных станций для перекачки сырой нефти.

Интерес к использованию технологии ЦД проявляют не только западные нефтедобывающие компании. Интересен опыт национальной нефтяной компании ADNOC из Объединенных Арабских Эмиратов. ADNOC занимается разведкой, добычей и распределением нефти, добывает более 3 млн баррелей углеводородного топлива в сутки и проводит широкомасштабную цифровизацию активов [209], в рамках которой с помощью компании Schneider Electric реализует проект класса ЦД.

В ноябре 2018 г. Schneider Electric завершила разработку командного центра Rapogama, занимающего целый этаж в штаб-квартире ADNOC и предоставляющего возможность проецировать данные на 50-метровый экран. Технология цифрового двойника позволила «собрать» информацию от целого ряда нефтеперерабатывающих и нефтедобывающих предприятий компании ADNOC в единый диспетчерский пункт. ЦД построен на базе использования ряда технологий (предиктивная аналитика, визуализация, система моделирования различных сценариев работы предприятия, включая инциденты).

В России, где нефтяная отрасль составляет значимую часть ВВП, вопросы ее цифровизации очень актуальны. Почти все крупнейшие российские нефтяные компании за последние несколько лет объявили об использовании технологии ЦД, а многие даже обозначили данное направление в качестве приоритетного направления развития.

Так, компания «Лукойл» выделила четыре основных направления: «цифровые двойники», «цифровой персонал», «роботизация» и «цифровая экосистема» [210].

В стратегии компании «Роснефть» («Роснефть-2022») было заявлено шесть основных направлений: «цифровое месторождение», «цифровой завод», «цифровая цепочка поставок», «цифровой трейдинг», «цифровая АЗС» и «цифровой рабочий». В основе большинства из них лежит технология ЦД. В качестве примера успешного внедрения решения класса ЦД следует назвать проект по созданию «цифрового месторождения» в Башкирии, который «Роснефть» начала в 2018 году. В этом проекте была реализована подробная цифровая копия реального месторождения (Илишевское месторождение), где каждый физический объект представлен своим цифровым двойником, передающим информацию о своем состоянии. С помощью 3D-платформы специалисты в режиме реального времени видят все ключевые показатели – добычу и транспортировку, действия сотрудников, перемещения транспорта. Данные поступают также с беспилотников, которые регулярно облетают территорию месторождения.

Разработка и реализация проекта осуществляется корпоративным научно-проектным комплексом компании. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы проводятся институтом «РН-БашНИПИнефть», а также специалистами блока добычи АНК «Башнефть» и специалистами внутреннего IT-интегратора компании – ИК «Сибинтек».

Цифровые технологии (включая ЦД) внедряются также в компании «Татнефть». В частности, по свидетельству представителей компании, на Ромашкинском месторождении удалось добиться снижения себестоимости добычи на 30% за счет использования таких цифровых технологий, как «цифровой двойник оборудования» и «цифровая модель месторождения».

Наверное, наиболее полно решения класса ЦД реализуются в дочернем предприятии «Газпрома» – компании «Газпром нефть». Пилотное внедрение программы «цифровое месторождение» в компании началось еще в 2014 г., на базе активов компании «Газпромнефть-Хантос». В 2017 г. здесь был создан Центр управления добычей. Одним из ключевых компонентов Центра управления стал ЦД процесса подъема жидкости из скважин, который позволяет

подбирать оптимальные режимы работы системы и предупреждать нештатные ситуации. Со временем Центр управления добычей дополнился и другими цифровыми двойниками. Новые программные продукты стали элементами интеграционного цифрового двойника территории Приобского месторождения, который в перспективе должен охватить весь техпроцесс добычи (от погружных насосов на скважинах до пункта коммерческой сдачи нефти).

ЦД строится по модульному принципу. Модуль «Добыча» собирает и анализирует данные, получаемые с нескольких тысяч скважин предприятия, выявляет отклонения от плановых показателей, обеспечивает контроль за погружным оборудованием. Модуль «Поддержания пластового давления» собирает информацию с насосного оборудования водозаборных скважин, контролирует режим работы нагнетательного фонда и водоводов.

Контроль за цифровой системой ведется из Центра управления добычей, где информация, собранная цифровыми двойниками, накапливается и визуализируется в форме, удобной для принятия своевременных решений многофункциональными командами. Проект находится в развитии, – ведется интеграция гидродинамической модели пласта с цифровым двойником месторождения, в перспективе планируется добавить модули, отвечающие за функционирование трубопроводной системы, площадных объектов и энергетического комплекса, что позволит централизованно управлять производством – от работы скважин до сдачи товарной нефти [211,212].

В будущем планируется, что функционал Центра управления добычей «Газпромнефть-Хантос» будет расширен, «Газпром нефть» планирует открыть аналогичные центры в других дочерних структурах [213].

В «Газпром нефть» технологии ЦД используются не только на этапе нефтедобычи, но и на этапах ее переработки.

Например, на Московском НПЗ компания запустила проект по созданию цифрового двойника установки гидроочистки бензина каталитического крекинга, а на Омском нефтеперерабатывающем заводе – установки первичной переработки нефти.

Комплексные пилотные решения в этой сфере создаются на базе активов битумного бизнеса компании. В Шымкенте (Казахстан) в рамках проекта BitumPlant создается оцифрованный завод-робот с возможностью удаленного управления. На Рязанском заводе

битумных материалов в рамках проекта BitumLab обрабатываются принципы создания модульной архитектуры цифрового двойника комплексного производственного объекта. Решения, найденные опытным путем на небольших битумных заводах, впоследствии планируется масштабировать до уровня больших НПЗ, что в итоге позволит создать эффективную цифровую платформу управления производством [214].

Летом 2019 г. «Газпром нефть» объявила о создании первого в отрасли центра управления производством для собственных нефтеперерабатывающих заводов, который обеспечит переход от управления отдельными установками к предиктивному управлению технологическими цепочками.

Проект разрабатывается совместно с Yokogawa Electric Corporation, с которой подписан меморандум о сотрудничестве. Выбор партнера закономерен. Yokogawa активно аккумулирует знания других компаний в области добычи и переработки нефти. Поглощение KBC в 2016 г. позволило Yokogawa получить доступ к платформе моделирования процессов KBC, Petro-SIM 7, универсальной и мощной основы для сбора информации на протяжении всего жизненного цикла объекта. В рамках проекта с «Газпром нефтью» реализуется пилот на Омском НПЗ, который предполагает создание оперативного управления производством, включая контроль исполнения посуточных планов, качества продукции и энергопотребления, оценку состояния оборудования, а также мониторинг систем безопасности. После реализации проекта на Омском НПЗ аналогичное решение планируется внедрить на Московском НПЗ, ориентировочно в 2021 г.

Можно перечислить еще несколько проектов класса ЦД, которые ведут отечественные нефтехимические компании. Так, например, в 2018 г. ТАНЕКО «Татнефть» совместно с российским разработчиком решений для нефтехимической отрасли «Химтех» (ChemTech) начала проект по созданию цифрового двойника установки первичного фракционирования нефти ЭЛОУ-АВТ-7, который обеспечивает оптимизацию управления установкой на основе технологий машинного обучения и искусственного интеллекта. В ходе осуществления проекта обработаны исторические данные за несколько лет работы установки, создана термодинамическая модель действующего производства, разработаны виртуальные анализаторы с возможностью

предсказания составов технологических потоков, определены возможности оптимизации технологического режима [215].

В компании «Сибур» разрабатывается цифровая модель производственного комплекса «ЗапСибНефтехим». По свидетельству разработчиков, цифровая модель внедряется как первый шаг на пути к созданию ЦД для сквозного управления предприятием на протяжении всего производственного цикла [216]. Проект ведется при участии центра виртуальной реальности «КРОК» («КРОК VR»), который разработал цифровую модель производственного комплекса, строящегося в Тобольском нефтехимическом кластере компании «Сибур». Модель отображает производственные процессы и инфраструктуру, включая мощности по производству полиэтилена и полипропилена. На начальном этапе модель будет использоваться для визуализации производственных процессов, оптимизации производственных цепочек, обеспечения безопасности, обучения сотрудников и демонстраций для инвесторов. В дальнейшем предполагается объединить модель с данными систем управления производством (Manufacturing Execution System, MES) и управления ресурсами (Enterprise Resource Planning, ERP), АСУ ТП видеоаналитикой и IIoT, что позволит получать информацию о состоянии производственных активов.

Среди российских компаний, использующих ЦД для разработки инструмента в нефтегазовой отрасли, можно упомянуть компанию АО «Волгабурмаш». Предприятие продает свою продукцию в России, странах СНГ и более чем в 60 странах дальнего зарубежья, конкурируя с ведущими американскими, шведскими и китайскими производителями. Компания переходит на цифровые технологии и занимается созданием цифровых двойников на базе партнерства с Siemens PLM Software. В АО «Волгабурмаш» используются CAD-системы NX, системы инженерного анализа Simcenter и PLM-системы Teamcenter, на основе которых были созданы цифровые двойники изделий. Параллельно решаются задачи технологической подготовки производства на базе Teamcenter Manufacturing и NX CAM. 100% механических операций выполняется на современном оборудовании с ЧПУ, а использование NX CAM и Teamcenter Manufacturing позволило выйти на качественно новый уровень: все технологические операции отрабатываются в виртуальной среде перед запуском на реальный станок. Использование технологий Siemens PLM Software позволило полностью отказаться от оформления чертежей и стандартной

технологической документации, что существенно экономит время. «Волгабурмаш» удалось серьезно повысить скорость разработки и производства готовой продукции, анализировать гораздо больший объем данных, повысить экономическую эффективность [217].

ЦД в энергетике

В июне 2018 г. ФСК ЕЭС (входит в ПАО «Россети») сообщила о начале поэтапного внедрения цифрового проектирования систем управления подстанциями с использованием типовых решений и перспективой создания цифровых двойников.

Производство энергии, идет ли речь о сжигании топлива, или об атомной энергетике, или о возобновляемых источниках энергии, опирается на дорогостоящие сложные объекты инфраструктуры, требующие высокого уровня безопасности, к ним предъявляются высокие требования на стадии проектирования и обслуживания. То есть оборудование создается именно в тех условиях, в которых целесообразно и оправданно применение цифровых двойников.

Крупнейшие компании создают специализированные решения класса ЦД для энергетического сектора. В частности, компания General Electric разработала цифровой двойник, который выступает основой цифровой электростанции Digital Power Plant (рис. 3.3). Этот ЦД не только отображает операционную среду в цифровом виде, но и дает основу для более эффективного принятия решений на каждом уровне эксплуатации станции. Технология General Electric объединяет опыт в предметной области с аналитикой больших данных, обеспечивая снижение внеплановых простоев, более продуманные стратегии технического обслуживания, позволяет сбалансировать производство с учетом целого ряда факторов.

Бизнес-приложения, показанные на рисунке 3.3, привязаны к ЦД и позволяют управлять параметрами эксплуатации электростанции, оперативно реагировать на меняющийся рынок, цены на топливо и погодные условия.

Бизнес-приложения, предназначенные для повышения производительности, подразделяются на категории:

- «Бизнес-оптимизация» – снижает финансовые риски и оптимизирует прибыльность благодаря интеллектуальному прогнозированию и принятию более обоснованных бизнес-решений.

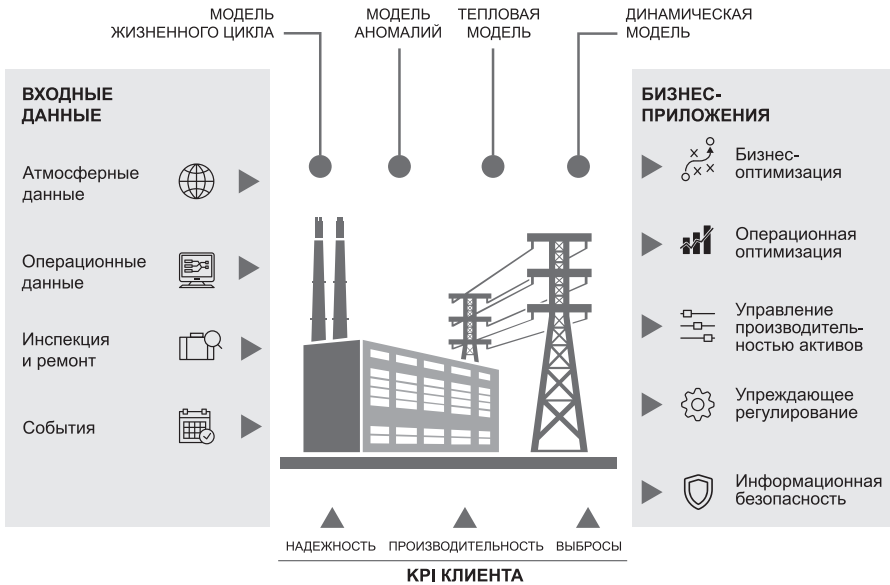


Рис. 3.3. Цифровой двойник от компании General Electric.
Источник: General Electric

- «Операционная оптимизация» – обеспечивает прозрачность корпоративных данных в масштабах всей электростанции, а также обеспечивает целостное понимание операционных решений.

- «Управление производительностью активов» – преобразует данные в интеллектуальные решения на базе продвинутой аналитики и опыта в предметной области. Приложение создает единый источник данных для всех активов производства электроэнергии, используя прогнозную аналитику, которая позволяет выявлять проблемы до их возникновения, способствует сокращению времени простоев и продлению ресурса активов.

- «Упреждающие регуляторы» – позволяют управлять работой электростанции, используя аналитические решения по управлению стабильностью энергосистемы, изменчивостью топлива и выбросами, обеспечивают соответствие надзорным требованиям и другим параметрам, чтобы снизить затраты и оптимизировать доход.

- «Информационная безопасность» – предназначена для оценки системных пробелов, выявления уязвимостей, защиты критических элементов инфраструктуры и обеспечения контроля в соответствии с правилами безопасности.

Цифровой двойник и бизнес-приложения работают на платформе Predix, которая является безопасной промышленной средой, разработанной для массового приема данных, исполнения аналитических моделей и управления машинными данными.

ЦД станции состоит из совокупности моделей и, по сути, базируется на целом ряде цифровых двойников подсистем.

Модель жизненного цикла (ЦД жизненного цикла, Lifting Digital Twin) позволяет оценить каждый объект на станции и то, как он будет стареть в процессе эксплуатации. Модель дает возможность прогнозировать характер напряженного состояния элементов оборудования, вероятность усталостного разрушения, степень окисления деталей и другие явления. На основании этой информации ЦД позволяет оценивать надежность работы каждого актива, всей системы в целом и оптимизировать обслуживание.

Модель аномалий (ЦД аномалий, Anomaly Digital Twin) использует физические и основанные на данных прогностические модели для обнаружения сбоев, для улучшения управления режимами сбоев активов и сокращения незапланированных простоев. Используя методы слияния с моделями жизненного цикла, модели аномалий могут повысить точность кривых срока службы производственного оборудования и дополнительно персонализировать потребности в обслуживании.

Тепловая модель (тепловой ЦД, Thermal Digital Twin) определяет тепловую эффективность, мощность установки и прогноз выбросов, а также осуществляет моделирование всех параметров, которые могут повлиять на эти результаты.

ЦД от компании General Electric объединяет ряд аналитических моделей элементов электростанции, которые отражают состояние объектов (производительность, износ элементов оборудования и т. п.) с помощью KPI, определяемых клиентами и бизнес-целями.

Цифровые модели эмулируют поведение объекта при варьировании эксплуатационных параметров (состав топлива, температура окружающей среды, качество воздуха, влажность, рыночные цены). Технология ЦД позволяет решать задачи оптимизации по целому ряду параметров – производительность, износ, ремонтпригодность и т. п. (рис. 3.4). Модели в сочетании с данными, получаемыми с датчиков, дают возможность прогнозировать производительность станции, оценивать различные сценарии, возможные компромиссы

и выбирать пути повышения эффективности. Во время эксплуатации установки цифровой двойник постоянно улучшает свои возможности по моделированию и отслеживанию состояния объектов. Внедрение ЦД позволяет проверять сценарии «что, если», принимать максимально обоснованные решения, ориентированные на бизнес-цели.

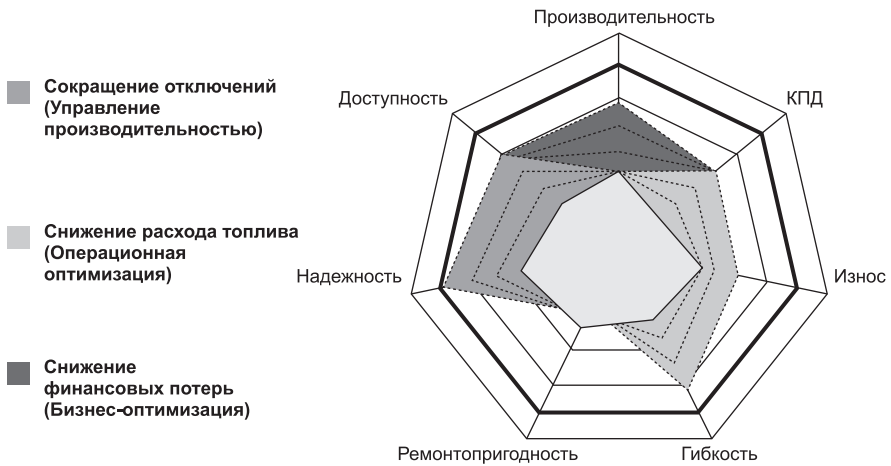


Рис. 3.4. Схема поиска бизнес-преимуществ при эксплуатации станции на базе ЦД. Источник: General Electric

Разработанное General Electric программное обеспечение Digital Power Plant позволяет собирать данные с оборудования General Electric и создавать цифровые двойники, которые играют важную роль не только на этапе обслуживания, но и на этапе маркетинга, а также на этапе демонстрации возможностей оборудования General Electric (в том числе энергетического).

По свидетельству General Electric [218], именно цифровой двойник в ряде случаев позволяет убедить заказчика в целесообразности приобретения газотурбинного оборудования. В частности, General Electric приводит пример, когда компания Alba Aluminium Bahrain планировала построить крупнейший в мире алюминиевый завод, где для плавильных печей требуется генерация огромных объемов электроэнергии. В Alba рассматривали вариант покупки турбины HA Turbine General Electric. На момент покупки HA Turbine являлась новой конструкцией и не обладала тем количеством рабочих часов, которые интересовали металлургический завод. Возможности

General Electric использовать свой цифровой двойник, базирующийся на данных миллионов часов виртуальных испытаний, позволили показать заказчику, как турбины будут реагировать на различные ситуации, которые могут возникнуть в Бахрейне, что и определило успех сделки.

Показательным примером применения технологии ЦД в энергетике является проект ЦД «АТОМ» компании Siemens. Совместно с компанией decisionLab Siemens разработала модель работы и технического обслуживания турбин (АТОМ, Agent-based Turbine Operations & Maintenance model). Этот виртуальный двойник эмулирует операции по техническому обслуживанию и ремонту авиационных газотурбинных установок Siemens по всему миру, позволяя повысить эффективность их эксплуатации.

Компания Siemens производит широкий ассортимент промышленных турбин, кроме того, она приобрела у Rolls-Royce ее бизнес по производству авиационных газотурбинных установок и компрессорных систем. Siemens представила на рынок авиационную газовую турбину (SGT-A65), созданную с помощью приобретенных активов [219]. Компании потребовалось эффективное средство для решения проблем эксплуатации газотурбинного парка, которое бы позволяло предсказывать рентабельность бизнеса.

Ответом на поставленные задачи явился цифровой двойник «АТОМ» – модель, которая опирается на прошлые результаты внедрения, использует данные о клиентах, цепи поставок, производстве и обслуживании, позволяя повысить эффективность управления активами. В ЦД отображаются клиентские операции, техническое обслуживание, характеристики двигателя и логистика цепи поставок для всего газотурбинного парка и всего цикла эксплуатации.

В качестве основного инструмента моделирования decisionLab выбрала AnyLogic.

В ЦД разработчики использовали данные о клиентских операциях (условия, в которых клиенты используют турбины); данные о работе баз технического обслуживания; характеристики двигателя (разные виды отказов, связанные с конкретными компонентами двигателя); логистику цепей поставок (клиенты находятся по всему миру).

В цифровом двойнике применена модульная архитектура, которая позволила нескольким пользователям одновременно работать с моделью над разными задачами, используя разные наборы данных.

Пользователи модели могут проиграть сценарии «что, если», чтобы выявить взаимосвязи, проблемные места и принимать решения с учетом работы всей системы [220].

Можно также привести примеры использования ЦД со ссылкой на отечественные компании. Так, в 2019 г. инженерно-консалтинговая компания «Продуктивные технологические системы» (ООО ПТС) – старейший партнер корпорации РТС в странах СНГ, сообщила о внедрении ЦД на базе программного обеспечения Creo и Windchill на Уральском турбинном заводе (УТЗ), входящем в холдинг «РОТЕК». По словам зам. гендиректора ПТС, на Уральском турбинном заводе внедрена технология цифрового двойника, которая предполагает связь между проектом турбины, мультифизическими расчетами и комплексом оптимизации [221].

На базе ЦД была разработана и подготовлена к производству турбина Кп-77–6,8. Внедрение новой цифровой технологии позволило спроектировать и довести изделие до производства за 8 месяцев вместо 2,5 лет.

По данным ПТС, направление, связанное с созданием ЦД, на заводе активно развивается. В частности, система ПРАНА¹⁰⁸, которой располагает УТЗ, будет связана с системой компании РТС в формате цифрового двойника, так что все требуемые данные о поведении изделия в реальном времени будут анализироваться и возвращаться на цифровой двойник с применением системы индустриального интернета вещей ThingWorx.

Многие компании заняты разработкой альтернативных источников энергии. Поэтому значительная доля проектов по созданию цифровых двойников связана с моделированием станций ветрогенерации.

GE Renewable является пионером в области создания ЦД для ветрогенерации на базе станции, построенной в 2015 г., в Северной Америке [222]. Используя программную платформу Predix, компания создала ЦД, который позволяет операторам ветропарков собирать, визуализировать и анализировать данные об объектах станции. В 2019 г. General Electric имела три испытательных полигона для тестирования цифровых двойников. Кроме того, более 15 000 ветровых турбин General Electric, работающих

¹⁰⁸ «ПРАНА» – это система создания цифрового образа промышленного оборудования, IoT-решение для диагностики и прогноза состояния промышленного оборудования, разработанная компанией РОТЕК, о которой мы уже упоминали во второй главе, рассказывая об отечественных разработках для построения решений класса ЦД.

