

УДК 004.942 : 519.876.5

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ЗАВОДА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

© 2023 И.С. Ткаченко, Д.В. Антипов, А.В. Куприянов, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 08.06.2023

В статье рассматривается концептуальная модель цифрового завода производственного предприятия аэрокосмической отрасли, приводится описание ключевых элементов и их взаимосвязи
Ключевые слова: киберфизическая система, цифровая фабрика, умная фабрика, виртуальная фабрика, цифровой завод, киберфизический полигон.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-90-106

EDN: LGNIZM

Ключевым трендом Российской и мировой промышленности является цифровая трансформация и создание киберфизических систем, интегрирующих цифровые (виртуальные) и физические компоненты, для повышения скорости проектирования, разработки и производства высокотехнологичной продукции. Создаваемым на предприятии киберфизические системы для решения задач повышения эффективности деятельности называются цифровыми заводами. Концепция цифрового завода предусматривает создание комплексных технологических решений, позволяющих разрабатывать и использовать в виде единого объекта все организационные, технологические, логистические процессы и процессы управления производственной средой за счет интеграции виртуальных моделей и киберфизических систем.

Отличительными особенностями цифрового завода являются:

- Единая система управления информацией о производстве, единое информационное пространство;

- Цифровое моделирование бизнес-процессов и технологических процессов;

- Конвергенция цифрового и физического описаний изделий. (комплексный цифровой двойник);

- Цифровой реверс инжиниринг, формирование базы данных электронных составов продукции, прототипов с использованием средств неразрушающего и разрушающего контроля, оборудования анализа физико-химических составов материалов;

- Внедрение передовых производственных технологий, включая аддитивное производство, новые виды сварки, сборки, механической обработки деталей и др.;

- Автоматизированные рабочие места (АРМ) производства, сбор данных от средств производства (MDC) и дополненная реальность (Computer Aided Workshops, CAW) с целью создания единой среды управления производственными участками, технического перевооружения и автоматизации производственных участков.

Аэрокосмическая промышленность России сегодня представлена более чем сотней крупных предприятий только в структурах Госкорпораций. Это, как правило, предприятия, которые выпускают конечную продукцию и являются звеньями сложных коопераций. Российские авиастроение и космическое машиностроение являются конкурентоспособными на мировом рынке и приводят к мультипликативным эффектам в других высокотехнологичных отраслях, однако, существует определенный комплекс проблем, затрудняющих модернизацию и технологическое развитие, среди которых: особые условия для развития научно-технологического потенциала вследствие проводимой государством политики импортозамещения; нарастающий кризис информационно-коммуникационной и энергетической инфраструкту-

Ткаченко Иван Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель ректора Самарского университета, директор Передовой инженерной аэрокосмической школы, E-mail: tkachenko.is@ssau.ru

Антипов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского университета. E-mail: antipov.dv@ssau.ru

Куприянов Александр Викторович, доктор технических наук, доцент, директор Института информатики и кибернетики Самарского университета. E-mail: akupr@ssau.ru

Смелов Виталий Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент, директор Института двигателей и энергетических установок Самарского университета. E-mail: smelov@ssau.ru

Кокарева Виктория Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей Самарского университета. E-mail: kokareva.vv@ssau.ru

ры и производственных мощностей, требующий применения технологий цифрового завода

На сегодняшний день отсутствует единая методология и стандарты создания модели цифрового завода. Каждая организация, по – своему понимают и создают элементы цифрового завода. Также существуют отраслевые особенности, влияющие на цифровую трансформацию предприятий и цели поставок. В аэрокосмической отрасли фронтальной задачей является интенсификации процессов создания и модернизации глобально конкурентоспособной, кастомизированной продукции нового поколения на основе интеграции интеллектуальных производственных и информационных технологий. Решение данной задачи экстенсивным путем, т.е. увеличение объёмов производства за счёт наращивания одинаковых в качественном отношении факторов производства, невозможно ввиду отсутствия отдельных видов ресурсов, главными из которых является время и кадры. Совершенствование технологий, развитие инженерной науки и техники и применение их достижений в производстве, развитие инженерного образования и подготовка высококвалифицированных кадров, характерные для интенсивного пути, – единственный рациональный способ решения вышеуказанной задачи.

Поэтому создание концептуальной модели цифрового завода для предприятий аэрокосмической отрасли является актуальной задачей. При создании концептуальной модели цифрового завода необходимо установить роль, место и причинно-следственные связи между широко применяемыми понятиями, такими как киберфизическая фабрика, цифровая фабрика, умная фабрика, виртуальная фабрика, цифровой завод и киберфизический полигон.

Для обобщения и систематизации научных подходов по созданию цифрового завода нами разработана концептуальная модель цифрового завода. Данная концептуальная модель цифрового завода может быть применима на любом производственном предприятии аэрокосмической отрасли. Для построения концептуальной модели цифрового завода необходимо определить цель создания цифрового завода. Целью цифрового завода является интенсификации процессов создания и модернизации глобально конкурентоспособной и кастомизированной продукции нового поколения на основе интеграции интеллектуальных производственных и информационных технологий. Достижение цели цифрового завода реализуется за счет организации мониторинга состояния производимого объекта путем отображения на цифровой модели параметров его функционирования и индикации узлов и деталей оборудования, рабочие значения параметров которых отклоняются от нор-

мальных; организация системы предиктивного обслуживания через анализ больших объемов статистических данных по работе оборудования за период времени, а также управление объектами производства через цифровую модель (передача управляющих сигналов от цифровой модели на реальный объект). В зависимости от сформулированной цели модель цифрового завода может менять свою структуру и состав.

Разработанная концептуальная модель основывается на ряде принципов построения и функционирования:

1. Иерархическая многоуровневая структура.
2. Киберфизическая система как основа цифрового завода.
3. Самообучающаяся модель.
4. Использование сквозных технологии: технологии искусственного интеллекта; технологии больших данных; облачные сервисы; новые производственные технологии; промышленный интернет вещей и др.
5. Роботизация и автоматизация производственных ячеек для создания «безлюдного» производства.

В основе концептуальной модели цифрового завода лежит киберфизическая система. Киберфизическая система – комплексная распределенная информационно-технологическая система, интегрирующая цифровые ресурсы и физические сущности любого вида для оптимизации процессов управления производственными элементами с возможностью интеллектуальной обработки и реконфигурации потоков на базе теории кибернетики, мехатроники, проектирования и науки о процессах. В киберфизических системах цифровая компонента распределена по всей физической системе, которая является её носителем, и синергетически увязана с её составляющими элементами. Киберфизическая система создается как сеть взаимодействующих физических и информационных компонентов производства (промышленного оборудования, производственной цепочки поставок), проектируемая как единая информационно-аналитическая система (ЕИАС), организованная в рамках единой модели и адаптирующаяся к изменениям требований к изделиям и ограничений производства на базе технологии взаимосвязанного комплекса математических, физических и имитационных моделей объектов с соответствующими наборами параметров, входами/выходами, управляющими воздействиями, критериями, ограничениями и переменными оптимизации.

