

Принципы разработки IT-решений цифровизации современного производства ракетно-космических предприятий

Principles of development of IT solutions for digitalization of modern production of rocket and space enterprises

Статья публикуется по материалам доклада, представленного на Форуме по цифровизации ИТОПК-2024 в г. Архангельске. Работа посвящена вопросам информационной поддержки разработки, модернизации, сопровождения производств ракетно-космических предприятий на основе комплекса технологий цифровых двойников производства. В статье представлены результаты разработки программных систем имитационного моделирования и комплекса по разработке цифровых двойников производства машиностроительных предприятий. Приведены результаты выполнения проектов с использованием разработанных систем. Показаны проблемные вопросы поддержки и развития, а также организация современных производств ракетно-космических предприятий. Обозначены дальнейшие работы по развитию разработанных программных комплексов и их внедрению в промышленность.

The article is published based on the materials of a report presented at the ITOPK-2024 Digitalization Forum in Arkhangelsk. The work is devoted to the issues of information support for the development, modernization, and maintenance of production facilities of rocket and space enterprises based on a set of digital twins technologies of production. The article presents the results of the development of software systems for simulation modeling and a complex for the development of digital twins of machine-building enterprises. The results of the projects completed using the developed systems are presented. The problematic issues of support and development, as well as the structure of modern rocket and space productions, are revealed. Further work on the development of the presented software complexes and their introduction into industry is outlined.

Ключевые слова: системы управления и поддержки производства, информационная поддержка, ракетно-космическая промышленность, цифровые двойники производства

Keywords: production management and support systems, information support, rocket and space industry, digital twins of production



**КАБАНОВ
АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

К.т.н., доцент, менеджер комплексных проектов отдела операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

ORCID: 0000-0003-1989-0499

E-mail: KabanovAA@agat-roscosmos.ru

**KABANOV
ALEXANDER**

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, complex project manager of Operational Efficiency Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"



ФЕДОРОВ ИЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВИЧ

К.т.н., доцент, главный эксперт отдела операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: FedorovIA@agat-roscosmos.ru

FEDOROV ILYA

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, chief expert of Operational Efficiency Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"



ЛИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Начальник Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: LisovAA@agat-roscosmos.ru

LISOV ALEXEY

Head of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"



МОРИЧЕВ МАКСИМ ВИКТОРОВИЧ

Менеджер комплексных проектов отдела операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: MorichevMV@agat-roscosmos.ru

MORICHEV MAKSIM

Complex project manager of Operational Efficiency Department of Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC "Organization "Agat"

Для цитирования: Кабанов А.А. Принципы разработки IT-решений цифровизации современного производства ракетно-космических предприятий / А.А. Кабанов, И.А. Федоров, А.А. Лисов, М.В. Моричев // «Экономика космоса». – 2024. – № 10. – С. 12-27. – DOI 10.48612/agat/space_economics/2024.03.10.02

Введение

Конкуренцию технологиям управления данными об изделии в последние годы все больше составляют так называемые «цифровые двойники» (далее – ЦД), которые в частности применяются для разработки и эксплуатации производственных систем предприятий (далее – ПСП). Для ЦД производств уже появилась своя нормативная база в виде серии международных стандартов^{1, 2}, в которой представлена архитектура цифрового двойника производства и базовые функции компонентов этой архитектуры. В зарубежной практике этот стандарт нашел свое применение при использовании ЦД ПСП для различных прецедентов на этапе эксплуатации производственных систем [1]. Однако практика использования ЦД ПСП для задач разработки нового или модернизации существующего производства столкнулась с проблемой их регулярного применения.

Дело в том, что поведенческие особенности цифровых двойников формируются в большинстве случаев с использованием технологий имитационного моделирования, использующих агентные, дискретно-событийные и системно-динамические парадигмы. Эти технологии хорошо зарекомендовали себя для решения задач разработки оптимальной конфигурации нового или модернизации существующего производства. Тем не менее, опыт показывает, что они плохо применимы на стадии эксплуатации производственной системы. Проблема регулярного применения цифровых двойников производств заключается в том, что циклы процессов принятия решений на основе результатов анализа состояния цифрового двойника от его разработки до внедрения достаточно длительные, чтобы оперативно реагировать на изменения в производстве.

Основная часть

Особенностями текущего состояния машиностроительных производств предприятий ракетно-космической промышленности (далее – РКП) являются:

- высокая степень неопределенности программы производства;
- неустойчивость кооперации и цепочек поставок в части качества продукции и своевременного обеспечения материалами и покупными комплектующими изделиями (далее – ПКИ);
- сложность и наукоемкость продукции, уникальные процессы, во многих случаях неустойчивость

технологии;

- сложность и гетерогенность производства как места концентрации и пересечения потоков разной природы;
- высокая степень изменчивости как внешних факторов, которые не поддаются управлению, так и внутренних, возможности управления которыми ограничены;
- слабая степень зрелости информационной среды использования ЦД ПСП и уровня формализации процессов на производстве, равно как и существенная зависимость от человеческого фактора;
- во многом проектный характер производств РКП, который требует повышения гибкости производственной системы.