в соответствии с долгосрочными соглашениями, имеют механизм цифровой оптимизации.

Цифровизация позволяет операторам ветряных электростанций оптимизировать стратегии технического обслуживания, повысить надежность и готовность турбины и увеличить ежегодное производство энергии.

Другой крупный производитель ЦД – компания SAP, внедряет решения для оптимизации работы ветрогенераторов. В частности, компания Arctic Wind, которая владеет и управляет ветряными электростанциями в Норвегии, внедрила решение на базе платформы SAP. Турбины являются дорогостоящими агрегатами, детали которых требуют постоянного контроля. Их обслуживание – сложная задача из-за длительности зимних ночей и низких температур. Чтобы решить ее, компания Arctic Wind установила датчики на всех ветряных турбинах, и данные, поступающие с этих датчиков, передавались на расстояние более 1000 миль.

На базе платформы SAP был реализован удаленный мониторинг состояния работы ветрогенераторов по нескольким сотням параметров, характеризующих их техническое состояние. Каждый ветрогенератор посылает информацию о своем состоянии, которая обрабатывается в диспетчерском центре путем сравнения фактического состояния работы конкретного ветрогенератора с его идеальным цифровым аналогом – двойником, при текущих условиях работы (температура окружающего воздуха, ветровая нагрузка, уровень обледенения лопастей и т. д.) [223].

Ветрогенераторы – это сложные устройства, и поддерживать их работоспособность в удаленных местах непростая задача.

На рисунке 3.5 сравниваются «традиционный» и цифровой обходы парка ветрогенераторов.

Размер круга на рисунке 3.5 показывает объем затрат на осуществление наблюдения и обслуживание оборудования. Как видно из рисунка, при традиционном обходе объем затрат увеличивается по мере старения объектов. Как правило, ветрогенераторы находятся в удаленных местах и физический доступ к ним затруднен.

С использованием «цифрового обхода», с помощью цифрового двойника, неисправности обнаруживаются на более ранней стадии, что позволяет корректировать режимы работы обслуживания устройств. В результате вероятность отказа снижается, осуществляется безопасное продление срока службы.

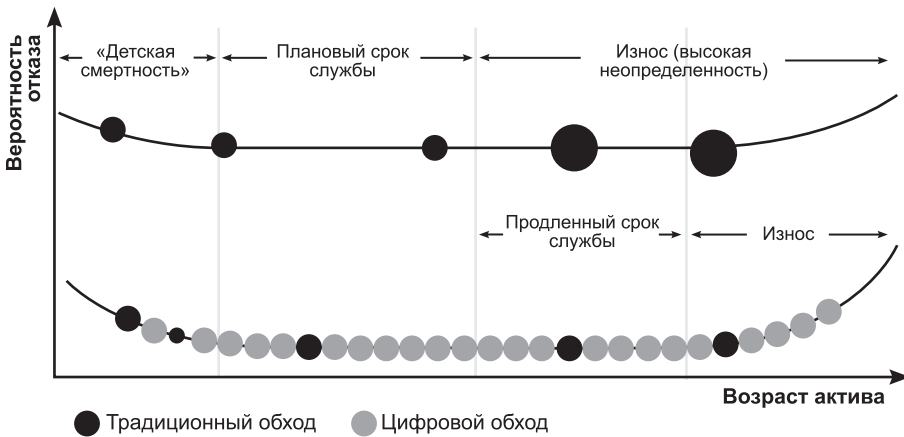


Рис. 3.5. Сравнение традиционного и «цифрового обхода».
Источник: доклад «Мировой опыт цифровой трансформации электроэнергетики. Разбор успешных кейсов». SAP, 2019 г.

ЦД в сочетании со средствами дополненной реальности могут качественно изменить время обслуживания. Основная проблема полевого обслуживающего персонала – это недостаточный объем информации о состоянии оборудования. ЦД с функциями дополненной реальности может решить эти проблемы: во-первых, заранее оснастить информацией и потенциальными решениями технических сотрудников еще до командировки на площадку и, во-вторых, помочь удаленно с помощью средств дополненной реальности и онлайн-консультаций.

Ветрогенератор оснащен оборудованием разных производителей. Его эксплуатационные характеристики, статистика жизненного цикла, данные и схемы, связанные с неисправностями, важны для поставщиков в процессе проектирования будущего оборудования. С помощью ЦД операторы ветрогенераторов могут накапливать и анализировать подобные данные и предоставлять эту информацию, включая обнаруженные недостатки, в качестве услуги поставщикам оборудования и таким образом монетизировать данные.

Самый крупный рынок ЦД в энергетическом секторе находится в США. По данным отчета Управления энергетической информации США за 2016 г., мировой спрос на электроэнергию увеличится к 2040 г. на 69%, что повлияет на надежность работы оборудования,

увеличит расходы на техническое обслуживание и повысит риск незапланированных отключений подачи электроэнергии.

Основу электроэнергетики в США составляют электростанции, работающие на угле и газе, которые изначально были рассчитаны на выработку электроэнергии с базовой нагрузкой. Хотя эти установки предназначены для непрерывной работы, они все чаще эксплуатируются в гибких условиях, включая частую смену режима и длительные периоды низкой нагрузки [224].

Опыт показывает, что гибкий режим эксплуатации может приводить к значительным тепловым, механическим и химическим нагрузкам, которые повреждают оборудование, снижают ожидаемый срок службы и производительность станции, увеличивают расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание, увеличивают выбросы в окружающую среду.

Для решения данных проблем национальная лаборатория энергетических технологий (NETL, National Energy Technology Laboratory) Министерства энергетики США и ее партнеры совместно с Центром обучения и исследований в области расширенного моделирования виртуальной энергии (AVESTAR) Университета Западной Вирджинии разработали цифровой двойник, который имитирует электростанцию, использующую парогазовую установку с внутрицикловой газификацией угля. Проект направлен на оптимизацию проектирования сенсорной сети (расчет оптимального размещения, количества и типа датчиков), управление процессами и операционные стратегии для повышения производительности, гибкости и мониторинга состояния электростанции.

Разработчики проекта отмечают, что достижения в области цифровых технологий позволяют оптимизировать работу электростанций в условиях гибкой нагрузки, повысить надежность и прибыльность установок, сократить время простоев и затраты на эксплуатацию и обслуживание, обеспечить оптимальное проектирование сенсорной сети, более эффективное управление, диагностику неисправностей.

Примеры использования ЦД в энергетике можно найти не только в США. По данным публикации 2018 г. [225], австралийская компания AGL внедрила технологию ЦД для оптимизации работы электростанции.

Основанная в Сиднее, в 1837 г., компания AGL Energy занимается производством и продажей электроэнергии и газа для бытового

и коммерческого использования и является второй компанией, котирующейся на сиднейской фондовой бирже. Будучи владельцем крупнейшей электростанции в Южной Австралии, AGL является критически важным активом в стране. Станция сжигает природный газ для выработки пара, что приводит в действие восемь турбин для генерации электроэнергии с общей паспортной мощностью 1280 МВт. Стремясь повысить уровень эффективности работы оборудования, компания решила изучить возможность внедрения технологии цифрового двойника еще в 2013 г.

Внедрение ЦД планировалось как для обучения операторов по всем аспектам работы установок, так и для обеспечения быстрого и эффективного решения проблем, связанных с отказами и неисправностями, с возможностью расследования причин сбоев и предотвращения их повторения.

Важной причиной внедрения технологии цифрового двойника была необходимость тестирования допустимых границ изменения режима работы установки для исключения возможности вредного воздействия на оборудование. Основную привлекательность представляла возможность тестирования многочисленных сценариев процесса и модификации оборудования с использованием данных о действующей установке без ущерба для ее работы. В качестве приложения для моделирования технологического процесса AGL выбрала Yokogawa Plant Simulator от компании Yokogawa Australia & New Zealand, которая уже более 20 лет разрабатывает и внедряет высокоточные динамические симуляторы для процессного машиностроения. На базе разработок Yokogawa инженеры AGL быстро реализовали проект, завершив установку цифрового двойника в 2016 г.

Атомная энергетика

Ведущие эксперты, как отечественные, так и зарубежные, говорят о перспективности применения технологии ЦД в атомной энергетике. Цифровой двойник все чаще рассматривается как одно из ключевых решений для повышения безопасности и эффективности атомных станций [226]. По словам аналитиков из Frazer-Nash Consultancy, отрасль атомной энергетике может извлечь большую выгоду из технологии ЦД, которая поможет контролировать целостность, эффективность АЭС, прогнозировать состояние объектов и, что важно, способ-

ствовать снижению затрат на их обслуживание. Согласно оценкам Frazer-Nash, в течение 60-летнего срока службы британских атомных станций общей мощностью 16 ГВт можно было бы сэкономить 4,65 млрд долл. США. При этом следует отметить, что технологии, лежащие в основе ЦД, могут снизить затраты не только на обслуживание, но также и на проектирование, строительство и вывод из эксплуатации, и чем раньше начать их применение, тем более существенный экономический эффект может быть достигнут.

В первой главе этой книги уже было отмечено, что ЦД особенно необходим в тех отраслях, где специалисты сталкиваются с оборудованием высокой сложности¹⁰⁹, с потенциально опасными объектами, где имеются сложные условия эксплуатации и агрессивные среды, ограничивающие возможность установки датчиков, и где роль цифрового моделирования в этой связи многократно возрастает. Все это в полной мере справедливо для задач, с которыми сталкиваются специалисты атомной отрасли.

Атомная промышленность все больше внедряет цифровые модели на разных этапах – от этапа выбора площадки сооружения АЭС, проектирования, эксплуатации и технического обслуживания до вывода из эксплуатации.

АЭС – это сложный, многокомпонентный объект, и применительно к нему речь может идти о самых разных типах цифровых двойников – от ЦД отдельных деталей, отдельных узлов и компонентов до локальных систем и процессов. И подобные двойники создаются уже сегодня. При этом комплексный ЦД, охватывающий все процессы атомной станции, объединяющий все системы на всех этапах жизненного цикла – это пока дело будущего.

Атомная станция – одно из сложнейших сооружений современности, она состоит из огромного числа единиц оборудования (свыше 200 тысяч на 1 блок), технологических систем, зданий и сооружений. Площадка строительства АЭС может быть распределена на нескольких гектарах и включать огромное количество субподрядчиков и поставщиков. Чтобы приблизиться к комплексному цифровому двойнику, операторы АЭС должны иметь возможность объединять данные от проектировщиков, поставщиков оборудования, строителей, мон-

¹⁰⁹ АЭС состоит из тысяч систем и сотен тысяч единиц оборудования. На один проект накладываются десятки тысяч требований, и ни один эксперт не может системно проанализировать связи между массой элементов, учесть их взаимное влияние и требования, которые на них накладываются.

тажников, наладчиков расчетных моделей и информацию с физических объектов. Даже если удастся собрать вместе все необходимые заинтересованные стороны для создания модели текущего состояния станции, это не решает всей проблемы, ведь прогнозируемый жизненный цикл атомной электростанции превышает 70 лет, а это означает, что перед разработчиками стоит еще более сложная задача – обеспечение долгосрочного развития и жизнеспособности ЦД на столь длительный период. Важной проблемой является совместимость компонентов. ЦД такого сложного объекта, как атомная станция, объединяет десятки инструментов моделирования, часто создаваемых различными организациями (несколько десятков НИИ задействовано при проектировании АЭС). Создание успешного ЦД полного цикла АЭС невозможно без обеспечения взаимодействия всех инструментов. Основы для высокоточного моделирования есть уже сегодня, вычислительные возможности растут очень быстро, однако на пути к созданию комплексного ЦД атомной станции нужно преодолеть не только технические проблемы, но и решить вопросы организационные – вопросы сотрудничества в организации сверхсложных проектов.

Памятуя о том, что технологии ЦД – это технологии 4-й промышленной революции, необходимо отметить, что внедрение ЦД уровня АЭС подразумевает доступность данных на всех этапах, а это означает, что инструменты 3-й промышленной революции, включая такие системы, как ERP/CRM/SCM, должны быть внедрены на всех этапах жизненного цикла АЭС, иначе ЦД просто не сможет получать все необходимые данные из интегрируемых подсистем. Важно проработать экосистему для этих инструментов, а также внедрить единую методологию работы с ними. Системы могут быть установлены и даже использоваться, но без грамотной централизованной настройки и формализации процессов работы с ними (с учетом всех необходимых данных и каналов их передачи) собрать единую информационную модель (первую основу ЦД) не получится. Так, при недостаточной организации экосистемы информационных инструментов (архитектуры ИС) могут возникать проблемы, называемые «колодцами данных»¹¹⁰, а именно противоречивость данных в силу их дублирования, несогласованности и отсутствия обмена.

Несмотря на то, что задача построения ЦД уровня АЭС является чрезвычайно сложной, специалисты отмечают [227], что наличие цифрового двойника АЭС в ближайшее время может стать обяза-

¹¹⁰ Дословный перевод английского термина siloed data.

тельным атрибутом для продажи проектов на международном рынке, учитывая необходимость типизации строительства атомных станций, быстрого обучения и создания тренажеров, приближенных к реальной эксплуатации АЭС.

ЦД в EDF

Говоря о практике создания ЦД АЭС, интересно обратить внимание на опыт европейских стран и, прежде всего, на опыт Франции, являющейся крупнейшим экспортером электроэнергии и имеющей показательный опыт в области цифровизации АЭС.

Франция обладает технологиями по производству реакторов, технологиями по производству и утилизации топлива, ведет активные исследования в области атомной энергетики, занимается внедрением цифровых технологий и созданием ЦД в частности. Имея передовые позиции в области создания цифровых технологий, французские специалисты отмечают, что в атомной отрасли наблюдается определенное отставание от других высокотехнологичных отраслей, прежде всего автомобильной и аэрокосмической.

«Парадоксом является то, что атомная промышленность, которая производит одни из самых сложных машин, разработанных человеком, отстала во внедрении цифровых технологий» [228].

Монополистом рынка атомной энергетики во Франции является компания Electricite de France (EDF), которая обеспечивает электроснабжение 25 млн домов.

Перед EDF стоят масштабные задачи, включая повышение производительности парка реакторов из 58 единиц во Франции и 15 в Великобритании, а также капитальный ремонт парка установок с целью продления срока их службы от 40 до 60 лет. И специалисты компании заявляют, что «возможность создания цифровых двойников ядерных установок является основным преимуществом, когда речь идет о подготовке к восстановлению, оптимизации деятельности станций, находящихся в эксплуатации, или с новыми системами, которые необходимо установить».

В материалах EDF [229] отмечается, что в компании разрабатываются ЦД как отдельных элементов оборудования, так и мультисистемных процессов. Не все проекты упоминаются в открытой печати. В качестве публичного примера разработки цифрового двойника специалистами EDF приведем проект VeRCoRs.

VeRCoRs – это проект, в рамках которого создана модель корпуса ядерного реактора, выполненная в масштабе 1:3, на которой изучаются процессы износа защитного контура.

Проект направлен на анализ поведения защитной оболочки в случае тяжелой аварии и нацелен на изучение проницаемости бетона в процессе старения на основе сбора экспериментальных данных и проведения численных расчетов. В рамках этого проекта был создан ЦД, в котором использовался большой объем экспериментальных данных и проводилось их сравнение с результатами мультифизического моделирования объекта.

Физическая часть двойника – это макет бетонного здания, оснащенный многочисленными датчиками различных типов, построенный для изучения влияния старения на потерю преднапряжения¹¹¹ и влияния данного процесса на эволюцию проницаемости бетона. Защитные бетонные конструкции, используемые в АЭС, должны обеспечивать определенный порог проницаемости, который измеряется экспериментально каждые 10 лет. Для повышения безопасности атомных объектов необходимо более детальное изучение поведения материалов. Обеспечение безопасности и качественного технического обслуживания требует подробных знаний о поведении бетонов, используемых в защитной оболочке, для того, чтобы можно было предсказать влияние старения бетона на герметичность конструкции.

Построенный в проекте VeRCoRs макет в сочетании с разработанными цифровыми моделями и составил решение класса ЦД.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния в бетонной конструкции использовалось программное обеспечение с открытым исходным кодом. В частности, пакет программ Aster для расчетов на основе метода конечных элементов и SALOME – платформа для пре- и постпроцессинга и последующей обработки для численного моделирования (рис. 3.6).

Проект начался в 2016 г., в исследовательском центре EDF. После трех лет экспериментов, проведенных на макете, в том числе в испытаниях под давлением, удалось подтвердить репрезентативность модели и показать, что проницаемость бетона в макете меня-

¹¹¹ Современные методы каркасного строительства используют технологию преднапряжения железобетонных конструкций. Преднапряженные конструкции – железобетонные конструкции, напряжение в которых искусственно создается во время изготовления путем натяжения части или всей рабочей арматуры.

ется в тех же пропорциях, что и в реальных защитных оболочках. Проведенные на макете исследования позволили лучше понять механизмы изменения его ключевых параметров, включая такой параметр, как газопроницаемость в предварительно напряженной бетонной конструкции.

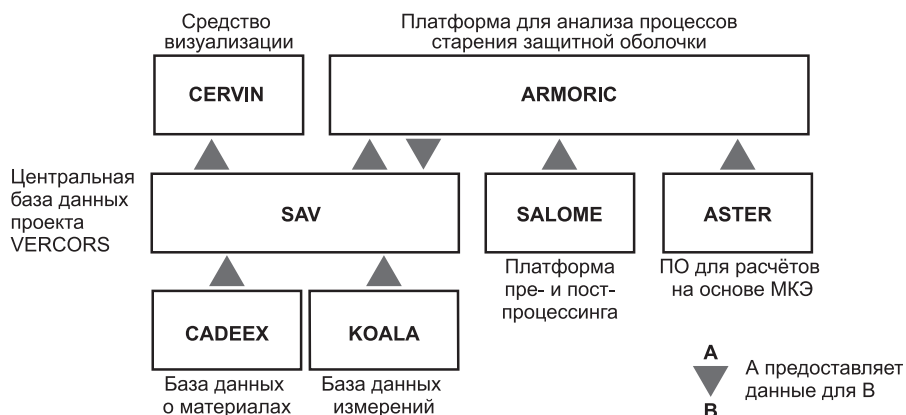


Рис. 3.6. Экосистема программного обеспечения цифрового двойника проекта VeRCoRs. Источник: EDF

В EDF отмечают, что ЦД – это новый этап в развитии инженерных и аналитических технологий, подтвердивший успешность в оптимизации крупных компонентов атомных станций.

EDF не только проводит собственные исследования, направленные на возможности создания ЦД АЭС, но также ведет широкое сотрудничество по данной теме. В частности, в 2018 г. EDF, Dassault Systèmes и Cargemini объявили на Всемирной ядерной выставке о подписании двадцатилетнего соглашения о партнерстве в работе по цифровой трансформации оборудования и инфраструктуры компании EDF в целях повышения производительности и общей конкурентоспособности атомных станций.

Партнерство нацелено на совместное проектирование промышленных объектов на базе платформы 3DEXPERIENCE Dassault Systèmes, которая будет также использоваться для разработки ЦД атомных станций – на стадии проектирования, строительства и эксплуатации. Cargemini в сотрудничестве с Dassault Systèmes будет предоставлять услуги в области консалтинга, сопровождения и системной интеграции.

ЦД в рамках программы INDE

Не менее активные исследования по использованию ЦД в процессе создания АЭС ведутся в Великобритании. В этой связи интересно отметить проект разработки цифровых реакторов (Digital Reactor Design Programme) [230], который ведется департаментом по бизнесу, энергетике и промышленной стратегии правительства Великобритании (Energy and Industrial Strategy, BEIS).

Проект финансируется правительством Великобритании в рамках программы исследований, направленной на создание интегрированной ядерной цифровой среды (Integrated Nuclear Digital Environment INDE). Программа нацелена на разработку цифровой интегрированной платформы (цифрового двойника) для поддержки создания ядерного реактора на всех этапах жизненного цикла – от проектирования до вывода из эксплуатации (рис. 3.7).

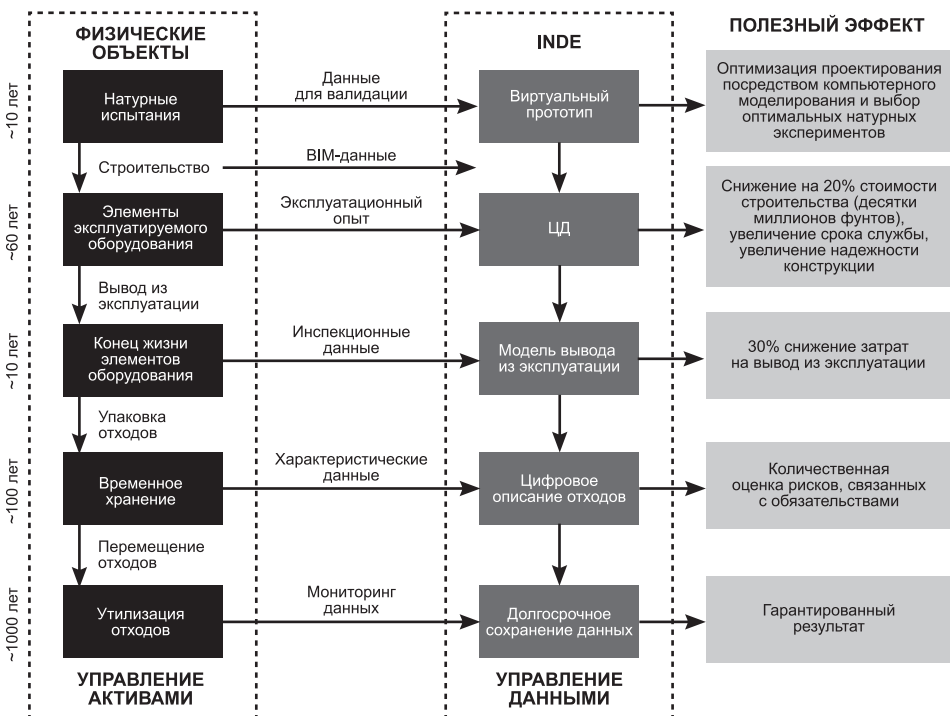


Рис. 3.7. Основные элементы цифровой платформы, реализуемой в рамках программы INDE. Источник: [231]

Программа нацелена на повышение эффективности и сокращение времени вывода на рынок объектов ядерной энергетики. В рамках программы разрабатывается цифровая среда для создания атомных станций от стадии прототипа до стадии вывода из эксплуатации. Цифровая среда состоит из серии цифровых двойников, строится на основе взаимосвязанных мультимасштабных, мультифизических численных моделей, связанных с реальным миром данными, получаемыми во время испытания прототипов, мониторинга объектов в процессе их эксплуатации, послеаварийных инспекций и мониторинга хранимых отходов. Данные, полученные в процессе реализации программы, будут применяться в проектах, связанных с продлением срока службы атомных станций, а также в проектах по выводу АЭС из эксплуатации. Программа имеет важное значение для ядерной промышленности в целом. Она позволит решать задачи, связанные с очисткой устаревших полигонов отходов, задачи создания ядерных реакторов будущего поколения и модульных атомных электростанций. Предполагается, что внедрение INDE приведет к сокращению сроков разработки, снижению затрат и повышению надежности, работоспособности и безопасности ядерных объектов.