Структурная модель киберфизической системы созданной для производственной организации приведена на рисунке 1.

Киберфизическая система производственной организации включает в себя физическое

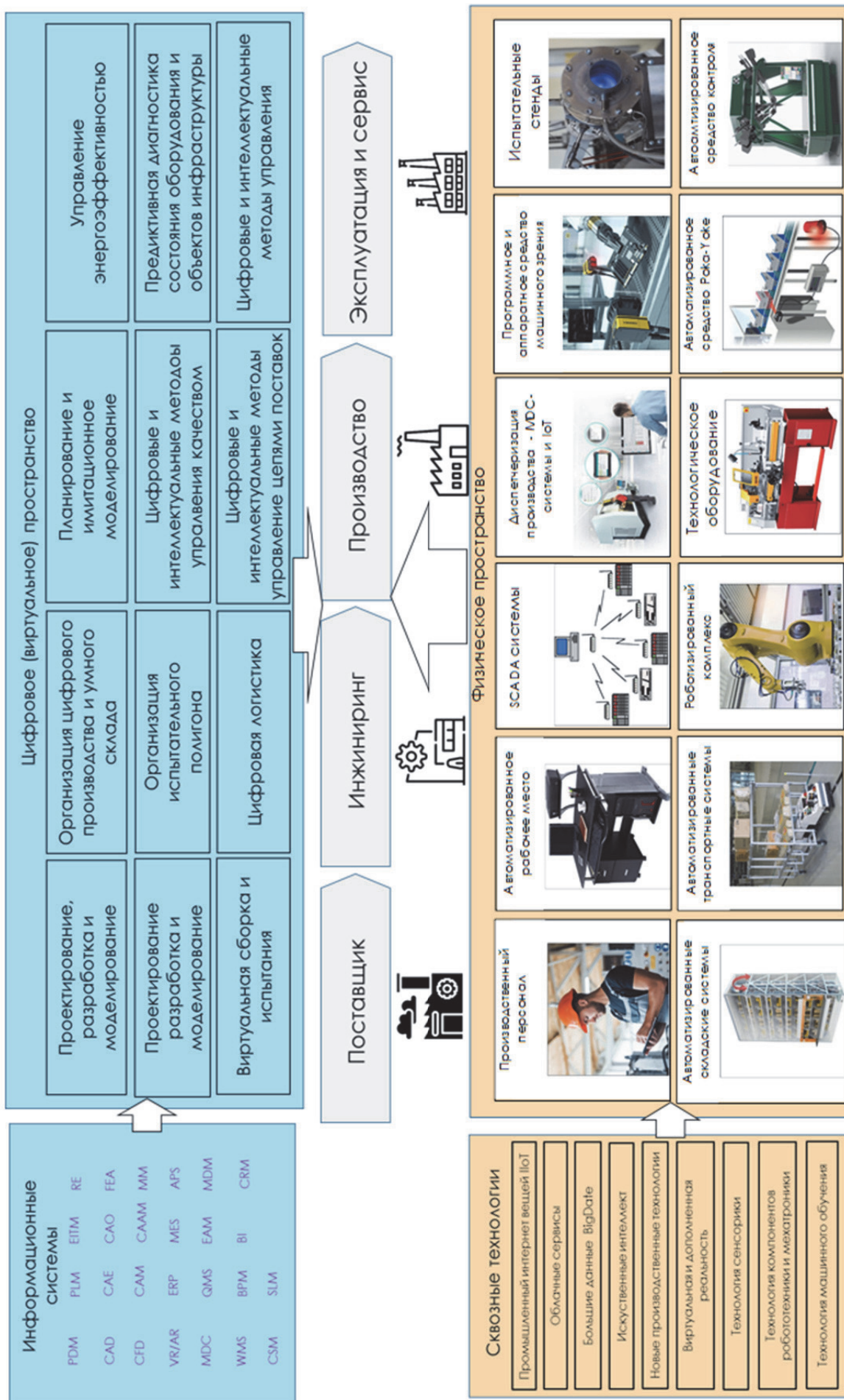


Рисунок 1 – Структурная схема киберфизической системы производственной организации

пространство с инженерно-техническим и административно-управленческим персоналом, совокупностью физических элементов (технологическое складское и транспортное оборудование, автоматизированные рабочие места, SCADA системы, устройства защиты от ошибок, предметы труда и др.) и интегрированное с ним цифровое (виртуальное) пространство. Цифровое пространство включает в себя информационные системы, обеспечивающие выполнения процессов создания высокотехнологичной продукции в цифровом пространстве. Сквозные технологии (промышленный интернет вещей, искусственный интеллект, новые производственные технологии и др.) обеспечивают взаимодействия элементов физического пространства с цифровым. Все элементы цифрового и физического пространства киберфизической системы могут распространяться на взаимодействующие организационно-управленческие структуры: поставщики компонентов → инжиниринг → производство → эксплуатация и сервис.

Концептуальная модель цифрового завода представлена в виде структурной модели на рисунке 2. Структурная модель состоит из совокупности трех типов компонентов:

- Процессы, протекающие в концептуальной модели цифрового завода. Процессы включают этапы жизненного цикла изделия, а также цепи поставок комплектующих и предприятия, осуществляющие эксплуатацию и сервис аэрокосмической техники.

- Цифровые сервисы, к которым относятся цифровые платформы, программное обеспечение, имитационные модели и цифровые двойники и др.

- Физические компоненты, к которым относятся персонал, автоматизированное технологическое, контрольно-измерительное, испытательное и вспомогательное оборудование, датчики и сенсоры, системы транспортировки и хранения, системы защиты от ошибок и др.

Концептуальная модель цифрового завода является иерархической трехуровневой структурой (Таблица 1).

Каждый последующий (верхний) уровень включает в себя предыдущий (нижний). Совокупность трех уровней является цифровым заводом. Цифровой завод – системы комплексных технологических решений, обеспечивающая в кратчайшие сроки производство глобально конкурентоспособной продукции нового поколения от заготовки до готового изделия, являющейся киберфизической системой и объединяющей в себе «Цифровую фабрику», «Умную фабрику» и «Виртуальную фабрику».