Одним из главных исполнителей проекта является международная компания Wood – один из мировых лидеров в предоставлении проектных, инженерных и технических услуг для энергетического и промышленного сектора экономики. Компания ведет деятельность более чем в 60 странах, насчитывает около 60 тысяч сотрудников, работает в ряде отраслей, включая нефтегазовый сектор, добычу полезных ископаемых и ядерную энергетику. В 2016 г. компания Wood получила финансирование от BEIS для выполнения первого этапа проекта по созданию цифрового двойника реактора.

Для выполнения проекта было сформировано партнерство из девяти организаций во главе с Wood, и работа над первым этапом была завершена в 2019 г. Первая фаза программы Digital Reactor Design успешно продемонстрировала подтверждение концепции, путем разработки платформы компьютерного моделирования и управления объектами охватывающей весь жизненный цикл ядерного реактора.

В 2019 г. правительство Великобритании назначило компанию Wood руководителем второго этапа программы исследований по использованию цифровых моделей и высокопроизводительных вычис-

лений для оптимизации средств при проектировании, строительстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации ядерных реакторов.

Этот этап направлен на реализацию цифровых инструментов в реальных проектах с целью обеспечить повышение эффективности цифрового проектирования, достичь оптимизации цепочки поставок и в конечном итоге продемонстрировать увеличение уровня культуры разработки и реализации ядерных проектов во всей отрасли.

Wood возглавляет партнерство по проектированию цифровых реакторов (Digital Reactor Design Partnership) при поддержке субподрядчиков из секторов промышленности и науки. Среди них такие организации, как EDF Energy, Rolls-Royce, Национальная ядерная лаборатория (National Nuclear Laboratory), Центр виртуального инжиниринга Ливерпульского университета и Исследовательский центр передового ядерного производства (Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre) Университета Шеффилда. Среди партнеров второго круга есть уже упомянутая нами ранее компания General Electric с ее большим опытом в сфере создания ЦД. Есть опыт в создании ЦД и у других партнеров. В частности, в проекте задействована компания Assystem – международный поставщик инжиниринговых услуг со штаб-квартирой в Париже. Принимая участие в крупном проекте по созданию ЦД АЭС, в рамках которого были созданы модели 4000 объектов оборудования атомной станции, компания Assystem продемонстрировала опыт разработки ЦД оборудования атомной станции с использованием BIM-технологий и трехмерного лазерного сканирования.

ЦД в Госкорпорации «Росатом»

Госкорпорация «Росатом», насчитывающая в своем составе около 400 предприятий и более 250 тыс. сотрудников, – один из крупнейших производителей и потребителей цифровых технологий и продуктов, необходимых для эффективной организации атомной отрасли.

По словам главы госкорпорации Алексея Лихачева, «без новых цифровых продуктов и технологий Росатом не сможет закрепиться в качестве глобальной компании-лидера как по основным направлениям, я имею в виду строительство 36 блоков АЭС за рубежом, так и по новым – от освоения Арктики до переработки промышленных отходов I и II класса опасности».

В 2018 г. в Госкорпорации «Росатом» была принята программа «Единая цифровая стратегия 2.0», в рамках которой сформировано

десять программ, одна из которых называется «Цифровой двойник и прорывные технологии». По направлению «цифровые двойники» разработана дорожная карта, в которой расписан план работ по трем основным направлениям – «цифровой двойник оборудования», «цифровой двойник АЭС» и «данные цифровых теней».

В рамках корпорации существует целый ряд компаний, которые занимаются вопросами разработки и применения цифровых технологий. В контуре Госкорпорации «Росатом» разработаны собственные программные комплексы для моделирования широкого круга физических процессов, в том числе и для создания решений класса ЦД. К ним, в частности, относятся уже упомянутые нами ранее продукты «Логос», «Лэгак-ДК», «Данко+Гепард», «Нимфа», «Призма» и многие другие. В компании есть собственные уникальные вычислительные мощности, которые позволяют с использованием численных методов производить расчеты сложнейших задач (используются модели на десятках миллионов конечных элементов).

В компании построен и запущен собственный Центр обработки данных, являющийся крупнейшим в Европе.

В контуре Госкорпорации «Росатом» работает целый ряд научных и проектных институтов, которые разрабатывают собственные цифровые технологии для разных этапов создания АЭС, а также осуществляется широкое сотрудничество с внешними поставщиками цифровых технологий.

В Росатоме существует ряд завершенных проектов, которые можно отнести к категории ЦД, и целый ряд проектов находится в развитии. Причем эти решения связаны не только с созданием и эксплуатацией АЭС, это также проекты на предприятиях, занятых в сфере добычи урана, создания ядерного оружейного комплекса, ледокольного флота, фундаментальной науки. Далеко не все из них являются публичными, мы остановимся лишь на некоторых открытых проектах, в рамках которых созданы или создаются решения класса ЦД.

Проекты класса ЦД, реализованные на предприятиях добывающего комплекса

ЦД «Умный рудник»

Решение класса ЦД «Умный рудник» реализовано в АО «Хиагда» – предприятии Уранового холдинга «АРМЗ», которое занимается до-

бычей урана высокоэффективным и экологически безопасным методом скважинного подземного выщелачивания в одном из районов Бурятии. В конце 2018 г. предприятие запустило в опытную эксплуатацию решение «Умный рудник» на месторождении Источное. В основе технологии «умного рудника» лежит цифровой двойник месторождения – цифровая 3D-модель рудного тела, соединенная с современной SCADA-системой, наполняющей его технологической информацией в реальном времени и позволяющей осуществлять управляющие воздействия.

Внедренная система позволяет оптимизировать отработку месторождения (определить необходимое число скважин, расположение закачивающих и выкачивающих скважин, определить порядок разработки участков для максимально быстрого или полного извлечения урана, предотвратить возникновение аварийных и внештатных ситуаций). В 2019 г. урановый холдинг АРМЗ решил тиражировать технологию «умного рудника» на другие месторождения.

Цифровой двойник вибросита

Еще одним примером применения технологии ЦД на предприятиях Росатома является проект по созданию ЦД вибросита.

В 2014 г., в АО «ТВЭЛ», стартовал проект по разработке системы очистки бурового раствора.

В начале 2016 г. создали опытный образец, но основной элемент конструкции – вибросито, которое должно было работать на эксплуатационном режиме со средним виброускорением около 7 g, – разрушался, не достигая целевого показателя. Другие опытные образцы тоже не обеспечивали требуемых характеристик. В начале 2018 г. было решено разработать цифровой двойник установки. К проекту были привлечены специалисты из Инжинирингового центра ComrMechLab СПбПУ.

В результате за несколько месяцев были разработаны математические модели высокого уровня адекватности, что было подтверждено валидацией моделей для серии натуральных испытаний на динамических режимах работы установки. Этот этап работы занял около трех месяцев.

Далее, была сформирована матрица требований/целевых показателей и ресурсных ограничений как необходимый элемент разработки полноценного цифрового двойника. Затем путем рациональ-

ной балансировки конфликтующих между собой целевых показателей в процессе проектирования была обеспечена одновременная реализация 10 траекторий проектирования. Несколько траекторий проектирования (без увеличения времени и стоимости проекта) позволили «сгенерировать» и последовательно рассмотреть около 300 конструктивных вариантов вибросита. В результате семь полученных решений удовлетворяли требованиям технического задания (7 g). Некоторые варианты исполнения вибросита выдерживали и более высокие уровни средних виброускорений – до 12 g.

Для выполнения заказа на основе разработанных валидированных математических моделей и разработанных вариантов цифрового двойника работу удалось выполнить практически на порядок быстрее, чем с помощью традиционных технологий. При этом были существенно сокращены затраты и количество инженеров-исполнителей. Если до использования технологии ЦД удалось рассматривать один конструктивный вариант изделия за 3 месяца, то после разработки ЦД за 2 месяца было рассмотрено около 300 вариантов, то есть «в среднем» 5 вариантов каждый день, что невозможно в случае применения традиционного подхода проектирования.

На основе полученных данных и после проведения межведомственных испытаний было принято решение выпустить на рынок установку с характеристикой 8,8 g, что значительно превысило параметры установки зарубежной компании – мирового лидера. В результате успешной реализации проекта по разработке цифрового двойника динамически высоконагруженной установки АО «ТВЭЛ» не только не потерял клиента, но и получил заказы от других компаний.

Проекты класса ЦД, связанные с созданием и эксплуатацией АЭС

В Госкорпорации «Росатом» работает целый ряд организаций, занимающихся построением моделей и созданием ЦД различных элементов АЭС. Так, например, в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» при участии специалистов Саровского инженерного центра были проведены работы по созданию цифрового двойника первого контура реакторной установки с использованием пакета программ Simcenter STAR-CCM+, который представляет решение для моделирования динамики жидкости и газа, механики твердых тел, теплопередачи и других

процессов. С применением Simcenter STAR-CCM+ была создана полномасштабная CFD-модель первого контура реакторной установки ВВЭР, включающая в себя основные узлы (реактор, парогенераторы, главные циркуляционные насосные агрегаты, трубопроводы). «Методология моделирования первого контура реакторной установки и его отдельных элементов разрабатывалась в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» на протяжении нескольких лет. В ходе исследования применялись CFD-технологии для подтверждения основных принятых технических решений – на примере Нововоронежской АЭС-2, блок номер 1, с реакторной установкой ВВЭР-1200. В рамках процедуры разработки модели первого контура были выполнены предусмотренные методологией верификационные и валидационные исследования. Было также проведено сравнение результатов CFD-расчета с проектными данными при работе установки на номинальном режиме. Для валидации CFD-модели использовались данные, полученные не только на экспериментальных стендах, но и в ходе выполнения пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию новых энергоблоков. По итогам сравнения было показано соответствие расчетных данных проектным в пределах технических допусков и погрешностей, что подтверждает корректность моделирования» [232].

Разработанная модель является очередным шагом к современному цифровому проектированию на базе технологии цифрового двойника реакторных установок АЭС с ВВЭР-1200. Применение разработанной CFD-модели позволило получить локальные распределения теплогидравлических параметров теплоносителя, недоступные для прямого измерения на АЭС, что позволяет выявить проблемные места на ранних этапах проектирования и сократить сроки разработки. CFD-подход позволит моделировать аварийные режимы, которые постулируются при работе АЭС, но экспериментальное подтверждение которых натурными экспериментами затруднено [233].

Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР

Масштабный проект, который можно отнести к классу ЦД, – это виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР, программно-технический комплекс на базе компактного суперкомпьютера отечественного производства. Платформа была создана силами специалистов АО «ВНИИАЭС» в сотрудничестве с Институтом безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН) при финансировании со сто-

роны АО «Концерн Росэнергоатом». Разработка концепции и технологии виртуальной АЭС с ВВЭР стартовала еще в 2009 г., а с 2015 г. началась активная стадия разработки под грифом «Разработка программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»».

Программно-технический комплекс предоставляет совокупность интегрированных кодов, обеспечивающих мультифизическое моделирование процессов, протекающих в системах и элементах АЭС с реакторной установкой технологии ВВЭР, на высокопроизводительной вычислительной системе, и систему вывода данных – видеостену из мониторов с высоким разрешением.

Расчетные коды дают возможность построения моделей энергоблоков с реакторной установкой технологии ВВЭР для численного анализа их работы как в режимах нормальной эксплуатации, так и в случае аварий.

Пилотная модель программно-технического комплекса разрабатывается для энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2.

Система кодов, входящих в состав программно-технического комплекса, позволяет моделировать широкий набор процессов, включая нейтронно-физические – в активной зоне реакторной установки; теплогидравлические – в оборудовании реакторного и турбинного отделений, в системе помещений защитной оболочки; термомеханические – в топливе и оболочке твэла; электромеханические – в оборудовании электрической части энергоблока; поведение расплава на днище корпуса реактора и в устройстве локализации расплава.

Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС» совмещает возможности разноуровневых моделей энергоблока: полномасштабных моделей технологических систем и систем АСУ ТП, детализированных моделей основных элементов энергоблока, и позволяет проводить комплексный анализ проектов АСУ ТП и энергоблоков в целом.

Планируется поэтапное внедрение программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» в деятельность Кризисного центра АО «Концерн Росэнергоатом», а также его тиражирование на энергоблоки других типов [234]. Программно-технический комплекс способен обеспечить инженерную поддержку Кризисного центра АО «Концерн Росэнергоатом» и формирование сценариев противоаварийных тренировок; верификацию проектных решений;

расчетное обоснование безопасности; повышение операционной эффективности.

Кризисный центр обеспечивает оперативное взаимодействие руководства атомной станции с экспертами центра технической поддержки, службами и ведомствами, обеспечивая в случае внештатной ситуации доступ к необходимой информации.

Проект «Прорыв»

Такие объекты, как атомные станции, имеют длительный срок эксплуатации, и естественно, что технологии класса ЦД развиваются в новых проектах, где речь идет о применении новых цифровых технологий на всех стадиях жизненного цикла. В Госкорпорации «Росатом» есть несколько крупных проектов, в рамках которых развиваются технологии класса ЦД. И один из них – это проект «Прорыв», который реализуется Росатомом на площадке Сибирского химического комбината (г. Северск, Томская обл.). «Проект призван создать новую технологическую платформу атомной отрасли с замкнутым ядерным топливным циклом и решением проблем отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов» [235]. Одним из направлений проекта является строительство опытно-демонстрационного энергетического комплекса в составе реакторной установки «БРЕСТ-ОД-300» с пристанционным ядерным топливным циклом, и комплекс по производству смешанного уран-плутониевого (нитридного) топлива для реакторов на быстрых нейтронах.

В отраслевом проекте «Прорыв» используются наработки проекта «Виртуально-цифровая АЭС» (ВЦАЭС), созданного специалистами АО «ВНИИАЭС» в сотрудничестве с Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. В рамках проекта создаются расчетные коды нового поколения для численного моделирования процессов, протекающих на АЭС с реакторной установкой на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.

На базе ИБРАЭ РАН создан центр по реализации кодов нового поколения, в рамках которого институт разрабатывает линейку расчетных кодов для моделирования режимов работы действующих и перспективных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Коды нового поколения дают возможность вести расчеты с использованием 3D математических моделей, осно-

ванных на экспериментальных данных. Коды имеют современные системы визуализации данных. Модульная архитектура кодов дает возможность объединения модулей для решения различных задач.

Например, интегральный код СОКРАТ-БН применяется для расчетного обоснования безопасности реакторных установок с натриевым теплоносителем.

Универсальный код HYDRA-IBRAE/LM используется для теплогидравлического обоснования АЭС с реакторными установками с жидкометаллическим теплоносителем. Универсальный топливный код БЕРКУТ предназначен для численного моделирования термомеханического и физико-химического поведения отдельного твэла с различными видами топлива в активной зоне реактора на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем [236].

Универсальный интегральный расчетный код ЕВКЛИД предназначен для анализа аварий реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем в различных режимах работы, с учетом факторов, влияющих на безопасность реакторной установки, в том числе процессов нагрева теплоносителя, разгерметизации оболочки твэла, плавления активной зоны, распространения продуктов деления под защитной оболочкой и за ее пределы – в окружающую среду.

Цифровые технико-экономические модели АЭС для оптимальной работы в рыночных условиях

Отдельный интерес представляет реализация цифровых технико-экономических моделей АЭС для максимизации прибыли от производства и сбыта тепловой и электрической энергии в рыночных условиях.

В мире хорошо себя зарекомендовали методы оптимизации работ АЭС/ТЭС с использованием смешанно-целочисленного линейного программирования (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) и решателей (solver) таких компаний, как IBM, FICO, GUROBI.

Данные методы также успешно зарекомендовали себя и в России. Подобные проекты успешно внедряются такими компаниями, как «Национальное бюро информатизации» и «КРОК».

Перспективные проекты включают в себя создание цифровой платформы:

1. сбор коммерческой информации;
2. создание цифровой модели для оптимизации объема и распре-

деления выработки электрической и тепловой энергии между оборудованием АЭС;

3. формирование оптимальных заявок, выбор состава включенного¹¹² генерирующего оборудования.

Расчетно-аналитический экспериментальный комплекс пусконаладочных работ

Для проведения комплекса пусконаладочных работ необходимо производить испытания для выяснения, насколько устойчива система управления при разных переходных режимах и насколько корректно отрабатываются защиты блокировки при неблагоприятном развитии событий. По классической схеме проводится длительный итерационный процесс, в котором идут реальные натурные испытания, вносятся изменения, и процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнут положительный результат. Это рискованно, затратно и долго. Решением проблемы явилось создание ЦД, на котором просчитывают возможные варианты развития событий, настраивают аппаратуру защиты и блокировки. Если в виртуальных испытаниях достигается положительный результат (в теории), после этого настраивается аппаратура блока, и уже после этого проводят испытания, которые осуществляются с первого раза.

Вышеописанный ЦД (расчетно-аналитический комплекс пусконаладочных работ) был создан специалистами АО «Атомтехэнерго» для повышения качества пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию энергоблоков АЭС.

Комплекс обеспечивает повышение качества пусконаладочной документации на основе модельных расчетов, обеспечивает выявление несоответствий на ранней стадии; позволяет накапливать базу экспериментальных данных по результатам моделирования, реального выполнения пусконаладочных работ и использовать данные для сравнительного анализа. Цифровой двойник также используется для подготовки специалистов при работе с комплексом до начала пусконаладочных работ.

Принципиальная схема комплекса показана на рисунке 3.8.

¹¹² Помимо «включенного», рассматривают резервное, «аварийное» и «находящееся в ремонте».

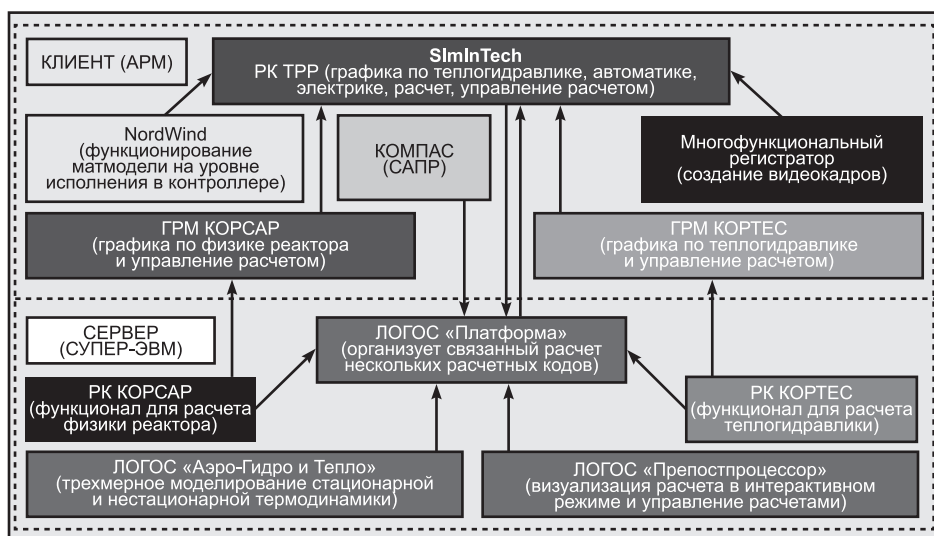


Рис. 3.8. Расчетно-аналитический экспериментальный комплекс пусконаладочных работ. Источник: АО «Концерн Росэнергоатом»

На рисунке использованы следующие аббревиатуры и названия: МФР – многофункциональный регистратор; SimInTech (Simulation In Technic) – среда динамического моделирования для расчетной проверки работы системы управления сложными техническими объектами. SimInTech осуществляет моделирование технологических процессов, протекающих в различных отраслях с одновременным моделированием системы управления и позволяет повысить качество проектирования систем управления за счет проверки принимаемых решений на разных стадиях проекта. SimInTech служит для анализа нестационарных процессов в ядерных и тепловых энергоустановках, в системах автоматического управления, в следящих приводах, в других технических системах, описание динамики которых может быть представлено в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений или реализовано методами структурного моделирования.

NordWind – исполнительная среда, которая обеспечивает работу алгоритмов, созданных в SimInTech.

PK TPP (Thermal Power Plant) – расчетный комплекс, который позволяет рассчитывать переходные процессы в сложных теплогидравлических системах.

РК «Кортес» – расчетный код для сопряженного моделирования тепловых и гидравлических динамических процессов в оборудовании и технологических системах АЭС с реакторными установками типа ВВЭР, а также для моделирования теплогидравлических процессов в экспериментальных установках и на стендах с водяным теплоносителем.

РК «Корсар» – расчетный код для проведения расчетов в обоснование безопасности проектируемых, сооружаемых и действующих АЭС. Функциональное наполнение РК «Корсар» представляет собой программно-реализованные математические модели физических явлений в элементах энергетического оборудования. Основой функционального наполнения кода является блок расчета нестационарной контурной теплогидравлики.

Проект «ВВЭР–ТОИ»

Проект «ВВЭР-ТОИ» – это проект создания водо-водяного энергетического реактора нового поколения III+. Атомные энергоблоки поколения III+ обладают улучшенными технико-экономическими показателями и соответствуют самым современным требованиям МАГАТЭ в области безопасности. В проекте пока нет части, касающейся эксплуатации. Реализованная проектная часть и проведенные испытания позволяют отнести проект к категории «ЦД на стадии проектирования».

Аббревиатура ТОИ имеет следующее толкование: «Типовой» – подразумевает, что речь идет о типизации блока – выделении неизменяемой части, которая должна составлять около 60% и вести к ускорению разработки рабочей документации, лицензирования, удешевлению строительства и, как следствие, сокращению сроков вывода объекта на рынок. «Оптимизированный» – говорит о том, что ВВЭР-ТОИ – это оптимизированный проект. В проекте увеличена мощность, срок службы, внесены изменения в реакторную установку. «Информатизированный» – указывает на разработку информационной модели энергоблока.

Строительство блока ВВЭР-ТОИ ведется в Курской области, в городе Курчатове. В течение пары лет планируется доработать проект ВВЭР-ТОИ, создав на его базе оптимизированный типовой продукт, готовый к серийному тиражированию на разных рынках. Реализация инвестиционного проекта по строительству энергоблоков № 1 и № 2 Курской

АЭС-2 начата в 2013 г. Проект создан российскими проектировщиками (Группа компаний ASE, инжиниринговый дивизион Госкорпорации «Росатом») на базе технических решений проекта АЭС с ВВЭР-1200 (Генеральный проектировщик – АО «Атомэнергопроект»).

Особенностью ВВЭР-ТОИ является разработка и внедрение системы управления проектами на базе технологии Multi-D, которая позволяет оптимизировать параметры «срок– стоимость– качество» при сооружении, а также создает информационную модель энергоблока и обеспечивает ее дальнейшее информационное сопровождение. Система управления инженерными данными позволяет аккумулировать всю накопленную информацию по проекту и передавать ее без потерь и повторного ввода данных на этапах проектирования, сооружения и ввода в эксплуатацию АЭС и передачи информационной модели на этап эксплуатации.

Multi-D – цифровая платформа для оптимизации строительно-монтажных работ, разработана по заказу АО «Концерн Росэнергоатом» группой компаний ASE (инжиниринговый дивизион Госкорпорации «Росатом»). Платформа служит для управления данными на различных стадиях жизненного цикла сложного инженерного объекта с целью снижения сроков его создания и стоимости. Пакет включает в себя такие функции, как: координация различных типов календарных планов; обмен информацией между участниками процесса управления рисками; мониторинг хода сооружения; управление жизненным циклом инженерных объектов; обмен техническими документами, формирование баз данных и классификаторов оборудования и материалов, включая их техническое описание, сопроводительную документацию и 3D-модели; управление требованиями и контроль над их реализацией, передачу данных в систему управления информацией и системы проектирования. В 2016 г. система управления проектами Multi-D на Ростовской АЭС («Life cycle management based on Multi-DTechnology at Rostov NPP») была признана лучшей в номинации «Мега-проект» (Mega-Project Multi-Roadmap Element) в международном конкурсе CETI AWARD2016.

ЦД в здравоохранении и медицине

Достаточно широкое распространение технология ЦД получила в здравоохранении, где моделируемыми объектами могут являться

организм человека или отдельные его подсистемы, а сама технология направлена на продление срока жизни человека с помощью использования его цифровой копии.

Эта задача смыкается с таким направлением, как разработка и поддержка медицинской техники, которая в свою очередь используется для лечения и поддержки самого человека (пациента).

Объем информации об организме человека постоянно растет. Помимо исследований, которые проводятся в медицинских учреждениях (ЭКГ, КТ, МРТ и прочее), появилось огромное количество бытовых датчиков и приборов, которые измеряют пульс, давление, температуру, отслеживают физическую активность, фазы сна и т. п. Традиционные носимые устройства добавляют к базовой функциональности дополнительные возможности мониторинга состояния организма. Так, например, уже появились наушники со встроенными датчиками сердцебиения. Также доступны устройства, которые имплантируются в тело человека (например, подкожный глюкометр). Появились также «умные» капсулы со встроенными датчиками, позволяющие измерять уровень кислотности желудочного сока, давление и температуру в желудке. Разрабатывается «умная» одежда со встроенными датчиками, которые позволяют контролировать сердечный ритм, давление, частоту дыхания, температуру тела и другие параметры. Возможность монитрить во времени динамику обозначенных параметров и обрабатывать их с помощью аппарата предиктивной аналитики может предотвратить опасные для жизни кризисы в виде инфарктов и инсультов.

Объемы и разнообразие данных, характеризующих состояние пациентов, растут и распространяются от макроуровня до молекулярного. Говоря о молекулярном уровне, можно упомянуть проекты, где собирают геномную информацию физических лиц, – «The 100.000 Genomes Project» (Великобритания) или «Прецизионная медицина США» (Рабочая группа PMI, 2015), а также частные проекты, которые ведутся в Human Longevity Inc. и Клиническом центре индивидуальной медицины Mayo [237].

Возможность сбора и интеграции медицинской информации с данными персональных датчиков позволяет строить достаточно точные модели индивидуума и прогнозировать его состояние в будущем.

Модели органов и систем человека создаются как на основе аналитических моделей, основанных на данных, так и на основе мо-

делирования различного рода физических процессов. Концепция мультидисциплинарного и мультимасштабного моделирования, о которой шла речь при обсуждении методов моделирования инженерных систем, в полной мере применима к моделированию организма человека.

Так же как и в других индустриях, работы по созданию цифрового двойника человека идут по пути «от частного к общему» – от создания двойников отдельных органов и систем к построению (в перспективе) решения, которое позволит объединить данные подсистемы для получения комплексного цифрового двойника конкретного индивидуума. С помощью такого ЦД можно понять сложнейшие процессы, протекающие в организме конкретного пациента, с учетом строения этого организма (на макро- и микроуровне), истории его формирования, его «ремонт» (лечения), и использовать эти знания для гармонизации работы всех подсистем, предотвращения сбоев их работы и продления активной жизни пациента.

Интеграция различного рода моделей (генетических, биохимических, физиологических, поведенческих и т. п.) дает возможность более полного и точного прогнозирования состояния организма человека.

В области создания ЦД отдельных органов человека больше всего упоминаний в открытых источниках можно найти о проектах по созданию ЦД сердца. Так, например, базирующаяся в Эрлангене компания Siemens Healthineers разрабатывает программное обеспечение, которое генерирует ЦД сердца пациента, позволяя ставить более точные диагнозы или, например, определять оптимальное место для установки кардиостимулятора перед операцией, а также прогнозировать и минимизировать побочные эффекты хирургических процедур. В разработках Siemens Healthineers использует искусственный интеллект, программное обеспечение позволяет прогнозировать надвигающиеся болезни или реакции пациента на конкретное лечение. Для обучения алгоритмов компания использовала базу данных, содержащую более 250 миллионов изображений, и другие данные пациентов. По данным разработчиков, чтобы проверить технологию, специалисты сгенерировали 100 цифровых двойников сердца пациентов, которых лечили за последние шесть лет.

Проекты, направленные на создание ЦД сердца, проводятся и в России. В частности, команда специалистов Самарского политехнического института «Компьютерный инжиниринг и цифровое

производство» в 2018 г. разработала ЦД сердечно-сосудистой системы. Подходы и принципы моделирования процессов гидродинамики, отработанные в компьютерных 3D-моделях, были перенесены на биологические объекты. Разработанный ЦД сердца может быть использован для научно обоснованных решений при планировании операций, позволяет осуществить интеграцию с сервисами телемедицины, записывать в электронную медицинскую карту визуальную информацию, прогнозировать физическое состояние пациента без его физического присутствия.

Для создания искусственных сердец и клапанов с турбонасосами прямого тока крови в Зеленоградском инновационно-технологическом центре (ЗИТЦ) при НИУ МИЭТ с 2012 г. ведутся работы по созданию ЦД сердца и крупных сосудов, персонализированных к каждому пациенту. ЦД строится с использованием ПО ANSYS Fluent. Результаты работ внедрены в Национальном медицинском исследовательском центре сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева и НИИ скорой помощи им. Н. В. Склифосовского (Москва).

Идея создания ЦД пациента перекликается с концепцией «персонализированной медицины», которая представляет собой совокупность методов профилактики, диагностики и лечения заболеваний, основанных на индивидуальных особенностях пациента. Вместо того чтобы основывать лечение на среднестатистических данных и моделях, персональная медицина предполагает возможность опоры на модель состояния здоровья конкретного пациента, а в перспективе – на его цифровой двойник, что позволяет подбирать лекарственные средства и методы лечения, которые подходят конкретному индивидууму. Современная медицина вплотную подходит к возможности создавать персонализированные модели на основе «больших данных» и дополнять их непрерывно отслеживаемыми параметрами здоровья и образа жизни человека, что и позволяет формировать ЦД пациента.

Персонализированная медицина обещает привести к предсказательной медицине, где болезни могут быть предсказаны и предупреждены на ранней стадии. Здесь с особой важностью встают вопросы безопасности подобных ЦД, – как будут храниться модели пациентов, кому будут принадлежать, кто сможет получить к ним доступ, как будет эволюционировать понятие «конфиденциальность персональных данных».

Аналогия между ЦД в инженерии и медицине неслучайна. Инженерные технологии все больше проникают в медицину. Это связано не только с проектированием и изготовлением искусственных органов (в том числе создаваемых методами аддитивного производства), не только с использованием сложной роботизированной техники при проведении операций, но и с использованием инженерных концепций применительно к человеку как к «живой машине», к которой применимы (пусть и не в дословной формулировке) все те понятия, что используются для поддержки машин искусственных: «нормальное функционирование», «неисправная эксплуатация», «проактивное обслуживание», «профилактический ремонт», «мониторинг состояния», «оптимизация производительности» и даже «внедрение новой функциональности». Стратегия совершенствования искусственного объекта, которая заложена при проектировании и обслуживании искусственных машин, все больше рассматривается и применительно к живым организмам. Например, нейронные имплантаты (которые могут использоваться для протезирования у слепых и слабовидящих) открывают путь к возможностям, выходящим за пределы нормального человеческого зрения, и дают доступ к восприятию информации на основе анализа сигналов обычно недоступных для человека частей электромагнитного спектра [238].

Моделирование поведения неживых и «живых» машин имеет много общего. Если человек моделирует рукотворные объекты, он создает ЦД, который развивается параллельно с изготовлением физического объекта. В случае с живой природой человек пытается повторить модель, созданную природой, производя декомпозицию и пытаясь воссоздать модель и усовершенствовать ее в силу своих возможностей на данном уровне развития науки и технологий.

До сих пор речь шла о сборе физических данных об организме человека для построения моделей пациента (цифрового двойника). Конечно, физические данные могут быть дополнены данными о социальном поведении человека. Например, данными о профиле поведения в интернете.

Можно предположить, что к концу текущего десятилетия каждый человек будет иметь возможность общения со своим цифровым двойником, способным посигналить ему или его врачу о том, как оптимально поддержать здоровье. В этом случае общение с врачом

принципиально поменяется: вместо сценария, когда больной идет в клинику и жалуется на возникшие проблемы, сам врач будет предупреждать пациента о необходимости тех или иных действий, чтобы эти проблемы избежать.

Говоря о применении ЦД в медицине, можно привести примеры не только создания двойника организма пациента, ЦД могут применяться и на уровне моделирования логистики, оптимизации цепочек поставки и других бизнес-процессов в клинике. И примеры таких ЦД существуют. В частности, компания General Electric Healthcare в рамках сотрудничества с компанией Johns Hopkins Medicine разработала цифровой двойник для клиники в Балтиморе [239], который помогает анализировать траектории обслуживания пациентов и оптимизировать распределение ресурсов. На базе использования ЦД больница смогла увеличить прием пациентов, оптимизировать их доступ к жизненно важным методам лечения и неотложной помощи.

ЦД человека может рассматриваться не только в медицинских приложениях, но и как средство прогнозирования угроз здоровью, возможных травм и вредных воздействий на организм в разных ситуациях. Например, если речь идет о моделировании опасных ситуаций на строительной площадке или других потенциально опасных объектах, ЦД, получающий информацию с датчиков перемещения рабочих, систем распознавания образов, строительной техники, других элементов оборудования, может предупреждать сотрудников о возможных опасных ситуациях, об уровне радиации, о предельно допустимых концентрациях вредных веществ, анализировать, насколько та или иная ситуация может повредить здоровью, высылать предупреждения и рекомендации.

ЦД в сельском хозяйстве

Сельское хозяйство – это отрасль, которая составляет около 10% мирового ВВП и от которой зависит успех борьбы с продовольственным кризисом, с бедностью и голодом. За счет применения современных технологий автоматизации в сельском хозяйстве развитых стран занято существенно меньше людей, чем в развивающихся странах. Цифровые технологии позволят дополнительно повысить производительность труда в сельском хозяйстве, оптимизировать использование земельных и водных ресурсов. И эффективным помощником в реше-

нии этой задачи будут цифровые двойники, основанные на комплексных мультидисциплинарных моделях агропромышленных объектов.

В цифровых двойниках, используемых в сельском хозяйстве, реализуются многие идеи, апробированные в других отраслях. Подобно тому как можно создать цифровой двойник человека, который при помощи портативных устройств и средств искусственного интеллекта будет отслеживать состояние здоровья своего хозяина и давать ему полезные рекомендации по повышению работоспособности, так подобные технологии можно использовать и для ухода за животными. В частности, компания Connecterra из Нидерландов создала ЦД для дистанционного контроля за состоянием здоровья крупного рогатого скота. В основе решения находится модель, которая использует искусственный интеллект для обработки данных, полученных на основе IoT-датчиков, и подсказывает фермеру, как оптимизировать уход за животным на разных стадиях его жизненного цикла [240].

Приложение BeeZon, разработанное греческими специалистами, занято непрерывным мониторингом пасек в режиме реального времени. BeeZon помогает пчеловодам удаленно контролировать пасеки и жизнь пчелиных семей, отслеживая температуру, влажность и акустический фон в каждом улье, принимать правильные и быстрые решения в случае, когда возникают какие-либо проблемы.

Объектами моделирования в сельском хозяйстве могут быть самые разные сферы производства. Ведь можно создать цифровой двойник поля, цифровой двойник системы орошения, цифровой двойник уборочной машины и так далее..

Например, компания «Нова-Инжиниринг» совместно с ООО «Ротоснаб» разрабатывает цифровой двойник форсунки для распыления воды и инсектицидов при поливе и при обработке сельхозугодий с дронов и самолетов. Так же как в промышленном производстве, где объединение ЦД отдельных компонентов (двигатель, станок, конвейер) позволяет создавать цифровые двойники более сложной комплексной системы (ЦД цеха или даже завода), так и в сельском хозяйстве объединение ЦД нескольких подсистем (ЦД поля, ЦД системы орошения и т. п.) дает возможность говорить о цифровом двойнике, например, уровня фермы (цифровая ферма).

В частности, о создании системы цифрового сельского хозяйства на базе объединения ряда цифровых двойников отдельных подсистем заявляют сотрудники подразделения математического моде-

лирования и Data Science компании «Русагро» [241]. По сведениям разработчиков, упомянутые двойники решают широкий спектр задач. ЦД позволяют вести мониторинг сельскохозяйственной техники, скота, кормов, посевного фонда, прогнозировать урожайность, а также оптимальные сроки посадки и уборки сельхозкультур, оптимизировать внутривладельческие маршруты с учетом удаленности полей от дорог и складов, снижать расходы топлива.

Цифровые двойники дают возможность следить за состоянием почвы, а при помощи собственных метеостанций прогнозировать изменения в погоде, что крайне важно для аграриев.

Анализ моделей, построенных на больших данных, дает возможность повысить производительность и культуру сельскохозяйственного труда, сформировать стратегию и тактику ведения бизнеса (с учетом колебаний рынка и проблем экспорта и импорта), короче, решить главную задачу – как оптимизировать крестьянский труд и сельское производство.

Созданием ЦД сельскохозяйственных угодий занимаются также специалисты из Сколковского института науки и технологий [242]. Ученые разработали модель, которая позволяет повысить урожайность отдельных ферм и агрокомплексов. Модель учитывает массу параметров, включая влажность, температуру, содержание в почве азота, углерода, калия, фосфора и других элементов. ЦД, получивший название «цифровой агроном», позволяет спланировать структуру полей с учетом состояния почв и так далее. Данные собираются на местах, при этом карту и рельеф местности создают с помощью дронов. Цифровой двойник помогает агрономам делать более обоснованные прогнозы, относительно того, когда какую культуру лучше сажать. Разработка Сколтеха уже протестирована в Курской области на посадках свеклы. Цифровое решение должно помочь не только увеличить урожай, но и улучшить общее состояние пригодных для сельского хозяйства земель.

Одна из важнейших задач ЦД в сельском хозяйстве – это минимизация вредного воздействия на окружающую среду пестицидов, минеральных и химических удобрений, а также рациональное использование водных ресурсов. Потребление пресной воды в сельском хозяйстве составляет около 70% от общего ее расхода в мире [243]. ЦД системы орошения может существенно сэкономить расход воды, исходя из анализа данных о состоянии растений, почвы и дру-

гих параметров. В качестве инструмента, направленного на создание ЦД для экономного орошения, можно назвать проект SWAMP (Smart Water Management Platform¹¹³).

Основная идея этого проекта заключается в том, чтобы обеспечить оптимизацию режима орошения, распределения и потребления воды на основе собираемых датчиками данных и экспертной системы, которая включает в себя модель естественного круговорота воды в природе, а также знания особенностей водопотребления разными растениями. Заниматься поливом может как сам фермер, так и система, – автономно или на основе комбинированного управления. Задача системы – минимизировать потери пресной воды, что особенно актуально в районах, где водоснабжение ограничено. Система внедряется в Бразилии, Италии и Испании. Проект выполняется в партнерстве с ассоциацией ICT4Water [244].

ЦД водных объектов

Крупный экологический проект, включающий создание ЦД и направленный на оптимизацию потребления водных ресурсов, выполняется в России, – речь идет о проекте «Цифровой Обь-Иртышский бассейн», начатом по инициативе губернатора Кузбасса. Проект направлен на борьбу с обмелением рек Сибири и Урала и будет осуществляться на основе цифровой модели речной экосистемы для оперативного контроля водных ресурсов, оптимизации их использования и улучшения экологической обстановки в регионе. Пока проект поддержан 8 приобскими регионами, но предполагается, что в перспективе в нем будут участвовать все 14 приобских региона.

Центральное место в проекте занимает цифровой двойник, разработка которого ведется силами Центра НТИ СПбПУ, имеющего большой опыт в создании мультидисциплинарных моделей разных физических объектов.

Наряду с правительством Кузбасса в проекте участвуют СПбПУ и Институт водных проблем РАН, по поводу чего в 2019 г. было подписано трехстороннее соглашение о научно-техническом сотрудничестве. Планируется, что пилотной площадкой для осуществления федерального проекта станет Кузбасс, где будет реализована его первая часть – «Цифровая Томь».

¹¹³ Дословно интеллектуальная платформа для управления водой.

По словам разработчиков, цифровое моделирование экосистемы главных сибирских рек позволит выявить основные факторы, критически влияющие на уровень техногенной нагрузки, определить пути решения проблем, связанных с накопленным экологическим ущербом, и перейти к системной реализации мер по оздоровлению водных объектов.

В рамках проекта, аналогов которому в мире пока нет, ставится масштабная технологическая и управленческая задача: с применением технологии цифровых двойников и больших данных создать комплексную систему управления водными ресурсами, которая станет инструментом поддержки принятия решений для федеральных и региональных органов власти, а также промышленных предприятий-водопользователей.

Единое платформенное решение позволит в оперативном режиме фиксировать нарушения природоохранного законодательства, выявлять и точно определять источники загрязнения, оценивать размер нанесенного ущерба и определять состав мер, направленных на оздоровление и снижение антропогенной нагрузки на водные объекты. Проект предполагает разработку оборудования нового типа в соответствии с изменением технологических процессов базовых промышленных предприятий.

В сферу ответственности специалистов Центра компетенций НТИ СПбПУ войдут следующие этапы разработки:

- Создание «цифровой тени» (Digital Shadow) речного бассейна с применением создаваемой в рамках проекта системы сбора и обработки мультимодальной потоковой информации на основе принципов интернета вещей (например, данные современных гидропостов – наземных измерительных комплексов с автоматическим поступлением информации в систему в режиме онлайн, данные дистанционного зондирования Земли и мониторинга при помощи беспилотных летательных аппаратов); формирование базы данных и базы знаний по динамическому состоянию рек и определение зон благополучия, критических зон и зон бедствия.

- Создание «умного» цифрового двойника (Smart Digital Twin) речного бассейна как техноприродного объекта с определением критических факторов техногенной нагрузки. Формирование матрицы критических параметров и ограничений позволит перейти к предсказательному цифровому моделированию состояния водного объекта.

В результате проекта предполагается создание наглядной цифровой системы управления водными объектами Обь-Иртышского бассейна, обладающей высокой степенью адекватности водным объектам и включающей интеллектуальные цифровые сервисы с различными функциональными возможностями и интерфейсами:

- международный интерфейс – система отслеживания влияния на состояние водных объектов каждой из стран, оперативного обнаружения и факторного анализа загрязнений, их эффективной локализации и контроля восстановления состояния объекта;
- федеральный интерфейс – система долгосрочного планирования мероприятий по сохранению и оздоровлению водных объектов, предполагающая привязку системы разрешительных документов, штрафов и санкций к цифровой модели объекта;
- региональный интерфейс – управленческий интерфейс для реализации регионального экологического стандарта;
- интерфейс природопользователей – управленческий интерфейс с данными конкретных природопользователей, ориентированный на их технологические процессы и мониторинг их влияния на водный объект;
- общественный интерфейс – открытый сервис информирования населения об экологическом состоянии системы рек в режиме онлайн.

Применение ЦД в других областях

Цифровые двойники используются не только производителями тяжелой техники, сегодня их применяют для повышения своей операционной эффективности даже производители массовых потребительских товаров. Например, на конференции по цифровым двойникам в Нидерландах один из докладов был посвящен созданию цифрового двойника электробритвы компании Philips. Этот ЦД включает не только модели, имитирующие штатную работу устройства, но и, например, такие ситуации, когда пользователь роняет бритву. Для повышения устойчивости прибора к подобным «авариям» разработчики проводят виртуальные дроп- и краш-тесты. Нидерландская компания Unilever, один из мировых лидеров на рынке пищевых продуктов и товаров бытовой химии, имеющая производственные предприятия в разных странах мира, применяет технологию цифровых

двойников на своих заводах и заявляет, что технология ЦД позволила ей повысить стабильность производства мыла и моющих средств.