Для эффективного использования цифровых технологий необходимо преобразовать процессы, происходящие в физическом пространстве, в

информационные процессы, а также иметь возможность обратного преобразования. В рамках концептуальной модели цифрового завода решается проблема адекватного моделирования алгоритма жизненного цикла изделия, т.е. установления взаимно однозначного соответствия между физическим и цифровым пространством. Комплексы предметно-ориентированного прикладного программного обеспечения предназначены для структурирования массива данных и автоматизации управления физическими и информационными процессами на протяжении всего жизненного цикла изделия.

Первым уровнем цифрового завода является цифровая фабрика, в основе которой заложены цифровые модели изделий, рабочих процессов, материалов и технологий производства, связанные с техническими (а также экономическими) условиями и требованиями, которые находятся в единой для всех участников производственной цепочки информационно-аналитической среде – PLM-системе. Посредством передачи данных об изделии в контуре цифровой фабрики формируется цифровой двойник и цифровом паспорте изделия, которые связывает данные об изделии со всеми внутренними и внешними отделами по ходу протекания бизнес-процессов (проектирования, снабжения, производства, испытаний), и формализует актуальные данные об изделии. Так, например, на этапе испытаний или эксплуатации изделия в цифровом двойнике отображаются реальные эксплуатационные параметры, которые определяют качество изделия, его производительность и др. показатели. На основе этих данных принимается решение об улучшении изделия, оптимизации его конструкции или технологии производства.

Цифровая фабрика в концептуальной модели цифрового завода представлена совокупностью процессов, цифровых и физических компонентов. В таблице 2 приведены процессы цифровой фабрики.

Цифровая фабрика использует цифровые двойники изделий для создания комплексной цифровой модели проектируемого изделия или узла, включая учет допусков, шероховатости, свойств материала, сложности геометрии и технологического процесса формообразования, доступности и параметров эффективности производственного оборудования для автоматического анализа проектируемой конструкции изделия или узла с точки зрения технологичности и стоимости. Так, конструкторы анализируют 3D модель изделия (CAD-модель) на соответствие требованиям Заказчика, в том числе по стоимости, исходя из серийности производства, технологи используют эти данные для подбора оптимальных режимов технологического процесса, формируя CAM-модели и