Термин ЦД стали использовать и в финансовой сфере, где, по сути, речь идет о цифровом двойнике человека в плане моделирования его покупательского поведения и распределения материальных ресурсов, в том числе личных финансов и заемных средств. В частности, в работе PwC [245] авторы позиционируют свое решение как использование технологии ЦД для выработки финансовых рекомендаций клиентам, учитывая влияние социально-демографических, поведенческих, финансовых и медицинских факторов на предпочтения клиентов. Используя технологию ЦД, управляющие активами и страховые компании имеют больше возможностей для понимания потребностей своих клиентов и того, как они могут изменяться в соответствии с определенными событиями в жизни клиента. ЦД могут помочь найти оптимизированные персонализированные стратегии управления деньгами для конкретного клиента. Например, чтобы предсказать потребности человека в расходах после выхода на пенсию, финансовый консультант должен рассмотреть конкретные финансовые, социальные и медицинские проблемы каждого клиента и спрогнозировать их на будущее. Авторы разработки отмечают, что их финансовый сервис вполне соответствует схеме работы ЦД: для моделирования поведения отдельных держателей полисов были объединены данные из нескольких общедоступных и частных источников – миллионы строк записей и более 4000 социально-демографических, поведенческих, финансовых и медицинских факторов, распределенных во времени. На основе этих данных строится представление о финансовых профилях и потребностях клиентов. Страховщик или управляющий капиталом создает ЦД, используя комплексный набор данных, а также конкретные данные о транзакциях, которыми располагает компания. Этот ЦД постоянно уточняется по мере появления дополнительных сведений о клиенте и обновляется по мере поступления информации о событиях из жизни потребителя, о его решениях в отношении расходов и сбережений, личных предпочтениях и меняющихся финансовых потребностях. ЦД предлагает оптимальную стратегию сбережений, которую клиент может принять или отклонить. Как только потребитель определил план и принял решение, ЦД может исполнить данное финансовое решение. Вполне возможно, что данный проект в большей степени соответствует схеме использования технологии цифровых теней и боль-

ших данных. Однако, не зная набора алгоритмов, по которым строится решение, не всегда получается отнести проект к тому или иному классу. Более того, одно и то же решение может быть отнесено и к проекту класса Big Data, и к проекту класса AI, и IoT, и ЦД, поскольку все эти составляющие могут присутствовать в одном решении.

Сходные технологии с опорой на покупательский профиль клиента или профиль поведения продавца начинают использовать в ритейле. Термин ЦД получает все более широкое толкование. Возникли такие понятия, как «ЦД магазина», «ЦД товара» или даже «цифровой двойник продавца». В работе [246] цифровой двойник продавца – это модель поведения продавца, которая помогает подобрать подходящего человека на должность в торговый центр. Такая модель подскажет, как должен выглядеть продавец, как он должен общаться с покупателями, чтобы продать больше, и т. п. Анализируя поведение продавцов при обработке видео материалов, можно понять, какие действия приводят к покупкам, а какие нет. На основании этого можно составить требуемый образ продавца для того или иного класса товаров. На основе подобной цифровой модели может быть создана модель обучения и оценки работы продавцов.

ЦД магазина позволяет оптимизировать расположение и структуру будущего магазина еще на этапе его проектирования, на основе моделирования посещаемости разных отделов виртуального магазина виртуальными покупателями и статистики их покупательских предпочтений. Данные об увеличении покупательского потока помогают планировать число сотрудников в зале и график их работы.

До сих пор речь шла о вертикальных интеграциях и применении ЦД в разных отраслях. Очевидно, можно говорить и о горизонтальных приложениях, применяемых в разных сферах. Так, например, решения для логистики могут использоваться везде, где речь идет об управлении материальными, информационными и людскими потоками с целью их оптимизации. В открытых источниках можно найти достаточно много проектов, где речь идет именно о создании ЦД для улучшения логистики. В частности, применение находят цифровые двойники складов и распределительных центров, которые могут объединять трехмерную модель объекта с данными IoT, собранными на подключенных платформах хранилища. Это позволяет оптимизировать использование помещений, погрузочно-разгрузочного оборудования и деятельность персонала.

Применяя принцип объединения цифровых двойников отдельных элементов цепочки поставок, можно построить ЦД сложного логистического процесса, включающего целый ряд организаций: склады, распределительные центры, транспорт (воздушный, морской и т. п.), системы формирования заказа и отслеживания груза, автоматизированные системы учета и маркировки груза и так далее.

Задачи оптимизации цепочек поставки возникают у самых разных компаний. Как у ритейлеров, планирующих оптимальную поставку товаров через свою сеть, так и у производителей, занятых сложным процессом поставки комплектующих на сборочном производстве (ЦД цепочки поставок на заводе промышленного производства).

В частности, о создании подобного ЦД сообщает дочерняя компания General Electric – Baker Hughes, которая производит оборудование для нефтегазовой отрасли. Она использует технологии материнской компании для создания комплексного ЦД своего завода в Миндене, штат Невада, США. ЦД обеспечивает автоматизацию сложных процессов цепочки поставок на основе модели, которая включает в себя данные о тысячах машин и процессов по всему предприятию, а также данные о поставках компонентов. ЦД обеспечивает всестороннее представление в реальном времени о производительности предприятия, помогает персоналу быстро реагировать на возникающие проблемы, оптимизировать доставку и производственные процессы. В традиционных решениях (без использования ЦД) цепочки поставок планируются на основе заранее произведенных расчетов, которые обновляются ежемесячно или ежеквартально. Однако на практике процессы поставок отклоняются от заранее рассчитанного плана из-за самых различных причин. Благодаря цифровому двойнику планирование может учитывать самые разные нештатные ситуации, которые удастся предсказать, анализируя огромный поток данных, поступающих из тысяч различных источников, включая ручной ввод информации от поставщиков, данные с датчиков, которые встроены в детали и автоматически создают записи в базы данных. Все эти данные собираются в единую систему, обрабатываются, анализируются в режиме реального времени и позволяют определить узкие места в работе цепочки поставок, что, в свою очередь, позволяет операторам устранять проблемы, связанные с перебоями. ЦД позволяет Baker Hughes отслеживать нехватку материалов, оптимизировать затраты на складские запасы, сокращать сроки поставки.

Есть примеры внедрения ЦД логистических процессов для предприятия пищевой промышленности, а также в смежных отраслях упаковки пищевых продуктов. В частности, компания DHL Supply Chain, имеющая большой опыт в построении логистических приложений, успешно внедрила интегрированное решение для автоматизации цепочки поставок для склада Tetra Pak¹¹⁴ в Сингапуре. Решение базируется на технологии интернета вещей и модели, основанной на данных, которая отображает состояние хранилища в режиме реального времени и прогнозирует его состояние в будущем, что позволяет круглосуточно координировать операции, оптимизируя производительность и минимизируя угрозы безопасности.

К категории логистических можно отнести проект по созданию ЦД аэропорта [247], выполненный швейцарской компанией SITA¹¹⁵. В этом проекте была построена модель сложного процесса, включающего в себя прием воздушных судов, обслуживание пассажиров, выдачу багажа и т. п. Модель позволяет оптимизировать такие параметры, как время ожидания в очереди, задержки при посадке, минимизировать операции выдачи багажа, а также оценивать степень удовлетворенности пассажиров. ЦД направлен на обеспечение более качественного принятия решений на основе целостного представления о работе аэропорта. Система позволяет демонстрировать работу аэропорта в текущий момент времени, а также «проигрывать» и анализировать то, что произошло в прошлом, фиксировать сбои и определять их причины. Используя информацию о рейсах, погодных условиях и другую оперативную информацию, ЦД позволяет предсказать узкие места и нестандартные ситуации, например, оперативно предупредит о необходимости выделить дополнительные ресурсы и принять необходимые меры при задержке рейса, когда несколько самолетов могут приземлиться одновременно (что замедлит высадку пассажиров и обработку багажа, как минимум, или повлечет повышенную вероятность столкновения при заходе на посадку, рулении, буксировке, а также необходимость ухода на второй круг одного или нескольких бортов, как максимум).

Другой пример горизонтально-ориентированных решений – это создание ЦД конструкционных материалов. Производительность промышленных продуктов зависит от характеристик конструкцион-

¹¹⁴ Одна из крупнейших в мире компаний по производству решений для переработки и упаковки пищевых продуктов, которая обслуживает сотни миллионов людей в 160 странах.

¹¹⁵ Швейцарская многонациональная информационная организация, предоставляющая телекоммуникационные и ИТ-услуги в авиационной отрасли.

ных материалов, из которых они изготавливаются. ЦД материалов могут быть востребованы в самых разных промышленных и научных организациях. Прочные, легкие материалы помогают уменьшить расход топлива в автомобилях, поездах и самолетах, позволяют реализовать новые решения и снизить стоимость изделия. Испытания материалов требуют специально подготовленных образцов, что затрудняет их проведение, но и здесь многие проблемы удастся решить с помощью технологии цифровых двойников. Например, немецкая компания Math2Market разработала программное обеспечение для моделирования различных свойств композиционных материалов и создания цифровых двойников гранулированных материалов. Аналогичный продукт (Granta Design) имеется у компании ANSYS.

Свойства гранулированных или спеченных (искусственных и природных) материалов зависят от их микроструктуры. А микроструктура часто зависит от правильной идентификации отдельных зерен и пор. Их прямая идентификация на трехмерных цифровых изображениях является достаточно сложной, но перспективной задачей, она открывает возможность для моделирования поведения материала, которое зависит от ориентации зерна. Программное обеспечение компании GeoDict моделирует структурно сложные материалы, используя методы обработки изображений с использованием искусственного интеллекта. GeoDict захватывает данные о внутренней геометрии этих материалов на основе компьютерной томографии, электронной микроскопии и других источников изображений, а затем строит модели, позволяющие проводить различные прочностные расчеты, предоставляя важную информацию для определения наиболее перспективных конструкций из искусственных материалов.

Безусловно, в приведенном обзоре были представлены лишь некоторые отрасли, в которых «работают» цифровые двойники. Спектр применения ЦД растет на наших глазах, – они все больше востребованы в самых разных проектах.

Будущее цифровых двойников

Цифровые двойники базируются на целом ряде эволюционирующих технологий, поэтому их развитие напрямую зависит от роста возможностей этих технологий.

Расширение применения ЦД в новых отраслях и приложениях идет вслед за развитием математических моделей, которые совершенствуются в описании физических процессов, а также в отражении сложных экономических и социальных явлений.

Большую роль в новых возможностях ЦД играет рост доступных вычислительных ресурсов для математического моделирования. Сегодня многие задачи, основанные на численном моделировании при необходимой точности и доступных вычислительных ресурсах, требуют весьма длительного расчетного времени. К таковым, в частности, относятся задачи многопараметрической оптимизации при проектировании современных промышленных объектов, отмеченные в этой книге. В большинстве случаев решение подобных задач требует времени, намного превышающего приемлемое для управления технологическими процессами.

Целый ряд специалистов прогнозируют качественный скачок быстройдействия аппаратных систем в ближайшее десятилетие с переходом к квантовым вычислениям, что позволит выполнять численный анализ на основе тех же (и более сложных) моделей за время, приемлемое для оперативного взаимодействия физического объекта и его цифровой копии.

Уже сегодня компании [248] работают над разработкой и использованием квантовых алгоритмов для моделирования сложных физических процессов. К этим проектам можно отнести моделирование воздушного потока при обтекании крыла самолета, турбулентного течения жидкости в задачах гидромониторинга, молекулярного взаимодействия в приложениях для медицины и биологии. Эти работы позволяют надеяться, что в ближайшие несколько лет появятся цифровые двойники, основанные на кардинально более быстрых расчетах, а скорость обработки численных моделей достигнет такой величины, что ЦД смогут прогнозировать развитие многих быстропротекающих технологических процессов, что на сегодняшний день не представляется возможным.

Вырастет не только быстроедействие вычислительных систем, на которые опираются ЦД, появится возможность увеличения скорости передачи сигналов между физическим и цифровым двойником, и качественный скачок здесь следует ожидать с переходом к технологии 5G, которая обладает более высокой пропускной способностью, меньшим временем задержки, меньшим расходом энергии батарей IoT-датчиков.

Применение сетей уровня 5G позволит создать полноценные сервисы виртуальной реальности в составе цифровых двойников, что, в свою очередь, сделает доступной виртуальную верификацию и валидацию изделий.

Услуги на базе 5G с минимальными задержками станут еще более эффективными в сочетании с Edge-архитектурой, при которой вычислительные ресурсы перемещаются ближе к клиенту, на границу сетевой инфраструктуры. Подобные решения позволят применять цифровые двойники для управления беспилотными объектами в режиме реального времени.

Новые возможности искусственного интеллекта позволят создавать ЦД, в которых роль человека в принятии управленческих решений будет все больше минимизироваться. ЦД будут способны принимать решения автономно, координировать действия с другими ЦД, выполнять самодиагностику, самостоятельно устранять неисправности. Системы принятия решения на базе ЦД со временем позволят избавить человека от необходимости присутствия в опасных и агрессивных зонах. Появятся промышленные пилотируемые объекты, где многие процессы будут контролироваться цифровыми двойниками автономно, – платформы в области добычи полезных ископаемых, энергетике, в сельском хозяйстве.

Процесс объединения цифровых двойников продолжится на разных уровнях. Получит воплощение концепция национальных цифровых двойников, когда из отдельных ЦД будут формироваться различного рода сети, сообща аккумулирующие знания для решения тех или иных задач. Вслед за национальными решениями появятся глобальные.

Будучи встроенными в высокоответственные изделия (такие как, например, атомные станции), «умные» ЦД будут иметь высокую уязвимость и потребуют разработки интеллектуальных средств самозащиты, направленных на нейтрализацию злонамеренных действий при внешних атаках и несанкционированном доступе, а также защиты от неправильного или несанкционированного использования. В случае массированных атак «умные» цифровые двойники будут принимать автоматизированные ответные действия, используя сведения об окружающей среде.

«Умные» ЦД смогут собирать исторические данные и формировать прогнозы в реальном времени. Они сами будут находить под-

ходящие источники, использовать различные методы сбора и обработки данных, структурировать их, обогащать и преобразовывать в полезную информацию, а также выбирать подходящие методы интеллектуального анализа и прогнозирования.

Двойники, имеющие общие задачи, смогут предоставлять услуги друг другу и объединяться в так называемые «цифровые рои» («digital swarms»), находить и идентифицировать подобные сообщества (рои), присоединяться к ним и выполнять сложные коллективные задачи. Данные задачи, например, по управлению роем дронов или роботов в сквозной цифровой технологии (СЦТ), реализованной в компонентах робототехники и сенсорике, являются частью дорожной карты развития «сквозной» цифровой технологии «Нейротехнологии и искусственный интеллект» в рамках нацпроекта «Цифровая экономика» в России. ИИ выделен в отдельный федеральный проект.

Со временем с любым продуктом (изделием, объектом) будет ассоциирован цифровой двойник, имеющий информацию, достаточную для его воспроизведения, а также информацию, позволяющую оптимально эксплуатировать его на всех этапах жизненного цикла.

По мере развития аддитивных технологий многие изделия (чтобы не занимать лишнее место и сократить транспортные расходы) будут создаваться по требованию (на основе соответствующей цифровой модели), подобно тому, как сегодня можно по требованию получить вычислительные мощности.

Таким образом, сформируется своего рода параллельный цифровой мир, «населенный» цифровыми двойниками неживых объектов и живых существ. Взаимодействие этих цифровых объектов в виртуальном пространстве, испытание последних в разных штатных и нештатных ситуациях будут направлены на предотвращение возможных аварий в реальном мире реальных материальных объектов.

Говоря о проектировании новых объектов, отметим, что в цифровом мире можно создать целый спектр прототипов будущего материального объекта с разными характеристиками. При проектировании изделия могут появиться десятки вариантов двойников в разных ценовых категориях, рассчитанных на разные технологические возможности, в том числе и на те, которые на сегодняшний день не могут быть реализованы, например, на конструкционные материалы, которые существуют только в виде цифровых прототипов. Большая часть

таких цифровых решений будет ждать своего часа, когда сможет воплотиться в тот или иной материал.

Цифровые двойники, которые еще не получили своего физического воплощения по экономическим соображениям, будут ждать момента, когда рыночная модель покажет, что час обретения таким двойником своей материальной сущности настал, и только тогда материальный объект будет создан.

В начале книги, давая определение ЦД, авторы отметили, что цифровая копия не отбрасывается после того, как задуманный в цифре объект получает свое материальное воплощение, а «живет» с этим объектом в тесном контакте на протяжении всего его жизненного цикла. Но и после того как физическая жизнь объекта заканчивается, цифровой двойник тоже не должен отбрасываться, так как он аккумулирует в себе жизненный опыт (накопленный его физическим двойником за период своего материального воплощения), который можно будет реализовывать в следующих поколениях цифровых двойников.

В будущем люди также получают цифровые двойники, которые будут собирать информацию о хозяевах и предлагать индивидуализированное, эффективное лечение, а накопленный опыт передавать следующим поколениям.

В последнее время появилось достаточно много страхов в отношении цифровизации в разных ее проявлениях. Люди опасаются, что новые цифровые технологии несут в себе угрозу вытеснения человека из привычного для него мира, где тот выполняет отработанный набор производственных и социальных функций.

Однако авторы книги разделяют оптимистическую точку зрения, согласно которой человечество поступательно развивается как в технологическом, так и в социальном плане. Следуя этой логике, можно надеяться, что цифровые технологии (и технологии ЦД в частности) являются новым эффективным инструментом, который, как любая новая, еще не апробированная технология, таит в себе ряд определенных угроз, которые могут быть изучены и преодолены ради достижения прогресса человечества. Заметим, что угрозы исходят от большинства революционных технологий. Ко многим человечество уже привыкло и не мыслит без них своего существования, несмотря на то, что они несут в себе некую долю опасности (те же самолеты, например, или автомобили). Людям нужен определенный период времени,

чтобы они осознали не только все преимущества новации, но и ее угрозы, и выработали правила (в том числе и прописанные юридически) для того, чтобы эти угрозы нивелировать. Авторы надеются, что человечеству хватит интеллекта и доброй воли, чтобы обратить во благо те удивительные возможности, которые несут в себе цифровые технологии и цифровой двойник как их воплощение.

Так что не нужно бояться нового. По мнению авторов, куда опаснее стать аутсайдерами. Упустить время, упустить момент создания прорывных разработок в области цифровых двойников, которые уже сегодня создают стратегические преимущества на рынке.

Позитивный опыт работы с цифровыми технологиями у России уже есть, о части этого опыта было рассказано в настоящей книге.

Есть передовые предприятия, создающие конкурентоспособную и востребованную во всем мире продукцию. Есть талантливые инженеры, исследователи и организаторы производства. Полученный опыт нужно развивать всеми силами, чтобы не отстать от постоянно набирающего скорость цифрового прогресса.

Приложение

Необходимые ключевые компоненты цифрового двойника в концепции Центра НТИ СПбПУ.

Цифровой двойник – это технология, процесс проектирования, в основе которого лежит разработка и применение семейства сложных мультидисциплинарных математических моделей, описываемых 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных с высоким уровнем адекватности:

- поведению в различных условиях эксплуатации реальных материалов, объектов/систем/машин/конструкций/...
- разнообразным технологическим процессам, с помощью которых создаются реальные материалы и реальные объекты/изделия/продукты/...

Также цифровой двойник – это технология (процесс) создания глобально конкурентоспособной продукции, интегрирующая следующие необходимые ключевые компоненты:

1. **best-in-class («лучшие в классе») технологии мирового уровня**, из которых путем комплексирования формируется цепочка создания глобально конкурентоспособной продукции;
2. **системный инжиниринг на основе моделей (Model-Based Systems Engineering, MBSE)**, который предназначен для системного проектирования сложных объектов, причем объекты рассматриваются как системы (технические системы, киберфизические системы и т. д.), состоящие из подсистем и большого количества взаимодействующих между собой компонентов, и эти системы рассматриваются на протяжении всего жизненного цикла;
3. **многоуровневая матрица M_{DT} требований/целевых показателей и ресурсных** (временных, финансовых, технологических, производственных, экологических и т. д.) **ограничений** – ключевой элемент технологии разработки цифрового двойника.

Матрица целевых показателей M_{DT} должна обеспечивать возможность не только отслеживать взаимное влияние компонентов или нарушение тех или иных ограничений, но и позволять в кратчайшие сроки вносить необходимые изменения и уточнения – осуществлять оперативное «управление требованиями и изменениями» в процессе реализации проекта; кроме того, матрица M_{DT} должна позволять

обосновывать смягчение первоначально чрезмерно жестких требований, заложенных на основе «линейной экстраполяции» опыта решения задач предыдущего поколения.

По мере каскадирования и декомпозиции требований/целевых показателей и ограничений происходит наполнение и последовательное формирование матрицы целевых показателей:

$$\{M_{DT}: M_{DT}^{(0)}, M_{DT}^{(1)}, \dots, M_{DT}^{(NM)}\},$$

как правило, «сверху-вниз», в соответствии с концепцией «нисходящего проектирования».

Последующая итерационная рациональная «балансировка» основана на повышении адекватности описания объекта/системы/машины/конструкции/... на разных этапах жизненного цикла семейством взаимоувязанных мультидисциплинарных математических моделей:

$$\{MM: MM^{(1)}, MM^{(2)}, \dots, MM^{(NMM)}\}.$$

В результате, после проведения физических/натурных/... испытаний и достижения высокого уровня соответствия данным испытаний, мы получаем матрицу $M_{DT}^{(*)}$, которая соответствует цифровому двойнику объекта/системы/машины/конструкции/... и для которой характерны балансировка конфликтующих целевых показателей и удовлетворение ресурсным ограничениям.

Для разработки полноценного цифрового двойника на основе семейства мультидисциплинарных математических моделей высокого уровня адекватности принципиально важным и обязательным является этап валидации (Validation) – процесс определения степени соответствия (уровня адекватности) математических/численных/компьютерных/... моделей реальным объектам/системам/машинам/конструкциям/... и реальным физико-механическим/технологическим/... процессам на основе достоверных данных физических/натурных испытаний;

4. «Виртуальные испытания» & «Виртуальные стенды» & «Виртуальные полигоны»

В процессе разработки полномасштабного цифрового двойника сложных объектов/систем/машин/конструкций/... необходимо выполнить, как правило, десятки тысяч виртуальных испытаний («вычислительных экспериментов») материалов, узлов, компонентов, подсистем и систем, причем количество виртуальных испытаний примерно соответствует количеству требований/целевых показателей и ограничений, представленных в матрице $M_{DT}^{(NM)}$.

Для проведения виртуальных испытаний:

$$\{\mathbf{ВИ: ВИ}^{(1)}, \mathbf{ВИ}^{(2)}, \dots, \mathbf{ВИ}^{(N_{\text{ВИ}})}\},$$

и получения достоверных результатов необходимы разработка и применение высокоадекватных виртуальных аналогов всего применяемого испытательного оборудования, испытательных стендов и полигонов, которые применяются при проведении физических и натурных испытаний:

семейства виртуальных испытательных стендов:

$$\{\mathbf{ВИС: ВИС}^{(1)}, \mathbf{ВИС}^{(2)}, \dots, \mathbf{ВИС}^{(N_{\text{ВИС}})}\},$$

и виртуальных испытательных полигонов:

$$\{\mathbf{ВИП: ВИП}^{(1)}, \mathbf{ВИП}^{(2)}, \dots, \mathbf{ВИП}^{(N_{\text{ВИП}})}\}.$$

Полученное в результате применения всех вышеперечисленных подходов, методов и технологий семейство высокоадекватных мультидисциплинарных математических моделей:

$$\{\mathbf{ММ: ММ}^{(1)}, \mathbf{ММ}^{(2)}, \dots, \mathbf{ММ}^{(N_{\text{ММ}})}\},$$

позволяет обеспечить отличие между результатами виртуальных испытаний и физических/натурных испытаний в пределах $\pm 5\%$ или меньше.

Таким образом, **цифровой двойник объекта/продукта/изделия/системы/машины/конструкции/...** (**Digital Twin, DT-1**) содержит следующие компоненты:

- DT-1.1. Семейство best-in-class технологий мирового уровня:

$$T_i^{WL} \quad i = 1, n;$$

- DT-1.2. Семейство матриц целевых показателей/требований и ресурсных ограничений:

$$\{\mathbf{M}_{\text{DT}}: \mathbf{M}_{\text{DT}}^{(0)}, \mathbf{M}_{\text{DT}}^{(1)}, \dots, \mathbf{M}_{\text{DT}}^{(N_{\text{М}})}\};$$

- DT-1.3. Семейство взаимоувязанных высокоадекватных валидированных мультидисциплинарных математических моделей:

$$\{\mathbf{ММ: ММ}^{(1)}, \mathbf{ММ}^{(2)}, \dots, \mathbf{ММ}^{(N_{\text{ММ}})}\};$$

- DT-1.4. Множество виртуальных испытаний:

$$\{\mathbf{ВИ: ВИ}^{(1)}, \mathbf{ВИ}^{(2)}, \dots, \mathbf{ВИ}^{(N_{\text{ВИ}})}\};$$

- DT-1.5. Множество виртуальных стендов:

$$\{\mathbf{ВИС: ВИС}^{(1)}, \mathbf{ВИС}^{(2)}, \dots, \mathbf{ВИС}^{(N_{\text{ВИС}})}\};$$

- DT-1.6. Множество виртуальных полигонов:

$$\{\mathbf{ВИП: ВИП}^{(1)}, \mathbf{ВИП}^{(2)}, \dots, \mathbf{ВИП}^{(N_{\text{ВИП}})}\}.$$

Все эти компоненты участвуют в процессе разработки цифрового двойника и **необходимы для обеспечения:**

- **рационального выбора весовых коэффициентов α_i** , определяющих вклад i -ой best-in-class технологии мирового уровня – T_i^{WL} , в разработку цифрового двойника объекта/продукта/изделия/системы/машины/конструкции/...,
- балансировки (глобальной – для всей системы, и локальной – для подсистем, компонентов, деталей...) конфликтующих между собой требований/целевых показателей и ресурсных ограничений, то есть для получения **сбалансированной матрицы требований/целевых показателей и ресурсных ограничений $M_{DT}^{(*)}$** .

Именно такое комплексное определение позволяет говорить о **новой парадигме проектирования**, которая делает **процесс проектирования полностью прозрачным, принятие решений – обоснованным** (например, на основе сотен/тысяч/десятков тысяч виртуальных испытаний) и **полностью задокументированным**, при этом значительно снижая многочисленные и разнообразные коммуникационные и трансакционные издержки.

Более того, новый процесс проектирования, как правило, одновременно происходит по нескольким, в некоторых случаях – по десяткам траекторий проектирования, причем:

- процесс проектирования по нескольким траекториям происходит **без увеличения длительности и стоимости выполнения проекта;**
- из всего множества траекторий в результате проектирования несколько траекторий приводят к результатам, которые все удовлетворяют требованиям технического задания, что позволяет в дальнейшем серьезно задуматься об изменении/усовершенствовании бизнес-модели, выводя на рынок, в зависимости от текущей конъюнктуры рынка, необходимое решение.

Во многих случаях большой вклад в повышение уровня адекватности математических моделей вносит учет данных о технологических процессах изготовления деталей/узлов/компонентов/...

Соответственно, семейство высокоадекватных мультидисциплинарных математических моделей технологических процессов, применяемых для изготовления продукции:

$$\{MM_T: MM_T^{(1)}, MM_T^{(2)}, \dots, MM_T^{(N_{MM-T})}\},$$

а также сопутствующих виртуальных испытаний:

$$\{VI_T: VI_T^{(1)}, VI_T^{(2)}, \dots, VI_T^{(N_{VI-T})}\},$$

виртуальных стендов:

$\{\text{ВИС}_T: \text{ВИС}_T^{(1)}, \text{ВИС}_T^{(2)}, \dots, \text{ВИС}_T^{(\text{Nвис-т})}\},$

виртуальных полигонов:

$\{\text{ВИП}_T: \text{ВИП}_T^{(1)}, \text{ВИП}_T^{(2)}, \dots, \text{ВИП}_T^{(\text{Nвип-т})}\},$

Центр НТИ СПбПУ называет **цифровым двойником технологических процессов (Digital Twin, DT-2)**.

Комплексирование цифрового двойника объекта/системы/машины/конструкции/... (**DT-1**) и цифрового двойника технологических процессов (**DT-2**) в рамках единой полномасштабной цифровой модели позволяет сформировать **«умный» цифровой двойник 1-го уровня (Smart Digital Twin, SDT⁽¹⁾)**, который «знает» и «помнит», как его «изготавливали» и в какой последовательности его «собирали».

Применение **SDT⁽¹⁾** позволяет организовать процесс «цифровой сертификации» – специализированный бизнес-процесс, основанный на тысячах/десятках тысяч виртуальных испытаний как отдельных компонентов, так и всей системы в целом, **целью которого является прохождение с первого раза всего комплекса натуральных, сертификационных, рейтинговых и прочих испытаний.**

DT-1 и в еще большей степени **SDT** дают четкое представление о расположении критических зон в конструкции, в которых имеет смысл размещать те или иные датчики (акселерометры, тензометры, датчики температуры, давления и т. д.), и позволяют сформировать «умные» большие данные (Smart Big Data) и «умную» цифровую тень (Smart Digital Shadow, **SDS**) в отличие от Big Data и цифровой тени (Digital Shadow, **DS**), которая, как правило, формируется по цепочке: датчики → промышленный интернет (IIoT) → Big Data.

Это принципиально важные достоинства полномасштабных «умных» цифровых двойников и «умных» цифровых теней, которые позволяют:

- радикально сократить число требуемых датчиков и получаемый объем больших данных (поточковых данных),
- значительно сократить или полностью исключить «мусорные данные», формируя «содержательные данные», а также
- увеличить скорость обработки данных и внесения необходимых изменений в **SDT⁽¹⁾** для его трансформации в «умный» цифровой двойник второго уровня **SDT⁽²⁾**.

В дальнейшем, по мере эксплуатации объекта/системы/машины/конструкции ... происходит постоянное «обучение» цифрового двойника:

- как в соответствии с изменениями, происходящими на протяжении жизненного цикла реального объекта (например, «умный» цифровой двойник объекта/конструкции/.../сооружения ... «становится в процессе эксплуатации еще умнее», если он учитывает особенности произведенных ремонтов, которые, безусловно, изменяют остаточный ресурс объекта/конструкции/.../сооружения ...),
- так и по результатам математического моделирования (виртуальных испытаний) ситуаций, в которых реальный объект не эксплуатировался или испытания провести невозможно, в первую очередь, в соответствии с соображениями безопасности или чрезмерной дороговизны [249].

Используемые источники

1. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/268478543_The_digital_twin_paradigm_for_future_NASA_and_US_air_force_vehicles (Accessed: 28.05.2020).
2. The New Age of Manufacturing: Digital Twin Technology & IoT [Electronic resource]. – Available at: <https://www.seebo.com/digital-twin-technology/> (Accessed: 28.05.2020).
3. The_intelligent_product_driven_supply_chain Conference Paper, November 2002 [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/3996498_The_intelligent_product_driven_supply_chain (Accessed: 28.05.2020).
4. K. Hribernik, T. Wuest, K.D. Thoben Towards product avatars representing Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on, 2 (3), (2005), pp.
5. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems [Electronic resource]. – Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (Accessed: 28.05.2020).
6. Modern manufacturing's triple play: Digitaltwins, analytics and the internet of things [Electronic resource]. – Available at: <https://expectexceptional.economist.com/digital-twins-analytics-internet-of-things.html> (Accessed: 28.05.2020).
7. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. Conference Paper · April 2012 Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/268478543_The_digital_twin_paradigm_for_future_NASA_and_US_air_force_vehicles (Accessed: 28.05.2020).

8. Dan Miklovic. Let's Be Clear Which Digital Twin We Are Talking About [Electronic resource]. – Available at: <https://blog.insresearch.com/lets-be-clear-which-digital-twin-we-are-talking-about> (Accessed: 28.05.2020).
9. The Gemini Principles Digital twins of physical assets are helping organisations to make better-informed decisions, leading to improved outcomes [Electronic resource]. – Available at: <https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/TheGeminiPrinciples.pdf> (Accessed: 28.05.2020).
10. Цифровые двойники в ритейле – кто это такие и почему с ними срочно нужно знакомиться? [Электронный ресурс]. – Доступно: https://new-retail.ru/tehnologii/tsifrovye_dvoyniki_v_riteyle_kto_eto_takie_i_pochemu_s_nimi_srochno_nuzhno_znakomitsya5533/ (Дата обращения: 28.05.2020).
11. Centre for Digital Built Britain [Electronic resource]. – Available at: <https://www.cdbb.cam.ac.uk/what-we-do/national-digital-twin-programme>
12. George Malim. How can the telecoms industry successfully adopt digital twins? [Electronic resource]. – Available at: <https://www.vanillaplus.com/2018/05/21/38426-can-telecoms-industry-successfully-adopt-digital-twins> (Accessed: 28.05.2020).
13. Цифровой Двойник как пример ЦТ [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://docs.google.com/document/d/1iMEECTeTI0gSOIm8ZgjKZ1GuNid-EHhGIMp-s7SulkU/edit?fbclid=IwAR1DgyJT9JwFUEd4KJjZov1pxiKHjzG1xFb0r4wHT0EkYYI6Y9ByIrt9Vgo#heading=h.2tl5if2mydm6> (Дата обращения: 28.05.2020).
14. 4The Evolution of Digital Twins for Asset Operators [Electronic resource]. – Available at: <https://www.elementanalytics.com/blog/digital-twin-blog-part-2> (Accessed: 28.05.2020).

15. The session of Azure Digital Twins at Microsoft Ignite 2018 – Smart spaces powered by cloud AI and IoT – THR1104 [Electronic resource]. – Available at: <https://twitter.com/yoshihirok/status/1051034082858037248> (Accessed: 28.05.2020).
16. «15 ключевых компонентов современного производства» (Сайт Nano news net) [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.nanonewsnet.ru/articles/2017/15-klyuchevykh-komponentov-sovremennogo-proizvodstva> (Дата обращения: 28.05.2020).
17. David Immerman. The Evolution of Digital Twin – and How Emerging Tech Is Driving Adoption [Electronic resource]. – Available at: www.ptc.com/en/product-lifecycle-report/digital-twin-technologies-driving-adoption?utm_source=twitter_free&utm_medium=social_corp&utm_campaign=blog_DTadoption (Accessed: 28.05.2020).
18. The history of PLM, from configuration management to cloud-based connectivity and the IoT [Electronic resource]. – Available at: <https://www.designnews.com/design-hardware-software/brief-history-plm> (Accessed: 28.05.2020).
19. Jonas Landahl, Massimo Panarotto, Hans Johannesson, Ola Isaksson, Johan Löf. Towards Adopting Digital Twins to Support Design Reuse during Platform Concept Development (Chalmers University of Technology) [Electronic resource]. – Available at: <https://research.chalmers.se/en/publication/508020> (Accessed: 28.05.2020).
20. Next Generation Software: How Simulation Process Modeling Enables Integrated Simulations of Complex Products [Electronic resource]. – Available at: <https://mvoid-group.com/next-generation-software-how-simulation-process-modeling-enables-integrated-simulations-of-complex-products/> (Accessed: 28.05.2020).
21. Helium bubble nucleation in bcc iron studied by kinetic Monte Carlo simulations [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.google.com/imgres?imgurl=https://ars.els->

- cdn.com/content/image/1-s2.0-S0022311506005976-gr1.jpg&imgrefurl=https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311506005976&tbid=Q_i5T0MktfINYM&vet=1&docid=OgCchHQ0ZDPOm9M&w=534&h=405&itg=1&q=modelling+and+simulation&hl=ru-RU&source=sh/x/im (Дата обращения: 28.05.2020).
22. UK team to develop rapid virtual testing technique for manufactured components [Electronic resource]. – Available at: <https://www.theengineer.co.uk/virtual-testing-technique/> (Accessed: 28.05.2020).
 23. Ключевые инструменты и форматы развития цифровой экономики: «умные» цифровые двойники и Центр НТИ СПбПУ [Электронный ресурс]. — Доступно: <https://nticenter.spbstu.ru/news/6722> (Дата обращения: 28.05.2020).
 24. 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.
 25. CompMechLab: Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения [Электронный ресурс]. — Доступно: <https://nangs.org/news/members/compmechlab-novaya-paradigma-tsifrovogo-proektirovaniya-i-modelirovaniya-globalno-konkurentosposobnoj-produktsii-novogo-pokoleniya> (Дата обращения: 28.05.2020).
 26. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» Цифровая подстанция. – 2019. – № 12. – С. 20–25. [Электронный ресурс]. Доступно: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/09/cifrovye_dvyinii.pdf (Дата обращения: 28.05.2020).

27. «7 Downtime Statistics That You Should Find Terrifying» [Electronic resource]. – Available at: <https://www.garvey.com/7-downtime-statistics-find-terrifying/#:~:text=In%20the%20auto%20industry%2C%20downtime,equal%20%243%20million%20per%20hour> (Дата обращения: 28.05.2020).
28. Design with Confidence (Commentary) [Electronic resource]. – Available at: <https://www.cimdata.com/de/resources/complimentary-reports-research/commentaries/item/3345-design-with-confidence-commentary/3345-design-with-confidence-commentary> (Accessed: 28.05.2020).
29. Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm, Blaž RODIČ [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/319249287_Industry_40_and_the_New_Simulation_Modelling_Paradigm (Accessed: 28.05.2020).
30. Алексей Чехович. Топологическая оптимизация геометрии изделия как путь повышения прибыльности предприятия [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://blog.iqb.ru/geometry-topology-optimization> (Accessed: 28.05.2020).
31. Перепроектирование кронштейна рефлектора на основе топологической оптимизации с применением ИСКПИ [Электронный ресурс]. — Доступно: <http://fea.ru/project/199> (Дата обращения: 28.05.2020).
32. Инженеры РФ и США будут вместе искать оптимальное применение современных технологий [Электронный ресурс]. — Доступно: <https://tass.ru/obrazovanie/3829154> (Дата обращения: 28.05.2020).
33. T. Mukherjee, T. DebRoy. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components, [Electronic resource]. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352940718304931?via%3Dihub> (Accessed: 28.05.2020).

34. Offshore Code Comparison Collaboration Continuation (OC4), Phase I – Results of Coupled Simulations of an Offshore Wind Turbine with Jacket Support Structure Preprint February 2014 Wojciech Popko, Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems IWES [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/266594578_Offshore_Code_Comparison_Collaboration_Continuation_OC4_Phase_I_-_Results_of_Coupled_Simulations_of_an_Offshore_Wind_Turbine_with_Jacket_Support_Structure_Preprint (Accessed: 28.05.2020).
35. Elizabeth Dukes. The Cost of IoT Sensors Is Dropping Fast, 11 September 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.iofficecorp.com/blog/cost-of-iot-sensors#CurRqfCiU93DhRD1.99> (Accessed: 28.05.2020).
36. What are the roles of sensors in an IoT network? By John Koon, August 2, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.microcontrollertips.com/what-is-the-role-of-sensors-in-an-iot-network-part-1/> (Accessed: 28.05.2020).
37. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://fea.ru/news/6721> (Дата обращения: 28.05.2020).
38. Stein Ove Erikstad «Merging Physics, Big Data Analytics and Simulation for the Next-Generation Digital Twins», September 2017 [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/320196420_Merging_Physics_Big_Data_Analytics_and_Simulation_for_the_Next-Generation_Digital_Twins (Accessed: 28.05.2020).
39. Digital Twins: a European perspective [Electronic resource]. – Available at: <https://docplayer.net/153190669-Digital-twins-a-european-perspective.html> (Accessed: 28.05.2020).
40. European service network of mathematics for industry and innovation [Electronic resource]. – Available at: <https://www.>

- eu-maths-in.eu/EUMATHSIN/wp-content/uploads/2018/05/MSO-vision.pdf (Accessed: 28.05.2020).
41. The Evolution of Digital Twins for Asset Operators. Part 2 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.elementanalytics.com/blog/digital-twin-blog-part-2> (Accessed: 28.05.2020).
 42. Digital Shadows in the Internet of Production [Electronic resource]. – Available at: <https://ercim-news.ercim.eu/en115/special/2104-digital-shadows-in-the-internet-of-production> (Accessed: 28.05.2020).
 43. Kim Branner. Reliablade project: Increased Reliability of Rotor Blades [Electronic resource]. – Available at: https://www.dtu.dk/english/news/nyhed?id={B12EFDAB-0AE1-432E-8710-EDB72100DF5E}&fbclid=IwAR3imiSwtR3E6VA2MMVe394j3P0YKg3UdOb1YBf6X_YiCOL-QuEsdUHpGBY (Accessed: 28.05.2020).
 44. Digital Twin [Electronic resource]. – Available at: <https://www.wipro.com/process-and-industrial-manufacturing/digital-twin/> (Accessed: 28.05.2020).
 45. Cyber Physical Systems: Design Challenges [Electronic resource]. – Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4519604> (Accessed: 28.05.2020).
 46. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing Fei Tao, Meng Zhang, Published in IEEE Access, 2017 [Electronic resource]. – Available at <https://www.semanticscholar.org/paper/Digital-Twin-Shop-Floor%3A-A-New-Shop-Floor-Paradigm-Tao-Zhang/8b77cd55a39c4c8c87f8a6a6572078e247630829> (Accessed: 28.05.2020).
 47. Digital twin-driven product design framework, International Journal of Production Research, Fei Tao, February 2018 [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/323397001_Digital_twin-driven_product_design_framework (Accessed: 28.05.2020).

48. 5 Examples of Edge Computing Solutions in Use Today February 2, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.lanner-america.com/blog/5-examples-edge-computing-solutions-use-today/> (Accessed: 28.05.2020).
49. Improving edge computing using the power of digital twin technology [Electronic resource]. – Available at: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-edge-computing/> (Accessed: 28.05.2020).
50. 8 virtual reality milestones that took it from sci-fi to your living room by Luke Dormehl November 13, 2017 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/history-of-virtual-reality/> (Accessed: 28.05.2020).
51. Minds + Machines: Meet A Digital Twin (2016) [Electronic resource]. – Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=2dCz3oL2rTw> (Accessed: 28.05.2020).
52. Rich Rabbitz, Chris Crouch. Combining VR, AR, Simulation and the IoT to Create a Digital Twin [Electronic resource]. – Available at: <http://on-demand.gputechconf.com/gtc/2018/presentation/s8879-combining-vr-ar-simulation-and-the-iot-to-create-a-digital-twin.pdf> (Accessed: 28.05.2020).
53. Fraunhofer VisIT (Industrial IoT – Digital Twin) [Electronic resource]. – Available at: https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/81711/visIT_1_Industrial%20IoT_web.pdf?command=downloadContent&filename=visIT_1_Industrial%20IoT_web.pdf (Accessed: 28.05.2020).
54. Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges [Electronic resource]. – Available at: <https://www.nap.edu/read/4761/chapter/12#248> (Accessed: 28.05.2020).
55. Digital twin machine learning differentiator in oil and gas IIoT [Electronic resource]. – Available at: <https://www.geoilandgas.com/software-solutions/industrial-internet/digital-twin-machine-learning-differentiator-oil-and-gas-iiot>

56. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. Authors: Fei Tao (School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, China), Meng Zhang (School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, China), A.Y.C. Nee (Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore), Singapore, 2019.
57. Мирошниченко Е. А. Системная инженерия как методологическая основа современного инженерного образования. Презентация [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://www.myshared.ru/slide/615772/> (Дата обращения: 28.05.2020).
58. Dr. Xinguo Zhang. Co-Evolution of Aeronautical Complex, Systems & Complex Systems Engineering (Aviation Industry Corporation of China (AVIC), August 2015) [Electronic resource]. – Available at: <https://icas.org/media/pdf/Workshops/2015/ICAS%202015%20Workshop%20Zhang.pdf> (Accessed: 28.05.2020).
59. Perspectives on Managing Emergent Risk due to Rising Complexity in Aerospace Systems [Electronic resource]. – Available at: <https://www.researchgate.net/publication/338488672> (Accessed: 28.05.2020).
60. Системная инженерия. Ссылки и документы [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://mellarius.ru/systems-engineering> (Дата обращения: 28.05.2020).
61. Report From Icas Workshop On Complex Systems Integration In Aeronautics, Susan X. Ying, Commercial Aircraft Corporation of China [Electronic resource]. – Available at: <https://www.mitre.org/publications/systems-engineering-guide/systems-engineering-guide/the-evolution-of-systems> (Accessed: 28.05.2020).
62. A historical perspective of MBSE with a view to the future. Article, June 2011, Norwegian University of Science and Technology [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/285405862_461_A_historical_perspective_of_MBSE_with_a_view_to_the_future (Accessed: 28.05.2020).

63. Systems Engineering: A Systemic and Systematic Methodology for Solving Complex Problems, Joseph Eli Kasser, CRC Press, 18 сентября 2019 г. [Электронный ресурс]. – Доступно: https://books.google.ru/books?id=TZWwDwAAQBAJ&dq=Friedenthal,+Griego+and+Sampson+2007&hl=ru&source=gbs_navlinks_s (Дата обращения: 28.05.2020).
64. Report from ICAS workshop on complex systems integration in aeronautics by Susan X. Ying [Electronic resource]. – Available at: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2016/data/papers/2016_0732_paper.pdf (Accessed: 28.05.2020).
65. Connecting SysML with PLM/ALM, CAD, Simulation, Requirements, and Project Management Tools [Electronic resource]. – Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=aHr5wVRXvMc> (Accessed: 28.05.2020).
66. MBSE [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://sewiki.ru/MBSE> (Accessed: 28.05.2020).
67. Connecting SysML with PLM/ALM, CAD, Simulation, Requirements, and Project Management Tools [Electronic resource]. – Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=aHr5wVRXvMc> (Accessed: 28.05.2020).
68. Robert Karban, Frank G. Dekens, Sebastian Herzig, Maged Elaasar, Nerijus Jankevičius. Creating system engineering products with executable models in a model-based engineering environment [Electronic resource]. – Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9911/99110B/Creating-system-engineering-products-with-executable-models-in-a-model/10.1117/12.2232785.short> (Accessed: 28.05.2020).
69. Leveraging Digital Twin Technology in Model – Based Systems Engineering [Electronic resource]. – Available at: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7> (Accessed: 28.05.2020).