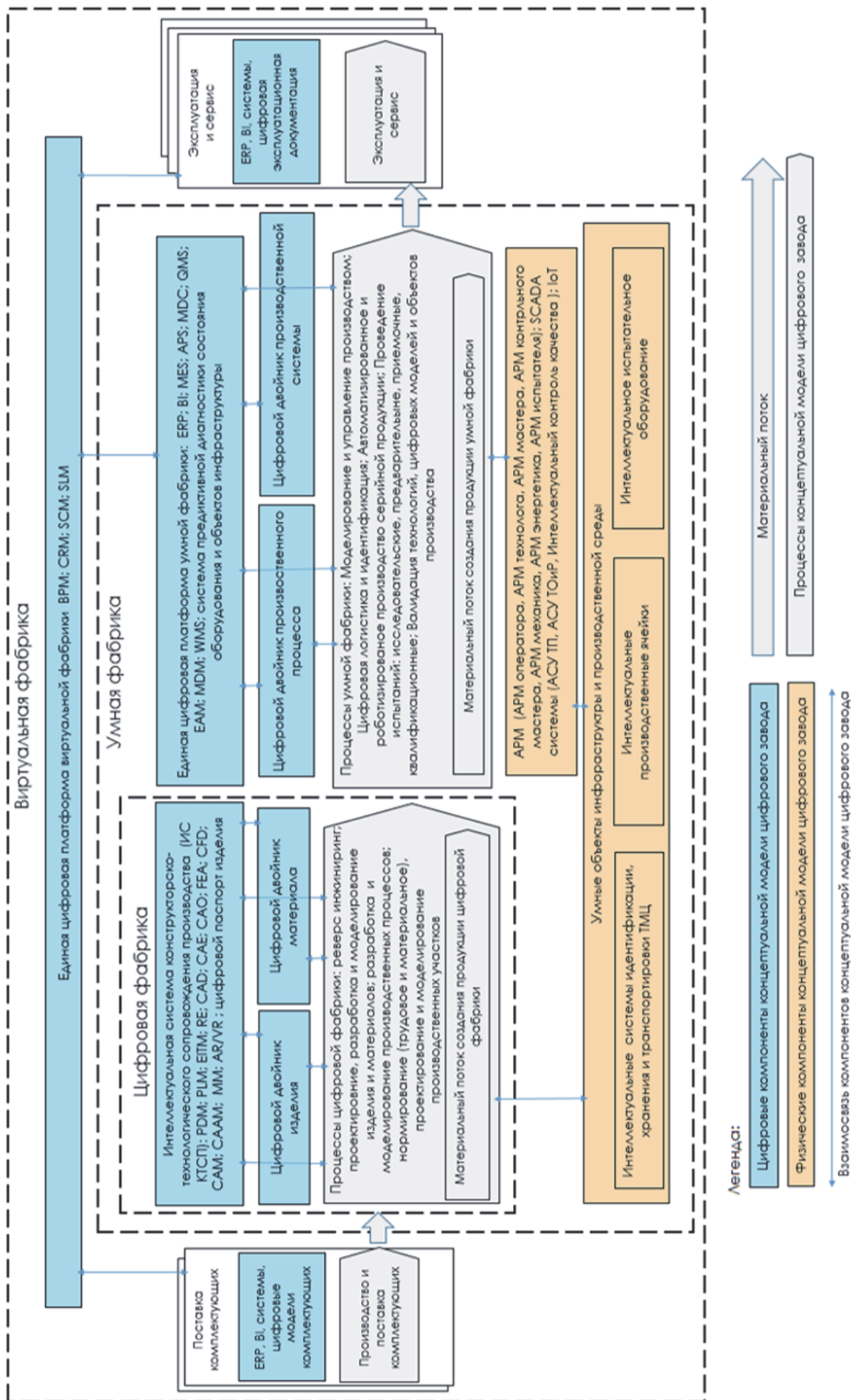


Рисунок 2 – Обобщенная структурная модель цифрового завода

Таблица 1 – Уровни концептуальной модели цифрового завода

Уровень	Наименование	Описание
1	Цифровая фабрика	<p>Цифровая фабрика – киберфизическая система, обеспечивающие в кратчайшие сроки проектирование и производство глобально конкурентоспособной продукции нового поколения от стадии исследования и планирования, когда закладываются базовые принципы изделия, и заканчивая созданием цифрового макета, «цифрового двойника», опытного образца или мелкой серии.</p> <p>Цель цифровой фабрики – обеспечить кратчайшие сроки проектирования и разработки глобально конкурентоспособной продукции за счет цифровизации процессов.</p>
2	Умная фабрика	<p>Умная фабрика – киберфизическая система, обеспечивающие в кратчайшие сроки производство глобально конкурентоспособной продукции нового поколения от заготовки до готового изделия, отличительными чертами которого является высокий уровень автоматизации и роботизации, исключающий человеческий фактор и связанные с этим ошибки, ведущие к потере качества («безлюдное производство»). В качестве входного продукта умных фабрик, как правило, используются результаты работы цифровых фабрик.</p> <p>Цель умной фабрики – обеспечить гибкость, скорость, качество и эффективность серийного изготовления глобально конкурентоспособной продукции за счет создания роботизированного и автоматизированного («безлюдного») производства.</p>
3	Виртуальная фабрика	<p>Виртуальная фабрика – киберфизическая система, обеспечивающие в кратчайшие сроки проектирование и производство глобально конкурентоспособной продукции нового поколения за счет объединения Цифровых и (или) «Умных» фабрик в распределенную сеть. Виртуальная фабрика подразумевает наличие информационных систем управления предприятием (Enterprise Application Systems, EAS), позволяющих разрабатывать и использовать в виде единого объекта виртуальную модель всех организационных, технологических, логистических и прочих процессов на уровне глобальных цепочек поставок (поставки → производство → дистрибуция и логистика → сбыт → послепродажное обслуживание) и (или) на уровне распределенных производственных активов.</p> <p>Цель виртуальной фабрики – обеспечить скорость, качество и эффективность проектирования и производства глобально конкурентоспособной продукции за счет создания единой, распределенной сети цифровых и умных фабрик.</p>

Таблица 2 – Процессов цифровой фабрики

№	Процесс	Цифровые компоненты
1.	Реверс инжиниринг	процессы создания цифровой копии объекта по уже существующему образцу, обладающей такими же физическими характеристиками, с последующей разработкой технологии его производства и ее реализацией.
2.	Автоматизированное проектирование, разработка и моделирование изделия	Процессы проектирования разработки и моделирования изделий на базе организационно-технической системы автоматизации процессов проектирования, состоящей из распределенного комплекса технических, программных и других средств автоматизации, включающей: инженерные расчеты; создание конструкторской и технологической документации; 3D-моделирование.
3.	Автоматизированная разработка и моделирование материалов.	Процессы проектирования и имитационно-численного моделирования технологических процессов с возможностью прогнозирования новых возможных материалов и их свойств математическими методами, определяющие взаимосвязь «конструкция - состав-технология-свойства».
4.	Разработка и моделирование производственных процессов.	Процессы разработки производственных процессов и технологических операций, расчета загрузки производственных участков, создания цифровых моделей производственных систем, анализа загруженности производственных систем и их балансировка.
5.	Нормирование (трудовое и материальное).	Процессы расчета необходимых затрат труда (времени) на выполнение работ (изготовление единицы продукции, оказание услуг) отдельными работниками (группами работников) и установление на этой основе норм труда при проектировании и производстве продукции. Инструменты оценки показателей затрат труда, необходимых для выполнения конкретных объемов работ в определенных организационно-технических условиях.
6.	Проектирование и моделирование производственных участков.	Процессы проектирования и моделирования производственных систем, анализа, улучшения, поиска и сравнения альтернативных вариантов производственных маршрутов, балансировки производственных и складских систем, распределения производственных потоков между цеховыми системами.
7.	Управление инженерными данными.	Процессы управление информацией об изделии (в классе PDM/PLM систем), включающие: управление инженерными данными; управление составом изделия и документами; управление изменениями; управление техническими данными; управление конфигурациями изделий; управление процессами и потоками работ; управление хранением данных и электронным архивом.

ИПЯ, снабженцы занимаются приобретением материалов и инструментов, планово-диспетчерский отдел (ПДО) планирует загрузку производственных мощностей, что в конечном итоге приводит к выявлению потенциальных проблем в цепочке поставок на ранних стади-

ях проектирования, анализу себестоимости и принятию решений о выборе тех или иных технологических процессов.

В таблице 3 приведены цифровые компоненты «Цифровой фабрики».

Задачи, решаемые цифровой фабрикой:

Таблица 3 – Цифровые компоненты «Цифровой фабрики»

№	Цифровые компоненты	Описание
1.	Интеллектуальная система конструкторско-технологического сопровождения производства (ИС КТСП)	Система для интеграции в единый цифровой контур (платформу) на базе PDM-системы программных систем всех этапов создания деталей сборочных единиц (ДСЕ), сопряженных цифровых моделей и данных, алгоритмов достижения согласованных параметров надежности, качества и точности на основе верификации виртуальных и натуральных экспериментов. ИС КТСП содержит: - базу данных результатов численного моделирования, виртуальных и натуральных испытаний, экспериментальных исследований; - верифицированные цифровые модели конструкции ДСЕ и технологических процессов, обеспечивающие требуемые функциональные характеристики ДСЕ и повышение эффективности производства; - конечно-элементные и иные, в том числе параметрические, модели физических, тепловых, прочностных и газодинамических процессов, модели свойств материалов, технологические модели объектов цифрового производства, предназначенные для оптимизации ключевых показателей эффективности производства; - данные об апробированных технологических режимах; - управляющие программы (далее – УП) для оборудования с ЧПУ.
2.	PDM - система	Система управления данными об изделии с начала формирования требований к изделию и заканчивая передачей производственного состава в учетные системы ERP и MES.
3.	PLM-система	Системы, позволяющие отслеживать и управлять информацией о продукте с момента создания идеи и проектирования до доставки клиенту включающая в себя: хранение и управление документацией; управление рабочим процессом; контроль доступа; создание отчетности; планирование; управление цепочками поставок; контроль качества; управление стоимостью продукта; отслеживание статуса продукта.
4.	EITM - система	Сервисная модель для интеграции ИТ в бизнес-операции: обеспечение, отслеживание и проектирование бизнес-услуг в сфере ИТ, EITM также обеспечивает управление и управление безопасностью.
5.	RE - система	Система для реализации процессов реверс инжиниринга, включающие в себя программные и аппаратные средства.
6.	CAD-система	Система для автоматизации процессов проектирования и производства изделий, в том числе, двумерного, трехмерного проектирования, создания конструкторской, технологической документации.

Таблица 3 – Цифровые компоненты «Цифровой фабрики» (окончание)

7.	CAE-система	Система для осуществления инженерных расчетов и моделирования технологических процессов, включающая в себя: - моделирование условий рабочего процесса; - анализ внешних воздействий; - анализ систем управления; - анализ напряжений, динамики компонентов и узлов (анализ конечных элементов); - тепловой и жидкостной анализ с использованием принципов вычислительной гидродинамики; - кинематика и динамический анализ механизмов; - акустический анализ с использованием FEA или метода граничных элементов.
8.	CAO - система	Система многопараметрической топологической оптимизации конструкции, оптимизация формы и размера продукта при статических и динамических нагрузках.
9.	CAM-система	Система для автоматизации расчетов траекторий перемещения режущего инструмента для обработки на станках с числовым программным управлением (далее – ЧПУ) и обеспечение выдачи управляющих программ с помощью компьютера.
10.	СААМ - система	CAM-система для аддитивного производства, содержащая разработку технологических процессов, синтез управляющих программ для оборудования и моделирование процессов обработки.
11.	ММ-система	Системы, обеспечивающие процесс построения математических моделей и изучения с их помощью свойств моделируемого объекта или явления. Функционал ММ-систем включает в себя построение математической модели с учетом необходимых для анализа факторов, проверку гипотез, прогнозирование и оптимизацию объекта исследования.
12.	AR/VR – системы (технологии виртуальной и дополненной реальности)	Технологии, позволяющие с использованием устройств визуализации (очки AR/VR, мобильные планшеты и смартфоны) дополнять реальные производственные объекты информацией, организовывать доступ к документации, не отвлекаясь от рабочего процесса, а также визуализировать рабочие инструкции по выполнению производственных процессов непосредственно на объектах производства.

1. Конструкторская подготовка (модель включает процесс проектирования изделия/ДСЕ с проведением инженерных расчетов, виртуальных сборок и испытаний).

2. Разработка технологических операций (модель включает процесс изменения формы или свойств материала заготовки: механическая обработка, обработка давлением, термическая обработка, литье, сварка, аддитивные технологии)

3. Разработка технологических процессов

(модель включает все операции: основные и вспомогательные)

4. Разработка производственных процессов (модель включает основные процессы, вспомогательные процессы: ИПЯ, поставка, управление складами, человеческими ресурсами)

5. Разработка программ и методик натуральных испытаний.

Основными «цифровыми» результатами функционирования цифровой фабрики являются:

- Цифровой паспорт изделия – цифровая

модель изделия, который ассоциируется с физическим изделием с помощью идентификации (QR-кода, штрих-кода NFC). Цифровой паспорт представляет собой кортеж (набор данных), который состоит из множества классов, атрибутов, матрицы сопоставлений атрибутов классов и смежности классов. Электронные данные изделия/ДСЕ в цифровом паспорте содержат всю необходимую актуальную (in situ) информацию, характеризующую этапы КТПП, производства, испытания, эксплуатации и представляют собой передаваемые через IoT электронные документы различных форматов, графические (2D и 3D) объекты, файлы с результатами измерений и т.п. Таким образом, цифровой паспорт является «живой» электронной структурой изделия/ДСЕ, обобщающим документом, консолидирующим все технические данные об изделии, полученные по ходу реализации бизнес-процессов производства.

- Цифровой двойник материала - цифровой двойник, состоящий из цифровой модели материала и двусторонних информационных связей с материалом (при наличии материала) и (или) его составными частями. Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла материала. При создании и применении цифрового двойника материала участникам процессов жизненного цикла рекомендуется применять программно-технологическую платформу цифровых двойников.

- Цифровой двойник изделия - цифровой двойник, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия. При создании и применении цифрового двойника изделия участникам процессов жизненного цикла рекомендуется применять программно-технологическую платформу цифровых двойников.

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

Вторым уровнем цифрового завода является умная фабрика, в основе которой заложены реальные физические производственные пространства с соответствующими им цифровыми моделями (имитационными моделями) производственных систем, настраиваемыми с использованием конкретного оборудования и технологических процессов (решений), маршрутов,

объемов производства. Данные модели являются адаптируемыми к реальному ходу производства (посредством MDC-систем и датчиков) и позволяют анализировать различные сценарии производственных процессов с оценкой времени цикла для каждого технологического процесса и его текущей стоимости (оплату труда, расходы на материалы, амортизацию, инструмент и оснастку, накладные расходы).

В таблице 4 приведены процессы «Умной фабрики».

Моделирование и управление производством направлено на создание аналитических сервисов оперативного календарного планирования, учитывающих отклонения от плана и потребностей в дополнительных ресурсах для управления. Компьютерная реализация адаптивных автоматизированных систем управления производством, характеризующихся изменениями состава вектора цели и решающие следующие задачи:

- фактографическое прогнозирование по динамическим рядам и матрицам;

- сценарный анализ для прогнозной, экспертной оценки наборов возможных состояний производственной системы и цепочки поставок;

- выбор оптимальной альтернативы – для экспертного выбора наилучшего варианта альтернативного решения любой слабо структурированной проблемы;

- факторный анализ – для отбора и формирования набора показателей (факторов) существенных для управления производственной системой и цепочкой поставок;

- дискриминантный и кластерный анализ для определения во внешних и внутренних средах производства естественных групп той или иной специализации и направленности, влияющих и определяющих KPI;

- построение функциональной модели изделия, отражающей взаимосвязи между отдельными функциями и характеристиками; анализ качества изделия по всем этапам ЖЦИ, в т.ч. потребителей в процессе эксплуатации для отображения действительных функциональных возможностей;

- поддержание оптимальных режимов работы производства с помощью компьютерной техники.

В таблице 5 приведены цифровые компоненты Умной фабрики.

При создании цифрового двойника производственного процесса определяются виртуальные единицы основного оборудования, согласно спроектированного ТП. Затем организуется связь между ними на уровне входных и выходных сигналов, посылаемых между устройствами. Далее моделируются основные и вспомогательные операции (задачи) для отдельных

Таблица 4 – Процессы «Умной фабрики»