70. «Co-Evolution of Aeronautical Complex System & Complex System Engineering» by Dr. Xinguo Zhang, Aviation Industry Corporation of China, 31 Aug. 2015 [Electronic resource]. – Available at: <https://icas.org/media/pdf/Workshops/2015/ICAS%202015%20Workshop%20Zhang.pdf> (Accessed: 28.05.2020).
71. Первый Всероссийский форум «Новые производственные технологии»: Экспертно-аналитический доклад о роли цифровых двойников в высокотехнологичной промышленности, 8 октября 2019 г. [Электронный ресурс]. — Доступно: <https://nticenter.spbstu.ru/news/7067> (Дата обращения: 28.05.2020).
72. «Цифровое Производство - методы, экосистемы, технологии». Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО. Ноябрь 2017 года [Электронный ресурс]. – Доступно: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf (Дата обращения: 28.05.2020).
73. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti> (Дата обращения: 28.05.2020).
74. The Digital Transformation of the Product Management Process: Conception of Digital Twin Impacts for the Different Stages [Electronic resource]. – Available at: <http://researchleap.com/digital-transformation-product-management-process-conception-digital-twin-impacts-different-stages/> (Accessed: 28.05.2020).
75. Digital Twin of an Entire Value Chain - New PLM Mantra, Same Technologies? [Electronic resource]. – Available at: <http://beyondplm.com/2017/09/27/digital-twin-entire-value-chain-new-plm-mantra-technologies/> (Accessed: 28.05.2020).

76. Mark Lind. Promise of the Digital Thread, 24 Aug 2017 [Electronic resource]. – Available at: <https://community.aras.com/b/english/posts/promise-of-the-digital-thread> (Accessed: 28.05.2020).
77. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/330749986_Leveraging_Digital_Twin_Technology_in_Model-Based_Systems_Engineering (Accessed: 28.05.2020).
78. How a digital thread makes a better digital twin, 21 октября 2017 г. [Электронный ресурс]. — Доступно: <https://www.youtube.com/watch?v=nvAM2zLjVMQ> (Дата обращения: 28.05.2020).
79. Pieter van Schalkwyk. Digital Twins: The Ultimate Guide [Electronic resource]. – Available at: <https://xmpro.com/digital-twin> (Accessed: 28.05.2020).
80. Pieter van Schalkwyk. Digital Twins: The Ultimate Guide [Electronic resource]. – Available at: <https://xmpro.com/digital-twin> (Accessed: 28.05.2020).
81. Sergii Boichenko. Phenomenological Concept of Chemmotology (National Aviation University, March 2017) [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/315901872_PHENOMENOLOGICAL_CONCEPT_OF_CHEMMOTOLOGY (Accessed: 28.05.2020).
82. Digital twin – a key software component of Industry 4.0 [Electronic resource]. – Available at: <https://new.abb.com/news/detail/11242/digital-twin-a-key-software-component-of-industry-40> (Accessed: 28.05.2020).
83. What is a digital twin? [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (Accessed: 28.05.2020).

84. Global Digital Twin Market Report 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.marketintellica.com/report/MI82755-global-digital-twin-market-report-2019> (Accessed: 28.05.2020).
85. National Digital Twin sounds exciting but we must do the hard stuff [Electronic resource]. – Available at: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/National_Digital_Twin_sounds_exciting_but_we_must_do_the_hard_stuff#What_is_special_about_the_National_Digital_Twin.3F (Accessed: 28.05.2020).
86. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering by Azad M. Madni, Carla C. Madni and Scott D. Lucero [Electronic resource]. – Available at: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7> (Accessed: 28.05.2020).
87. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt) by Dr. Michael Grieves and John Vickers [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept (Accessed: 28.05.2020).
88. The Digital Transformation of the Product Management Process: Conception of Digital Twin Impacts for the Different Stages [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/335444402_The_Digital_Transformation_of_the_Product_Management_Process_Conception_of_Digital_Twin_Impacts_for_the_Different_Stages_1 (Accessed: 28.05.2020)
89. Feasibility of an immersive digital twin: The definition of a digital twin and discussions around the benefit of immersion. A report by the High Value Manufacturing Catapult Visualisation and VR Forum [Electronic resource]. – Available at: https://www.amrc.co.uk/files/document/219/1536919984_HVM_CATAPULT_DIGITAL_TWIN_DL.pdf (Accessed: 28.05.2020).
90. Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, Home & Commercial, Healthcare, Energy

- & Utilities, Oil & Gas) and Geography - Global Forecast to 2025 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (Accessed: 28.05.2020).
91. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (Accessed: 28.05.2020).
92. Azad M. Madni, Carla C. Madni, Scott D. Lucero. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering, January 2019 [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/330749986_Leveraging_Digital_Twin_Technology_in_Model-Based_Systems_Engineering (Accessed: 28.05.2020).
93. The Evolution of Digital Twins for Asset Operators (Part 2) by Sameer Ralwani [Electronic resource]. – Available at: <https://www.elementanalytics.com/blog/digital-twin-blog-part-2> (Accessed: 28.05.2020).
94. Dr. Michael Grieves and John Vickers. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt) [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept (Accessed: 28.05.2020).
95. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения [Электронный ресурс] – Доступно: <http://fea.ru/news/6721> (Дата обращения: 28.05.2020).
96. Joe Perino. Who Will Win the Digital Twin Services Race? [Electronic resource]. – Available at: blog.insresearch.com/who-will-win-digital-twins-services-race (Accessed: 28.05.2020).
97. 5 Industries Using Digital Twins by Sarah Finch 2 may 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://disruptionhub.com/5-industries-using-digital-twins/> (Accessed: 28.05.2020).

98. Feasibility of an immersive digital twin by Moira Petrie 1 October, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://digitop.ac.uk/2018/10/01/feasibility-of-an-immersive-digital-twin> (Accessed: 28.05.2020).
99. Digital Twin for Manufacturing Pragmatic Consideration (Part 11-12) [Electronic resource]. – Available at: <https://blogs.3ds.com/exalead/2019/07/25/digital-twin-for-manufacturing-pragmatic-considerations-part-11-12/> (Accessed: 28.05.2020).
100. The Future of the Digital Twins Industry to 2025 in Manufacturing, Smart Cities, Automotive, Healthcare and Transport [Electronic resource]. – Available at: <https://www.prnewswire.com/news-releases/the-future-of-the-digital-twins-industry-to-2025-in-manufacturing-smart-cities-automotive-healthcare-and-transport-301028858.html> (Accessed: 28.05.2020).
101. По данным отчета Credence Research (Credenseresearch.com), опубликованного в ноябре 2019 г., мировой рынок ЦД составлял 3,76 млрд долл. в 2018 г. и достигнет 57,38 млрд долл. к 2027 г. Более ранние публикации вписываются в данные оценки и уточняют значения рынка на период до 2018 года.
102. «Top 10 Strategic Technology Trends for 2019» by Michael Gartner, November 18, 2018. [Electronic resource] – Available at: <https://datavizblog.com/2018/11/18/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/> (Accessed: 28.05.2020).
103. «Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference, applications and research issues» by Yuqian Lu, Chao Liu, Kevin-I-Kai Wang, Huiyue Huang, Xun Xu. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 61, February, 2020 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584519302480> (Accessed: 28.05.2020).
104. «20 Years Later, Digital Twins are the New ERP» by Dan Miklovic, Industrial Transformation Blog, January 7, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://blog.insresearch.com/digital-twins-are-erp> (Accessed: 28.05.2020).

105. Digital Twin Use Cases in Manufacturing [Electronic resource]. – Available at: <https://blogs.3ds.com/exalead/2019/07/03/digital-twin-use-cases-in-manufacturing-part-5-12/> (Accessed: 28.05.2020).
106. What is the value of a Digital Twin? High Teck Software Cluster [Electronic resource]. – Available at: <https://hightechsoftwarecluster.nl/paper/what-is-a-digital-twin-and-what-value-does-it-deliver/> (Accessed: 28.05.2020).
107. «Is your Digital Twin a Digital Impostor?» by Horst Groesser, May 10, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.accenture.com/us-en/insights/high-tech/digital-impostor> (Accessed: 28.05.2020).
108. Digital Twin Market Size, Share & Trends Analysis Report By End Use (Automotive & Transport, Retail & Consumer Goods, Agriculture), By Region (Europe, North America, Asia Pacific), And Segment Forecasts, 2018 – 2025. Industry Insights, Decembry, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/digital-twin-market> (Accessed: 28.05.2020).
109. Global Digital Twin Market By Application (Manufacturing Process Planning, Product Design & Others), By End User Sector (Manufacturing, Energy & Utilities, Transportation & Others), By Region, Competition, Forecast & Opportunities, 2014 – 2024, May, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.techsciresearch.com/report/global-digital-twin-market/1334.html/> (Accessed: 28.05.2020).
110. Digital Twin Market Size, Share & Trends Analysis Report By End Use (Automotive & Transport, Retail & Consumer Goods, Agriculture), By Region (Europe, North America, Asia Pacific), And Segment Forecasts, 2018 – 2025. Industry Insights, Decembry, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/digital-twin-market> (Accessed: 28.05.2020).

111. «Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference, applications and research issues» by Yuqian Lu, Chao Liu, Kevin-I-Kai Wang, Huiyue Huang, Xun Xu. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 61, February, 2020 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584519302480> (Accessed: 28.05.2020).
112. Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, Home & Commercial, Healthcare, Energy & Utilities, Oil & Gas), and Geography – Global Forecast to 2025 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (Accessed: 28.05.2020).
113. Digital Twin Market is Booming | PTC, Siemens, Dassault Systèmes, IBM Corporation, ANSYS, Microsoft [Electronic resource]. – Available at: <https://www.openpr.com/news/1293890/Digital-Twin-Market-is-Booming-PTC-Siemens-Dassault-Syst-mes-IBM-Corporation-ANSYS-Microsoft.html> (Accessed: 28.05.2020).
114. «Forging the Digital Twin in Discrete Manufacturing» A Vision for Unity in the Virtual and Real Worlds [Electronic resource]. – Available at: <https://ifwe.3ds.com/sites/default/files/Forging%20the%20Digital%20Twin%20in%20Discrete%20Manufacturing.pdf> (Accessed: 28.05.2020).
115. Направление «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, И.С. Метревели, Е.А. Аликина // *Инновации*. – 2019. – № 11 (253). – С. 50–72 [Электронный ресурс]. – Доступно: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/25/technet.pdf (Дата обращения: 28.05.2020).
116. Gartner Survey Reveals Digital Twins Are Entering Mainstream Use, STAMFORD, Conn., February 20, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mai> (Accessed: 28.05.2020).

117. Глобальное исследование цифровых операций в 2018 г. «Цифровые чемпионы» (Как лидеры создают интегрированные операционные экосистемы для разработки комплексных решений для потребителей) [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.pwc.ru/ru/iot/digital-champions.pdf> (Дата обращения: 28.05.2020).
118. State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B – Market accelerating, August 8, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/> (Accessed: 28.05.2020).
119. «Sample Landscape Study Digital Twin Technology», published by Griffin Walton [Electronic resource]. – Available at: <https://slideplayer.com/slide/15213949/> (Accessed: 28.05.2020).
120. Промышленный интернет вещей в России. Исследование TAdviser и ГК «Ростех», 21 мая 2018 г. [Электронный ресурс]. – Доступно: http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:IloT_2018:_%D0%A0%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%8B%D1%88%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B0_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9_%D0%B2_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8 (Дата обращения: 28.05.2020).
121. «CAD Trends' Survey Covers More Technologies But Yields Few Surprises» by Nancy Spurling Johnson, 6 February, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.cadalyst.com/cad/cad-trends-survey-covers-more-technologies-yields-few-surprises-46648> (Accessed: 28.05.2020).
122. Digital Twin Market is Booming | PTC, Siemens, Dassault Systèmes, IBM Corporation, ANSYS, Microsoft [Electronic resource]. – Available at: <https://www.openpr.com/news/1293890/Digital-Twin-Market-is-Booming-PTC-Siemens-Dassault-Systmes-IBM-Corporation-ANSYS-Microsoft.html> (Accessed: 28.05.2020).

123. IoT ONE helps companies realize opportunities and manage threats created by rapid technological change [Electronic resource]. – Available at: <https://www.iotone.com/guide/iot-one-index-digital-twin-analytics-solution/g576> (Accessed: 28.05.2020).
124. Digital twin initiatives on the rise in 2018 – findings and best practices [Electronic resource]. – Available at: <https://www.i-scoop.eu/iot-digital-twin-initiatives-gartner-platforms/> (Accessed: 28.05.2020).
125. The Top 20 Companies Enabling Predictive Maintenance [Electronic resource]. – Available at: <https://iot-analytics.com/top-20-companies-enabling-predictive-maintenance/> (Accessed: 28.05.2020).
126. «Digital Enterprise» by Daniel Hao Tien Lee [Electronic resource] – Available at: <http://danieleewww.yolasite.com/resources/SCU2018/MGB070%20digital%20enterprise%202018.pdf> (Accessed: 28.05.2020).
127. Sample Landscape Study Digital Twin Technology. Published by Griffin Walton [Electronic resource]. – Available at: <https://slideplayer.com/slide/15213949/> (Accessed: 28.05.2020).
128. «Who Will Win the Digital Twin Services Race?» Posted by Joe Perino, January 17, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://blog.insresearch.com/who-will-win-digital-twins-services-race> (Accessed: 28.05.2020).
129. Enabling technologies and tools for digital twin. Author: Qinglin Qia, Fei Taoa, Tianliang Hu, Nabil Anwer, Ang Liu, Yongli Wei, Lihui Wang, A.Y.C.Neef Journal of Manufacturing Systems, 29 October 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S027861251930086X> (Accessed: 28.05.2020).
130. Simulation & Analysis Software Market to witness astonishing growth with Key Players ANSYS, MathWorks, Siemens

- PLM [Electronic resource]. – Available at: https://www.violencemedia.com/simulation-analysis-software-market-witness-astonishing-growth-key-players-ansys-mathworks-siemens-plm/?fbclid=IwAR3Yr9S8cWEvt8UtkL49yia1zfx_AOWGRBpSaluGXj2YrvNjiqx64TzPv2U (Accessed: 28.05.2020).
131. Enabling technologies and tools for digital twin Article (PDF Available) in Journal of Manufacturing Systems · October 2019 [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/336870688_Enabling_technologies_and_tools_for_digital_twin (Accessed: 28.05.2020).
132. Enabling technologies and tools for digital twin Author: Qinglin Qia, Fei Taoa, Tianliang Hu, Nabil Anwer, Ang Liu, Yongli Wei, Lihui Wang, A.Y.C.Neef Journal of Manufacturing Systems, 29 October 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S027861251930086X> (Accessed: 28.05.2020).
133. Елена Гореткина. Siemens о цифровом двойнике, интернете вещей, российских реалиях и новинках NX 11, 21 июня 2016 [Электронный ресурс]. – Доступно: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18627 (Дата обращения: 28.05.2020).
134. [Electronic resource] – Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/GE_Digital (Accessed: 28.05.2020).
135. Шесть вопросов об отделении GE Digital, 14 декабря 2018 г. [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.crn.ru/news/detail.php?ID=132599> (Дата обращения: 28.05.2020).
136. Ready For Prime Time: Intel Joins GE As It Opens Predix, Its Digital Platform For The Industrial Internet, To All Users. Tomas Kellner, February 22, 2016 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ge.com/news/reports/ready-for-prime-time-ge-opens-predix-its-digital-platform-for-the-industrial-internet-to-everyone> (Accessed: 28.05.2020).

137. Predix Asset Performance Management [Electronic resource]. – Available at: https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/Predix-asset-performance-management-brochure.pdf (Дата обращения: 28.05.2020).
138. «Парящие в облаках» by GE Reports Russia/CIS, ноябрь 21, 2018 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.ge.com/reports/%D0%BF%D0%B0%D1%80%D1%8F%D1%89%D0%B8%D0%B5-%D0%B2-%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D1%85/> (Дата обращения: 28.05.2020).
139. «Breaking New Ground: Digital Twin Helps Engineers Design Megawatt-Sized Circuit Breakers» by Jon Blauvelt September 23, 2015 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ge.com/reports/post/128854239195/breaking-new-ground-digital-twin-helps/> (Accessed: 28.05.2020).
140. How Digital Technology Is Changing Power Plants [Electronic resource]. – Available at: <https://www.powermag.com/how-digital-technology-is-changing-power-plants/33> (Accessed: 28.05.2020).
141. Использование возможностей SAP для реализации концепции «Цифрового двойника» [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://docplayer.ru/106495551-Ispolzovanie-vozmozhnostey-sap-dlya-realizacii-koncepcii-cifrovogo-dvoynika.html> (Дата обращения: 28.05.2020).
142. Использование возможностей SAP для реализации концепции «Цифрового двойника» [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://docplayer.ru/106495551-Ispolzovanie-vozmozhnostey-sap-dlya-realizacii-koncepcii-cifrovogo-dvoynika.html> (Дата обращения: 28.05.2020).
143. ABB и Dassault Systemes заключают соглашение о глобальном сотрудничестве в области создания программного обеспечения для цифровой промышленности (Автоматизация в промышленности), 12 марта 2019 г. [Электронный ресурс]. –

- Доступно: <http://avtprom.ru/news/2019/03/12/abb-i-dassault-systemes> (Дата обращения: 28.05.2020).
144. Партнерский Альянс Altair HyperWorks [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://www.hyperworks.compmechlab.ru/article/hyperworks-aliens>
 145. Какая САПР самая популярная в СНГ. Vertex [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://autocad-lessons.ru/why-kompas-3d/> (Дата обращения: 28.05.2020).
 146. «РазВИТие 2.0» — это решение класса «Цифровой двойник на стадиях проектирования и производства» [Электронный ресурс]. – Доступно: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20931 (Дата обращения: 28.05.2020).
 147. «Топ Системы» представили отечественный комплекс T-FLEX PLM на международной конференции в Обнинске [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.tfex.ru/about/news/detail/index.php?ID=4320> (Дата обращения: 28.05.2020).
 148. «Росатом» презентовал первый тиражируемый цифровой продукт – Логос Аэро-Гидро [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://www.atominfo.ru/newst/a0820.htm> (Дата обращения: 28.05.2020).
 149. «Росатом» презентовал первый тиражируемый цифровой продукт – «Логос Аэро-Гидро», 17 декабря 2018 г. [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/rosatom-prezentoval-pervyy-tirazhiruemyy-tsifrovoy-produkt-logos-aero-gidro/> (Дата обращения: 28.05.2020).
 150. В. Е. Костюков, В. П. Соловьев, Р. М. Шагалиев, А. Н. Гребенников. Суперкомпьютерные технологии РФЯЦ-ВНИИЭФ для гражданских отраслей промышленности [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2017/12/Atom-50-51-2011-2.pdf> (Дата обращения: 28.05.2020).

151. Digital twin of a manufacturing line helping maintenance decision making [Electronic resource]. – Available at: <https://www.anylogic.com/digital-twin-of-a-manufacturing-line-helping-maintenance-decision-making/> (Accessed: 28.05.2020).
152. Цифровой образ промышленного оборудования (IIoT-решение для диагностики и прогноза состояния промышленного оборудования, которое позволяет повысить эффективность и снизить эксплуатационные затраты) [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.web-canape.ru/files/300/prezentaciya-dlya-kompani.pdf> (Дата обращения: 28.05.2020).
153. Ключевые инструменты и форматы развития цифровой экономики: «умные» цифровые двойники и Центр НТИ СПбПУ, 9 апреля 2018 г. [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://nticenter.spbstu.ru/news/6722> (Дата обращения: 28.05.2020).
154. В Центре НТИ СПбПУ прошло рабочее совещание с ПАО «КАМАЗ» по реализации проекта «Универсальная пассажирская платформа» [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://fea.ru/news/7273?fbclid=IwAR1nMOSaIVsIOInorhnxqb3OdpmEsfeQNFkkyo0mY4bxlrbbse7buXqQY> (Дата обращения: 28.05.2020).
155. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.chelvtv.ru/tsifrovye-dvojniki-predpriyatij-chelyabinskierезиденты-skolkovo-pridumali-unikalnuyu-innovatsiyu/> (Accessed: 28.05.2020).
156. Двойник из «облака». Покорят ли разработки челябинских программистов, Голливуд, 22 Октября 2019. Автор: Евгений Аникиенко [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://up74.ru/articles/obshchestvo/114673/> (Дата обращения: 28.05.2020).
157. Jan Brecht «How digital twins change everything» / [Electronic resource]. – Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/how-digital-twins-change-everything-jan-brecht/> (Accessed: 28.05.2020).
158. «Role of Digital Twin in Automotive Industry» by Munish Sharma December 17, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://>

- www.smmmt.co.uk/2018/12/role-of-digital-twin-in-automotive-industry/ (Accessed: 28.05.2020).
159. «Will Flexible-Cell Manufacturing Revolutionize Carmaking?» by Daniel Küpper, Christoph Sieben, Kristian Kuhlmann, Yew Lim and Justin Ahmad October 8, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.bcg.com/publications/2018/flexible-cell-manufacturing-revolutionize-carmaking.aspx> (Accessed: 28.05.2020).
 160. True Cost of Factory Downtime: How Downtime Affects Productivity (Tip 67), June 26, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.simutechmultimedia.com/the-true-cost-of-downtime-what-you-dont-know-about-how-downtime-affects-your-productivity/> (Accessed: 28.05.2020).
 161. «Maserati has fused cutting-edge digitalisation methods with Italian passion to meet customer demand» by Tom Austin-Morgan, October 2, 2017 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-features/interviews/maserati-has-fused-cutting-edge-digitalisation-methods-with-italian-passion-to-meet-customer-demand/161332/> (Accessed: 28.05.2020).
 162. How Vijay Sethi is driving the Digital Twin project at Hero Moto Corp, March 14, 2017 [Electronic resource]. – Available at: <https://cio.economictimes.indiatimes.com/news/strategy-and-management/how-vijay-sethi-is-driving-the-digital-twin-project-at-hero-moto-corp/57625617?redirect=1> (Accessed: 28.05.2020).
 163. «Digital twin in the automobile industry» by Ahlam Rais, August 1, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.maschinenmarkt.international/digital-twin-in-the-automobile-industry-a-851549/> (Accessed: 28.05.2020).
 164. Digital Twins in F1™ Racing Throw Down Big Gains for Mercedes-AMG Petronas Motorsport [Electronic resource]. – Available at: https://www.tibco.com/sites/tibco/files/resources/SS-mercedes-digital-twins-final_0.pdf (Accessed: 28.05.2020).