№	Процесс	Описание
1.	Моделирование и управление производством.	Процессы создания системы адаптивного автоматизированного управления производством в условиях ограниченности ресурсов, изменяющихся внешних и внутренних факторов производственной среды. Под адаптацией понимается процесс изменения структуры, параметров и алгоритмов производственной системы на основе актуальной «in situ» информации, получаемой в процессе управления, с целью достижения оптимального состояния или поведения системы при начальной неопределенности и изменяющихся условиях работы, определяемых во взаимодействии с внешней средой.
2.	Цифровая логистика и идентификация.	Процессы применения мультиагентных технологий для цифровизации логистики и цепей поставок, внедрение набора инновационных технологий, используемых в e-SCM, включающего RFID, Mobileapp, Big Data, Cloud Services, IoT, Blockchain, 3D Printing и другие цифровые технологии.
3.	Автоматизированное и роботизированное производство серийной продукции.	Процессы организации интеллектуальных производственных ячеек (ИПЯ) - функциональных производственных единиц, в состав которых входит оборудование, оснастка, транспортные линии, средства автоматизации и измерения качества, для реализации цепочки комплексных технологических решений при производстве продукции.
4.	Проведение испытаний: исследовательские, предварительные, приемочные, квалификационные.	<p>Процессы исследовательских испытания – испытания, проводимые для изучения (исследования) характеристик свойств объекта испытаний.</p> <p>Цель исследовательских испытаний:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Определение или оценка показателей качества объекта; 2. Выбор оптимальных характеристик объекта и режимов его функционирования; 3. Сравнение множества вариантов реализации объекта при проектировании; 4. Выбор существенных факторов, влияющих на показатели качества объекта. <p>Процессы предварительные – контрольные испытания опытных образцов и (или) опытных партий продукции с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.</p> <p>Процессы приемочные – контрольные испытания опытных образцов продукции или изделий единичного производства, проводимые с целью решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции на производство и (или) использованию по назначению.</p> <p>Процессы квалификационных испытаний – контрольные испытания установочной серии или первой промышленной партии, проводимые с целью оценки готовности предприятия к выпуску данного типа в заданном объеме.</p>
5.	Валидация технологий, цифровых моделей и объектов производства.	Процессы валидации – проверка правильности работы (предсказательной способности) аналитической модели а также удостоверение, что она соответствует требованиям решаемой задачи. Валидация осуществляется путем планирования и проведения экспериментов разного вида, в том числе натурные испытания проектируемых изделий.

устройство, например, извлечение из формы и перемещение роботами полученной заготовки, удаление материала поддержек, перемещение по конвейеру и т. д.

В результате моделирования получают следующие данные:

- четырехмерная (3D + время) модель автоматизированного участка;
- управляющие программы для промышленных роботов;
- алгоритм взаимодействия оборудования;
- модели технологической оснастки;

Таблица 5 – Цифровые компоненты Умной фабрики

№	Цифровые компоненты	Описание
1.	Единая цифровая платформа умной фабрики	Распределенная система – совокупность логически интегрированных и территориально распределенных элементов, языковых, программных и технических и организационных средств, предназначенных для формирования и хранения данных, обработки информации, выработки и реализации решений. Распределенная система включает в себя совокупность технических средств и программного обеспечения, а также методов обработки информации и действий персонала, обеспечивающая выполнение автоматизированной обработки информации. Используется для различных видов деятельности при принятии решений (в том числе и многокритериальных) в ситуациях, когда невозможно или затруднительно иметь автоматическую систему из-за слабой структурированности или не структурированности решаемых задач.
2.	ERP-системы	Системы для автоматизации управления цепочками поставок и учета финансовых и нефинансовых активов предприятия, включающее в себя модули управления: системами бухгалтерского учета; персоналом; логистикой; планированием и управлением производством.
3.	BI-системы	Системы для анализа больших объемов данных, обеспечивающее загрузку данных из всех доступных источников, их обработку и преобразование, прогнозирование на основе изменяющихся значений и визуализацию.
4.	MES-системы	Системы, обеспечивающее синхронизацию, координацию, анализ и оптимизацию процессов выпуска продукции на предприятии, отслеживание соответствия нормативным требованиям, сбор информации о производственном процессе на основе измерений датчиков, показаний оборудования, действий персонала и т.д. в режиме реального времени. Система включает планирование производства на основе работы систем и сотрудников, контроль параметров качества и количества отбракованных изделий; оперативное предоставление информации о ходе производства.
5.	APS-системы	Системы для управления набором параметров технологического процесса в режиме реального времени с целью сокращения потерь и увеличения эффективности производства за счет оптимизации технологических процессов.

Таблица 5 – Цифровые компоненты Умной фабрики (окончание)

6.	MDC - системы	Система мониторинга работы промышленного оборудования и производственного персонала, включает модули: - управление простоями; - управление программами для станков с ЧПУ; - управление производственными заданиями. Контроль эффективности работы оборудования, операторов, технических служб осуществляется с применением ключевых показателей эффективности (КПЭ), которые рассчитываются за определенный период и сравниваются с плановыми.
7.	QMS - системы	Системы управления качеством по циклу PDCA (аббревиатура от PLAN-DO-CHECK-ACT), направленная на предупреждения появления несоответствий и обнаружения несоответствий на этапах жизненного цикла изделий. В системе описываются критерии контроля качества всех бизнес-процессов и продукции, на базе которых создается план управления качеством (Control Plan) производства. В результате данные будут храниться не в бумажном, а в электронном виде, и пригодны для дальнейшей обработки. План управления качеством связывает производственный заказ с соответствующей технологией контроля.
8.	EAM-системы	Система для управления основными фондами, в том числе для целей оптимизации процессов управления оборудованием и сокращения затрат на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР): отслеживание состояния активов (их классификация, мониторинг производственных показателей); оптимизация процессов управления активами; планирование и прогнозирование затрат на ТОиР; управление цепочками поставок; управление документооборотом (управление запросами на ТОиР и т.п.); оценка рисков.
9.	MDM-системы	Системы, структурирующее разнородную информацию компании, объединяя ее из различных источников и систем и отображая стандартизированные данные внутри информационных систем компании.
10.	WMS-системы	Система для централизации и оптимизации управления складскими операциями за счет мониторинга складских объектов в режиме реального времени на всех этапах жизненного цикла.
11.	Система предиктивной диагностики состояния оборудования и объектов инфраструктуры	Комплекс программно-аппаратных средств, решающих задачи постоянного контроля технического состояния оборудования, прогнозирования неисправностей, на основе действующих данных, получа-

- определение и оптимизация времени производственного цикла;

- расчет производительности автоматизированного литейного участка.

Ключевым физическим компонентом умной фабрики является – интеллектуальная произ-

водственная ячейка, объектная схема которой приведена на рисунке 3.