165. Алексей Боровков. «Кортеж» прошел 50 тысяч виртуальных краш-тестов», РИА-Новости, 5 мая 2018 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://ria.ru/20180529/1521551521.html> (Дата обращения: 28.05.2020).
166. Алексей Боровков. «Кортеж» прошел 50 тысяч виртуальных краш-тестов», Национальная технологическая инициатива, 29 мая 2018 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://nti2035.ru/media/publication/aleksey-borovkov-kortezh-proshel-50-tysyach-virtualnykh-krash-testov> (Дата обращения: 28.05.2020).
167. Aurus, Википедия [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Aurus> (Дата обращения: 28.05.2020).
168. А. А. Коростелкин, О. И. Клявин, и др. Оптимизация массы кузова в контексте краш-теста автомобиля класса внедорожник [Электронный ресурс]. – Доступно: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2020/04_april/08/Korostelkin.pdf (Дата обращения: 28.05.2020).
169. «В издательстве Springer опубликована статья о проекте Центра НТИ СПбПУ по снижению массы внедорожника BAIC Group» [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://nticenter.spbstu.ru/news/7297> (Дата обращения: 28.05.2020).
170. Optimization of Frame Mass in Crash Testing of Off-Road Vehicles / A.A. Korostelkin, O.I. Klyavin, M.V. Aleshin [et al.] // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39, Issue 12. – P. 1021–1028 [Electronic resource]. – Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X19120116> (Accessed: 28.05.2020).
171. Цифровой двойник и система CML-Bench помогли уменьшить массу кузова внедорожника на 7.5% / О.И. Клявин, М.В. Алешин, А.А. Коростелкин, Ван Годун, Ван Суйфэн, Лю Цзини // CAD/CAM/CAE Observer. – 2020. – № 3 (135). – С. 57–58. [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://www.cadcamcae.lv/N135/57-58.pdf> (Дата обращения: 28.05.2020)..

172. КАМАЗ создает цифровые двойники на производстве, «КАМАЗ», 15 января 2019 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://rostec.ru/news/kamaz-sozdaet-tsifrovye-dvoyniki-na-proizvodstve/> (Дата обращения: 28.05.2020).
173. От разработки до 3D-модели. Союз машиностроителей России, 15 января 2019 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://soyuzmash.ru/news/companies-news/ot-razrabotki-do-3d-modeli/> (Дата обращения: 28.05.2020).
174. Рабочее совещание с ПАО «КАМАЗ» по реализации проекта «Универсальная пассажирская платформа», Центр компьютерного инжиниринга СПбПУ, 24 марта 2020 [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://fea.ru/news/7273?fbclid=IwAR1nMOSaIVsIOInorhnxq3OdpmEsfEQNFekkyo0mY4bXlrbse7buXqQY> (Дата обращения: 28.05.2020).
175. «Цифровой двойник» Siemens на четверть ускорит выпуск УАЗ «Патриот», С NEWS, 2 июля 2019 [Электронный ресурс]. – Доступно: https://www.cnews.ru/news/top/2019-06-28_tsifrovoy_dvojnuk_na_chetvert_uskorit_vypusk (Дата обращения: 28.05.2020).
176. The advantages of using digital twin simulations in aerospace, Challenge Advisory, January 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-in-aerospace/> (Accessed: 28.05.2020).
177. «Boeing CEO Talks 'Digital Twin' Era of Aviation» by Woodrow Bellamy III, September 14, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.aviationtoday.com/2018/09/14/boeing-ceo-talks-digital-twin-era-aviation/> (Accessed: 28.05.2020).
178. «How manufacturers act as on-ground mechanics for jet engines in the air» by Erin Biba, BBC, February 14, 2017 [Electronic resource]. – Available at: <http://www.bbc.com/autos/story/20170214-how-jet-engines-are-made> (Accessed: 28.05.2020).

179. «Aircraft health management systems and digital twin technology» by Ernest Arvai, Airinsight, January, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://airinsight.com/aircraft-health-management-systems-and-digital-twin-technology/> (Accessed: 28.05.2020).
180. «What is a digital twin and how does it keep Rolls-Royce machines safe?» by Oliver Pickup, The Telegraph, April 3, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.telegraph.co.uk/education/stem-awards/digital/digital-twins-computer-modeling/> (Accessed: 28.05.2020).
181. Цифровые двойники: наработок много, дело за системным подходом. Центр экономического развития и сертификации – ЦЭРС ИНЭС, 27 августа 2018 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://profiok.com/news/detail.php?ID=6878#ixzz5itcdiDab> (Дата обращения: 28.05.2020).
182. «Digital Twin is about to rollout by Airbus» by M. Stach, ASCon Systems, July 12, 2017 [Electronic resource]. – Available at: <https://ascon-systems.de/en/es-ist-schoen-hier-zu-sein-2/> (Accessed: 28.05.2020).
183. 4 Top Robotics Solutions Impacting the Shipbuilding Industry. Start Us Insights [Electronic resource]. – Available at: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/4-top-robotics-startups-impacting-the-shipbuilding-industry/> (Accessed: 28.05.2020).
184. Shipyard 4.0, Digital Twin, Navantia [Electronic resource] – Available at: <https://www.navantia.es/en/navantia-4-0/shipyard-4-0/digital-twin/> (Accessed: 28.05.2020).
185. Средне-Невский переходит на цифру [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.kommersant.ru/doc/3372987> (Дата обращения: 28.05.2020).
186. Развитие отечественных суперкомпьютерных технологий в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» [Электронный ресурс]. – Доступно: http://www.kuriermedia.ru/data/objects/2268/files/65_Kostyukov.pdf

187. Trip Optimizer for Railroads [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ge.com/research/project/trip-optimizer-railroads> (Accessed: 28.05.2020).
188. A case study on simulation of railway fleet maintenance, Winter Simulation Conference (WSC), December 2018 [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/330876108_A_CASE_STUDY_ON_SIMULATION_OF_RAILWAY_FLEET_MAINTENANCE (Accessed: 28.05.2020).
189. Dutch engineer Fugro to create «digital twin» of Denmark’s rail network. Global Construction Review (GCR), September 10, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <http://www.globalconstructionreview.com/news/dutch-engineer-fugro-create-digital-twin-denmarks/> (Accessed: 28.05.2020).
190. Цифровые двойники подвижного состава и инфраструктура, АО «ВНИИЖТ» РЖД [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.vniizht.ru/?id=20&news=832> (Дата обращения: 28.05.2020).
191. «Unlocking a new era of smart buildings through the digital twin» by Willow Team, October 18, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.willowinc.com/2019/10/18/unlocking-a-new-era-of-smart-buildings-through-the-digital-twin/> (Accessed: 28.05.2020).
192. Digital Twins vs. Building Information Modeling (BIM), April 15, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.iotforall.com/digital-twin-vs-bim/> (Accessed: 28.05.2020).
193. Shell Chemicals Project in Pennsylvania Wins Special Recognition Award for Continuous Surveying in Constructioneering, Lidar News, June 7, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://lidarnews.com/articles/shell-chemicals-project-in-pennsylvania-wins-special-recognition-award/> (Accessed: 28.05.2020).
194. Advanced Imaging Algorithms in Digital Twin Reconstruction of Construction Sites. Intellect soft, January 17, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.intellectsoft.net/blog/>

- advanced-imaging-algorithms-for-digital-twin-reconstruction/ (Accessed: 28.05.2020).
195. Digital twin technology spearheads energy efficiency, BIM today, April 16, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.pbctoday.co.uk/news/bim-news/digital-twin-technology-energy/55587/> (Accessed: 28.05.2020).
196. Digital Twin as a Decision-Making Support Tool for Resilience of Urban's Infrastructure under Extreme Climatic Events, February 1, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.chalmers.se/en/projects/Pages/Digital-Twin-as-a-Decision-Making-Support-Tool-for-Resilience-of.aspx> (Accessed: 28.05.2020).
197. Екатерина Повх. 10 цифровых двойников городов, «РБК-Недвижимость», 23 января 2020 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://realty.rbc.ru/news/5e297b079a79478024d54ff6> (Дата обращения: 28.05.2020).
198. «Rotterdam's Digital Twin Redefines Our Physical, Digital, & Social Worlds», by Smart Cities Editorial January 1, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://eu-smartcities.eu/news/rotterdams-digital-twin-redefines-our-physical-digital-social-worlds> (Accessed: 28.05.2020).
199. Barely a city now, Amaravati tops smart city spend, News – Times of India, January 20, 2020 [Electronic resource]. – Available at: <https://timesofindia.indiatimes.com/city/amaravati/barely-a-city-now-amaravati-tops-smart-city-spend/articleshow/73599690.cms> (Accessed: 28.05.2020).
200. Blom Sweden AB Interactive 3D Model of Stockholm, Stockholm, Sweden [Electronic resource]. – Available at: https://www.bentley.com/ru/project-profiles/blom_sweden (Accessed: 28.05.2020).
201. «Цифровой Кронштадт»: МегаФон и Санкт-Петербург представили «Цифрового двойника города», Ведомости, 7 июня 2019

- [Электронный ресурс]. – Доступно: https://www.vedomosti.ru/press_releases/2019/06/07/tsifrovoy-kronshtadt-megafon-i-sankt-peterburg-predstavili-tsifrovogo-dvoynika-goroda (Дата обращения: 28.05.2020).
202. «Digital Twins Define Oil & Gas 4.0» by Jyoti Prakash, ARC, Advisory Group, August 7, 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40> (Accessed: 28.05.2020).
203. Форум Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE Комментарий компании CIMdata, «Машиностроение и смежные отрасли» [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://www.cadcamcae.lv/N116/25-29.pdf> (Дата обращения: 28.05.2020).
204. Operational Digital Twin [Electronic resource]. – Available at: <https://www.cognite.com/operational-digital-twin> (Accessed: 28.05.2020).
205. Aker Solutions to build digital twin for Wintershall's Nova field, by Offshore Energy Today, February 22, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.offshoreenergytoday.com/aker-solutions-to-build-digital-twin-for-wintershalls-nova-field/> (Accessed: 28.05.2020).
206. Royal Dutch Shell. Википедия [Электронный ресурс]. – Доступно: https://ru.wikipedia.org/wiki/Royal_Dutch_Shell (Дата обращения: 28.05.2020).
207. The World's First Digital Rig: Digitizing Operational Excellence, GE Digital [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ge.com/digital/blog/worlds-first-digital-rig-digitizing-operational-excellence> (Accessed: 28.05.2020).
208. «Digital twin for marine drilling risers» by Greg Myers, GE Oil & Gas May 1, 2017 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.oedigital.com/activity/item/15224-digital-twin-for-marine-drilling-risers> (Accessed: 28.05.2020).

209. ADNOC'S Panorama Command Centre unifies... [Electronic resource]. – Available at: <https://www.oilandgasmiddleeast.com/drilling-production/33281-the-company-behind-adnocs-panorama-command-centre-on-digitalisation-in-the-region> (Accessed: 28.05.2020).
210. Цифровизация нефтяной индустрии. Практические кейсы и примеры ведущих компаний, 6 сентября 2019 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://sntat.ru/news/science/16-09-2019/tsifrovizatsiya-neftyanoj-industrii-prakticheskie-keysy-i-primery-veduschih-kompaniy-5650874> (Дата обращения: 28.05.2020).
211. 1,5% дополнительной добычи. Газпром нефть внедряет новые цифровые решения для повышения эффективности управления добычей, Neftegaz.RU, 17 декабря 2018 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://neftegaz.ru/news/dobycha/196157-1-5-dopolnitelnoj-dobychi-gazprom-neft-vnedryaet-novye-tsifrovyje-resheniya-dlya-povysheniya-effektivnogo-upravleniya-dobychey> (Дата обращения: 28.05.2020).
212. Цифровое зеркало – Технологии цифровых двойников в нефтегазовой промышленности, (Газпром нефть) [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2018-september-projects/1863687/> (Дата обращения: 28.05.2020).
213. В «Газпром нефть-Хантосе» создан Центр управления добычей, использующий технологию «цифровых двойников», Агентство нефтегазовой информации, 16 ноября 2017 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.angi.ru/news> (Дата обращения: 28.05.2020).
214. Сергей Орлов .Управление эффективностью «Газпром нефть» начала создание единой цифровой платформы логистики, переработки и сбыта, ноябрь 2017 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2017-november/1243413/> (Дата обращения: 28.05.2020).

215. На ТАНЕКО создан цифровой двойник ЭЛОУ-АВТ-7, Инфромагентство Девон, 17 августа 2018 [Электронный ресурс]. – Доступно: https://iadevon.ru/news/petroleum/na_taneko_sozdan_tsifrovoy_dvoynik_elou-avt-7-7666/ (Дата обращения: 28.05.2020).
216. Юлия Мельникова. Сибур сделал шаг к цифровым двойникам. COMNEWS, 19 февраля 2019 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.comnews.ru/content/117968/2019-02-19/sibur-sdelal-shag-k-cifrovym-dvoynikam> (Дата обращения: 28.05.2020).
217. PLM Эксперт «Инновации в промышленности», Siemens, апрель 2018 [Электронный ресурс]. – Доступно: https://vbm.ru/upload/events_files/PLM-Expert-April-2018_tcm802-260591.pdf (Дата обращения: 28.05.2020).
218. Digital twin of gas turbine will drive the world's largest aluminum plant. Posted by Fastener News Desk, January 19, 2017 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.fastenernewsdesk.com/14014/ge-digital-turbine-twin-drives-aluminum-plant/> (Accessed: 28.05.2020).
219. Атом: цифровой двойник газотурбинного парка Siemens. Anylogic.ru [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.anylogic.ru/atom-digital-twin-of-siemens-gas-turbine-fleet-operations/> (Дата обращения: 28.05.2020).
220. Атом: цифровой двойник газотурбинного парка Siemens. Anylogic.ru [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.anylogic.ru/tom-digital-twin-of-siemens-gas-turbine-fleet-operations/> (Дата обращения: 28.05.2020).
221. УТЗ использует цифровой двойник турбин на базе Creo и Windchil, 27 июня 2019 [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://pts-russia.com/news/item/313-utz-ispolzuet-tsifrovoy-maket-turbin.html> (Дата обращения: 28.05.2020).

222. «How digital twins are transforming wind operations», by WPED Contributor, April 22, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.windpowerengineering.com/how-digital-twins-are-transforming-wind-operations/> (Accessed: 28.05.2020).
223. Евгений Душаков. Использование возможностей SAP для реализации концепции «Цифрового двойника». SAP, май 2018 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://docplayer.ru/113344632-Ispolzovanie-vozmozhnostey-sap-dlya-realizacii-konceptcii-cifrovogo-dvoynika.html> (Дата обращения: 28.05.2020).
224. «Digital Twins for Building Flexibility into Power Plant Operations» by Stephen E. Zitney, U.S. Department of Energy, April 29, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ice.org.uk/knowledge-and-resources/case-studies/digital-twins-for-building-flexibility-into-power> (Accessed: 28.05.2020).
225. AGL Uses Digital Twin to Optimize Power Station [Electronic resource]. – Available at: <https://www.yokogawa.com/tr/library/resources/references/agl-energy/> (Accessed: 28.05.2020).
226. Digital twin technology identified as key to increased safety and efficiency, July 3, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://analysis.nuclearenergyinsider.com/digital-twin-technology-identified-key-increased-safety-and-efficiency> (Accessed: 28.05.2020).
227. Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР», Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://www.ibrae.ac.ru/contents/362> (Дата обращения: 28.05.2020).
228. Nuclear's digital transformation, 26 June 2018 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.neimagazine.com/features/featurenuclears-digital-transformation-6220895/> (Accessed: 28.05.2020).

229. «Experience in developing Digital Twins to support operation and maintenance of french nuclear plants» by Marc Boucker, Christophe Varé, Abderrahim Al Mazouzi, October 8–10, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <http://globalforum.items-int.com/gf/gf-content/uploads/2019/10/GF-2019-Marc-Boucker.pdf> (Accessed: 28.05.2020).
230. Wood leads virtual research into better nuclear reactor design, PEI Power Engineering International, May 15, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.powerengineeringint.com/nuclear/reactors/wood-leads-virtual-research-into-better-nuclear-reactor-design/> (Accessed: 28.05.2020).
231. «A framework for an integrated nuclear digital environment» by Eann A.Patterson, Richard J.Taylorb, Mark Bankhead, March 2016 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197015301104> (Accessed: 28.05.2020).
232. Александр Рябов, Александр Скибин, Василий Волков, Лука Голибродо, Алексей Крутиков, Олег Кудрявцев. Создание цифрового двойника АЭС на основе вычислительной тепло гидравлики [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/publication2018/documents/054.pdf> (Дата обращения: 28.05.2020).
233. «Интеллект & технологии», № 2(8), 2014 [Электронный ресурс]. – Доступно: https://itech.aorti.ru/upload/iblock/711/rti_ii_2_8_2014.pdf (Дата обращения: 28.05.2020).
234. «Program and technical complex Virtual-Digital Nuclear Power Plant with VVER» – Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР», Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://en.ibrae.ac.ru/contents/362/> (Дата обращения: 28.05.2020).

235. Проект виртуально-цифровой АЭС будет использован при реализации проекта «Прорыв» Департамент информации и общественных связей АО «Концерн Росэнергоатом», 1 июня 2018. [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://rosatom.ru/journalist/news/proekt-virtualno-tsifrovoy-aes-budet-ispolzovan-pri-realizatsii-proekta-proryv/> (Дата обращения: 28.05.2020).
236. «Расчетные коды нового поколения» «Росатом», «Прорыв». [Электронный ресурс]. – Доступно: <http://proryv2020.ru/raschetnye-kody-novogo-pokoleniya/> (Дата обращения: 28.05.2020).
237. «Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm» by Koen Bruynseels, Filippo Santoni de Sio, and Jeroen van den Hoven, February 13, 2018. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5816748/#B37> (Accessed: 28.05.2020).
238. «Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm» by Koen Bruynseels, Filippo Santoni de Sio, and Jeroen van den Hoven, February 13, 2018. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5816748/> (Accessed: 28.05.2020).
239. «How AI, deep learning, predictive analytics and digital twins will bring an era of personalized care» 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.analyticsinsight.net/how-ai-deep-learning-predictive-analytics-and-digital-twins-will-bring-an-era-of-personalized-care/#:~:text=pms%2Daccount-,How%20AI%2C%20Deep%20Learning%2C%20Predictive%20Analytics%20and%20Digital%20Twins%20will,an%20Era%20of%20Personalized%20Care&text=Deep%20learning%2C%20which%20trains%20machines,discovery%20process%20through%20predictive%20modeling.> (Accessed: 28.08.2020).

240. «Why Modern Farming Need the Digital Twins» by Matanat Rashid, Challenge Advisory, 16 October 2018. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.challenge.org/knowledgeitems/why-modern-farming-need-the-digital-twins/> (Accessed: 28.05.2020).
241. Цифровые двойники полей, виртуальные метеостанции и «поп-слушные» комбайны. Как IT-технологии помогают агрономам «Русагро», Fonar.TV [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://fonar.tv/article/2019/08/14/cifrovye-dvoyniki-poley-virtualnye-meteostancii-i-poslushnye-kombayny-kak-it-tehnologii-pomogayut-agronomam-rusagro> (Дата обращения: 28.05.2020).
242. Мария Недюк. Полевая модель: как цифровой двойник повысит урожайность. Известия-iz, 11 декабря 2019 [Электронный ресурс]. – Доступно: <https://iz.ru/936253/mariia-nediuk/polevaia-model-kak-tsifrovoi-dvoynik-povysit-urozhainost> (Дата обращения: 28.05.2020).
243. A Digital Twin for Smart Farming, Conference: IEEE Global Humanitarian Technology, October 2019 [Electronic resource]. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/337559578_A_Digital_Twin_for_Smart_Farming#pf2 (Accessed: 28.05.2020).
244. The ICT4Water cluster. Smart Water Management Platform [Electronic resource]. – Available at: <http://swamp-project.org/partners/> (Accessed: 28.05.2020).
245. Welcome to Digital Pulse «Digital» isn't just about technology – it's about what technology can enable. It involves new ways of solving problems, creating unique experiences and accelerating business performance [Electronic resource]. – Available at: <https://usblogs.pwc.com/emerging-technology/digital-twins/> (Accessed: 28.05.2020).

246. Борис Агатов. Цифровые двойники в ритейле – кто это такие и почему с ними срочно нужно знакомиться? NR [Электронный ресурс]. – Доступно: https://new-retail.ru/tehnologii/tsifrovye_dvoyniki_v_riteyle_kto_eto_takie_i_pochemu_s_nimi_srochno_nuzhno_znakomitsya5533/ (Дата обращения: 28.05.2020).
247. «Digital twins, the airport operations control interface of the future» by Kevin O'Sullivan, Lead Engineer, SITA Lab April 11, 2020 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.sita.aero/resources/blog/digital-twins-the-airport-operations-control-interface-of-the-future> (Accessed: 28.05.2020).
248. «On the impact of quantum computing technology on future developments in high-performance scientific computing» by Matthias Moller & Cornelis Vuik [Electronic resource]. – Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10676-017-9438-0#ref-CR70> (Accessed: 28.05.2020).
249. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Гамзикова А.А. Цифровые двойники в нефтегазовом машиностроении [Электронный ресурс] // Neftegaz.Ru. – 2020. – № 6. – С. 30–36. – Доступно: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2020/06_june/29/neftegaz-18-21.pdf (Дата обращения: 01.07.2020)

Научное издание

Прохоров Александр
Лысачев Михаил

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК

Анализ, тренды, мировой опыт

Научный редактор – Алексей Боровков
Литературный редактор – Ирина Дмитриева
Иллюстратор – Софья Пилипенко, Екатерина Петрова
Корректор – Светлана Горлова



9 785980 940089

Печать офсетная. Формат 70x100/16.
Гарнитура Arial. Тираж 400 экз.
Подписано в печать 24.09.20

Отпечатано в типографии ООО «АльянсПринт»
115054, г. Москва, ул. Дубининская, д.68, стр.13, помещение 31