В состав интеллектуальной производственной ячейки входит оборудование, оснастка, транспортные линии, средства автоматизации и измерения качества, для реализации цепоч-

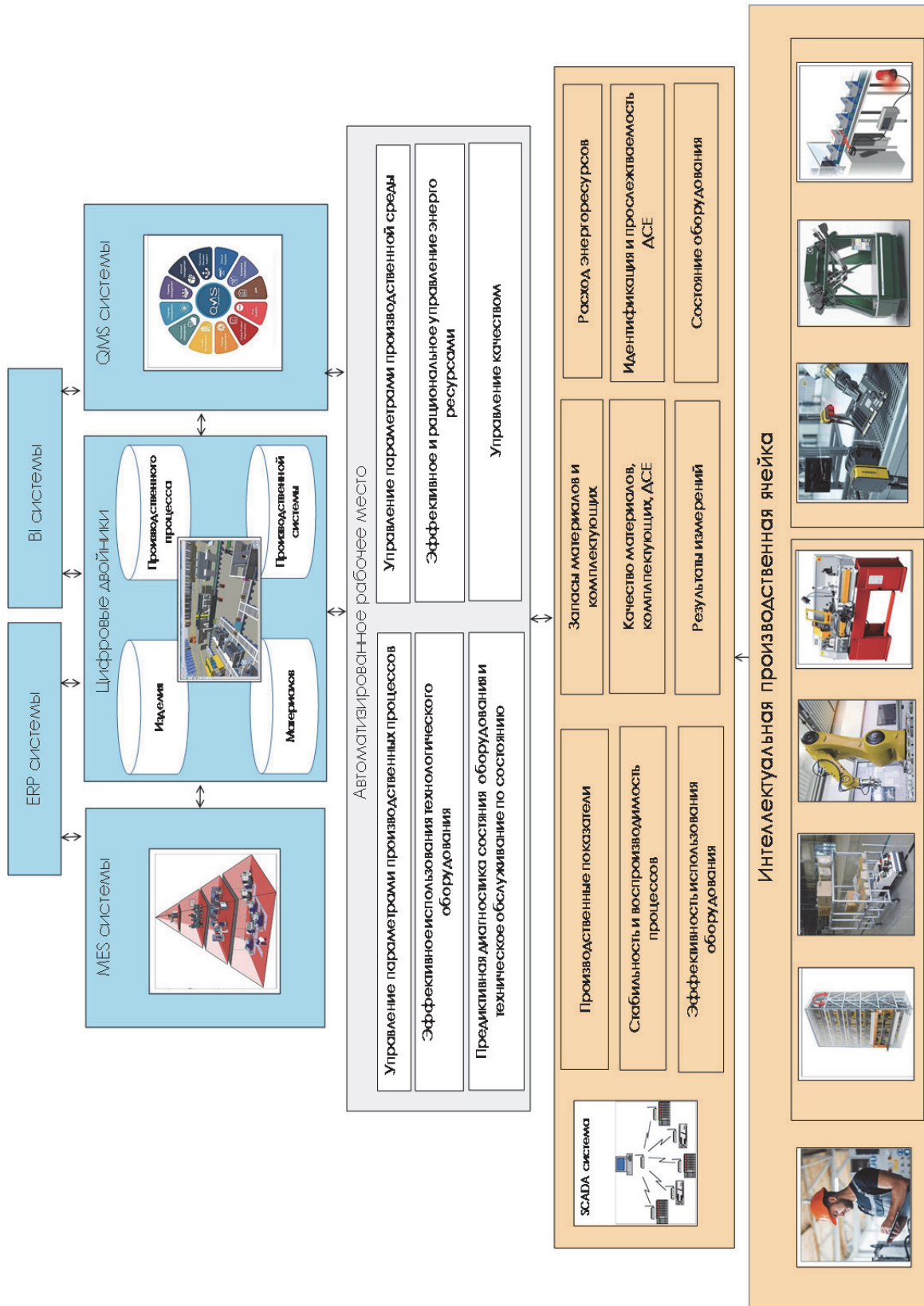


Рисунок 3 – Объектная схема взаимодействия интеллектуальной производственной ячейки

производстве продукции. Особенность ячейки – адаптация к требованиям продукции, отклонениям в производстве, возможность предиктивной диагностики технического состояния оборудования и планирования производственной мощности, контролируя использование оборудования и качество производственного

процесса. ИПЯ организованные согласно принципам модульности, оснащенные сетевой инфраструктурой, мобильными роботами.

Основными «цифровыми» результатами функционирования «умной фабрики» являются:

Цифровой двойник производственного процесса – это цифровая копия, производственного

Таблица 6 – Цифровые компоненты «Виртуальной фабрики»

№	Цифровые компоненты	Описание
1.	ВРМ-системы	Системы для создания схем и алгоритмов взаимодействия сотрудников, осуществления документооборота, отслеживания этапов взаимодействий в бизнес-процессах, выявления узких мест и недостатков системы
2.	CRM-системы	Системы, представляющие собой сервис, объединяющий ПО для сбора данных о клиентах, управления сделками, задачами и проектами, анализа эффективности взаимодействий с клиентами и прогнозирования продаж
3.	SCM-системы	Системы, основной задачей которых является мониторинг цикла производства товара или услуги на всех этапах жизненного цикла. Ключевым эффектом имплементации SCM-систем в производственные процессы является оптимизация процессов планирования закупок, производства. В основе SCM-систем лежат две подсистемы, взаимодействующие между собой: SCE-подсистема – система выполнения цепочек поставок: отслеживание заказов (OMS-системы), управление перевозками (TMS-системы) и контроль складских операций (WMS-системы); SCP-подсистема – система планирования цепочек поставок: планирование, оптимизация и анализ цепочек поставок и использования сырья в соответствии с календарным графиком; прогнозирование сроков и объемов поставок.
4.	SLM-системы	Системы, в основе которых прописываются регламенты, ведётся контроль качества оказанных услуг, определяются нарушения сроков, для регламентирования уровня сервиса и контроля соответствия услуг ожиданиям потребителей.

процесса, включающего в себя людей, рабочих мест, систем и устройств, используемых в рамках процесса. Цифровые двойники объединяют искусственный интеллект, машинное обучение и программный анализ с графами пространственных сетей для создания живых цифровых имитационных моделей, которые обновляются и меняются по мере изменения их физических аналогов.

- Цифровой двойник производственной системы - это цифровая копия производственной системы, включающей в себя совокупность производственных процессов людей, рабочих мест,

систем и устройств, которые могут использоваться для различных целей, в рамках производственной системы.

Третьем уровнем цифрового завода является виртуальная фабрика, распространенная на цепь поставок и цепь предприятий по сервису и эксплуатации. Единая цифровая платформа виртуальной фабрики предназначена для анализа информационной ситуации и выработки управленческих решений путем коммуникации между физическими сущностями и их цифровыми моделями - высокотехнологичный диспетчерский центр (мониторинг)

Хаб для сбора и анализа данных, обеспечивающий видимость цепи поставок для принятия решений – прозрачность и оптимизация цепей поставок.

Единая цифровая платформа виртуальной фабрики решает две основные задачи:

- Анализ информационной ситуации, в которой находится объект управления.

- Выработка набора управленческих решений для последующего их принятия в главном центре управления.

В таблице 6 приведены цифровые компоненты «Виртуальной фабрики».

Виртуальная фабрика обеспечивает единое информационно-технологическое пространство для генерации и отслеживания информации, параметров материальных потоков и/или стоимости в процессе мониторинга ключевых процессов в цепях поставок.

Таким образом, решена важная научная задача, направленная на обобщение, систематизацию и структурирование накопленного опыта в области создания цифрового завода. В статье приведено описание разработанной концептуальной модели цифрового завода. Разработаны и описаны принципы создания и функционирования цифрового завода, разработаны структурные, процессные и объектные модели цифрового завода и его составляющих цифровой фабрики, умной фабрики и виртуальной фабрики. Разработанная концептуальная модель цифрового завода описывает взаимосвязь всех процессов цифровой фабрики, умной фабрики и виртуальной фабрики, а также цифровых и физических компонентов. Необходимо отметить, что в «центре» любого цифрового завода находится персонал организации, который, для решения функциональных задач, направленных на создание высокотехнологичной продукции, использует всю созданную систему. Данный персонал должен владеть требуемыми компетенциями и быть готовым их применять в условиях цифровизации и роботизации производственных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57700.37– 2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».
2. ГОСТ Р 59799 – 2021 «Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0)».
3. Разъяснения к объявлению о проведении отбора на предоставление грантов в форме субсидий из федерального бюджета на поддержку программ развития передовых инженерных школ, обеспечение прохождения практик и стажировок, в том числе в формате работы с наставниками, для талантливых студентов лучших магистерских программ, обеспечение повышения квалификации и (или) профессиональной переподготовки, в том числе в форме стажировки на базе высокотехнологичных компаний, для профессорско-преподавательского состава и управленческих команд передовых инженерных школ, а также образовательных организаций высшего образования, реализующих образовательные программы инженерного профиля, в рамках реализации федерального проекта «Передовые инженерные школы» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». – URL: https://engineers2030.ru/upload/iblock/891/xed8rsgurf9dnhju0tcg99w9xv1du3h/Obyavlenie_PISH_28_04_22-dlya-pdf.pdf (дата обращения 20.05.2023)
4. ПНСТ 429–2020 Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения.
5. Боровков, А.И. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии / А.И. Боровков, Л.В. Лысенко, П.Н. Биленко и др. – М., 2017.
6. Боровков, А.И. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки В сборнике: Цифровая трансформация экономики и промышленности. Сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов. – Под редакцией А.В. Бабкина. – 2019. – С. 234–245.
7. Боровков, А.И. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад (сентябрь 2019 года) / А.И. Боровков, А.А. Гамзикова, К.В. Кукушкин, Ю.А. Рябов – СПб., 2019.
8. Боровков, А.И. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, В.М. Марусева, В.Ю. Кулемин // Вестник Восточно-Сибирской Открытой Академии. – 2019. – № 32. – С. 2.

CONCEPTUAL MODEL OF THE DIGITAL PLANT OF MANUFACTURING ENTERPRISES IN THE AEROSPACE INDUSTRY

© 2023 I.S. Tkachenko, D.V. Antipov, A.V. Kupriyanov, V.G. Smelov, V.V. Kokareva

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

The article discusses the conceptual model of a digital factory of an aerospace manufacturing enterprise, describes the key elements and their relationship.

Keywords: cyber-physical system, digital factory, smart factory, virtual factory, digital factory, cyber-physical testing ground.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-90-106

EDN: LGNIZM

REFERENCES

1. GOST R 57700.37– 2021 «Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Cifrovye dvojniki izdelij. Obshchie polozheniya».
2. GOST R 59799 – 2021 «Umnoe proizvodstvo. Model' etalonnoj arhitektury industrii 4.0 (RAMI 4.0)».
3. Raz'yasneniya k ob'yavleniyu o provedenii otbora na predostavlenie grantov v forme subsidij iz federal'nogo byudzheta na podderzhku programm razvitiya peredovyh inzhenernyh shkol, obespechenie prohozhdeniya praktik i stazhirovok, v tom chisle v formate raboty s nastavnikami, dlya talantlivykh studentov luchshih masterskih programm, obespechenie povysheniya kvalifikacii i (ili) professional'noj perepodgotovki, v tom chisle v forme stazhirovki na baze vysokotekhnologichnyh kompanij, dlya professorsko-prepodavatel'skogo sostava i upravlencheskih komand peredovyh inzhenernyh shkol, a takzhe obrazovatel'nyh organizacij vysshego obrazovaniya, realizuyushchih obrazovatel'nye programmy inzhenernogo profilya, v ramkah realizacii federal'nogo proekta «Peredovye inzhenernye shkoly» gosudarstvennoj programmy Rossijskoj Federacii «Nauchno-tehnologicheskoe razvitie Rossijskoj Federacii». – URL: https://engineers2030.ru/upload/iblock/891/xed8rsgurfg9dnhju0tcg99w9xv1du3h/Obyavlenie_PISH_28_04_22-dlya-pdf.pdf (data obrashcheniya 20.05.2023)
4. PNST 429–2020 Umnoe proizvodstvo. Dvojniki cifrovye proizvodstva. CHast' 1. Obshchie polozheniya.
5. Borovkov, A.I. Cifrovoye proizvodstvo. Metody, ekosistemy, tekhnologii / A.I. Borovkov, L.V. Lysenko, P.N. Bilenko i dr. – M., 2017.
6. Borovkov, A.I. Cifrovye dvojniki: opredelenie, podhody i metody razrabotki V sbornike: Cifrovaya transformaciya ekonomiki i promyshlennosti. Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferencii s zarubezhnym uchastiem / A.I. Borovkov, Yu.A. Ryabov. – Pod redakciej A.V. Babkina. – 2019. – S. 234-245.
7. Borovkov, A.I. Cifrovye dvojniki v vysokotekhnologichnoj promyshlennosti. Kratkij doklad (sentyabr' 2019 goda) / A.I. Borovkov, A.A. Gamzikova, K.V. Kukushkin, Yu.A. Ryabov – SPb., 2019.
8. Borovkov, A.I. Cifrovye dvojniki i cifrovaya transformaciya predpriyatij OPK / A.I. Borovkov, YU.A. Ryabov, K.V. Kukushkin, V.M. Maruseva, V.Yu. Kulemin // Vestnik Vostochno-Sibirskoj Otkrytoj Akademii. – 2019. – № 32. – S. 2.

Ivan Tkachenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Rector of Samara University, Director of the Advanced Aerospace Engineering School.

E-mail: tkachenko.is@ssau.ru

Dmitry Antipov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Aircraft Production and Quality Management in Mechanical Engineering of Samara University. E-mail: antipov.dv@ssau.ru

Alexander Kupriyanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Informatics and Cybernetics of Samara University. E-mail: akupr@ssau.ru

Vitaly Smelov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Engines and Power Plants of Samara University. E-mail: smelov@ssau.ru

Kokoreva Victoria, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engine Production Technology of Samara University.

E-mail: kokareva.vv@ssau.ru