С другой стороны, в условиях постоянно растущей конкуренции на рынке наукоемкой продукции к производственной системе предъявляются следующие обязательные к выполнению требования:

- кратное увеличение скорости реакции производства на изменения рыночной конъюнктуры, что необходимо для преодоления инерционности производства при частой смене объемов и номенклатуры производственных заказов. Здесь следует отметить, что указанную инерционность определяют два процесса: первый – это разработка проектных целевых конфигураций ПСП, второй – имплементирование решений проектных целевых конфигураций ПСП в реальном производстве;
- кратное сокращение циклов производства продукции, обеспечивающее конкурентоспособные сроки поставки готовой продукции потребителю;
- повышение серийности производства конфигурируемых изделий, обеспечивающее необходимую эффективность ПСП.

К сожалению, существующие на рынке системы автоматизации производства различных классов, решающих различные взаимосвязанные задачи управления ресурсами предприятия (ERP), планирования и диспетчеризации производственных потоков и производственных мощностей на различных уровнях его представления (APS, MES, MDC, SCADA), сейчас уже не позволяют эффективно обеспечивать актуальные требования к ПСП по указанным выше причинам. Сформированные еще для потребностей прошлых поколений производств, модели производства и алгоритмы, реализованные

¹ ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles [Электронный ресурс] // ISO: Global standards for trusted goods and services: [caum]. [2021]. URL: <https://www.iso.org/standard/75066.html> (дата обращения: 14.11.2024).

² ПНСТ 429-2020 «Умное производство. Цифровые двойники. Часть 1. Общие положения». – М.: Стандартинформ. – 25 с.

в этих системах, нерелевантны современному производству.

Кроме этого, за рамками промышленных систем до сих пор остаются области (на рис. 1 отмечены как «белые» пятна недостаточной информационной поддержки ПСП), связанные:

- с получением проектного облика ПСП (обозначено на рис. 1 цифрами 1, 2, а также белые области в цикле PDCA Деминга-Шухарта), решения по которому традиционно формировались с использованием систем класса САРР на начальных стадиях жизненного цикла (далее – ЖЦ) ПСП в рамках подготовки производства. Современные требования диктуют постоянное обновление проектного облика целевой конфигурации ПСП в зависимости от внешних и внутренних факторов;
- с учетом влияния внешнего контура производственно-логистической системы (ПЛС) на ПСП (обозначено на рис. 1 цифрой 3), что требует выхода ERP-решений за контур предприятия.

К обозначенным трем аспектам добавляются еще три, которые определяют скорость, качество разработки проектных конфигураций ПСП и поддержку их в дальнейшем: автоматизация создания цифровых моделей и цифровых двойников; управление моделями и данными; обработка больших массивов данных (обозначено на рис. 1, соответственно цифрами 4, 5, 6).

Для проектирования конфигурации ПСП, особенно для задач разработки нового или модернизации существующего производства, хорошо зарекомендовали себя цифровые двойники, разрабатываемые под каждое конкретное производство. Исследуются эти цифровые двойники с использованием аппарата имитационного моделирования. Однако опыт показывает, что они применимы только для проектных задач разработки производственных систем, но слабо применимы на стадии эксплуатации производства.

Основная причина эпизодического применения цифровых двойников заключается в том, что их построение и анализ – это достаточно трудоемкий процесс с длительным циклом реализации, из-за чего результаты исследования оказываются неактуальными, если изменения на производстве происходят достаточно часто. Весь цикл процесса цифрового двойника производства складывается из циклов последовательно исполняемых процедур: построение модели ЦД ПСП, исследование модели, определение рациональной конфигурации производства и внедрение решений.

Повышение эффективности использования ЦД на этапе эксплуатации ПСП в первую очередь связано с повышением эффективности двух наиболее трудоемких процедур. Это, во-первых, сбор, преобразование и консолидация данных для построения моделей ЦД ПСП из различных распределенных центров их



Рис. 1. Базовые три (1, 2, 3) и дополнительные три (4, 5, 6) аспекта, указывающие на недостаточность информационной поддержки существующими IT-решениями в области производства.

Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

управления с учетом, как правило, их достаточно низкого качества, а во-вторых – процедура обработки больших массивов данных ЦД, требующая использования потенциала технологий искусственного интеллекта.

Существенным является также аспект взаимодействия лиц, принимающих решение, с системой управления ЦД ПСП. Руководителям разных уровней необходима информация о производстве разной степени детализации, соответствующей уровню рассмотрения (представления) производства. При этом важно, чтобы эти уровни представления производства были согласованы между собой. Разным службам требуется информация в разных разрезах, что обуславливает необходимость обеспечивать настраиваемый вывод данных ЦД ПСП за интересующий период времени, в частности формировать актуальный цифровой паспорт предприятия.

Характеристика термина «Цифровой двойник производства»

Необходимо дать пояснения относительно самого термина «цифровой двойник производства», поскольку до сих пор нет единого мнения в его определении [2].

С одной стороны, в публикациях и публичных выступлениях цифровым двойником производства именуют любую модель, которая используется для его оценки, с другой, уже несколько лет существует нормативная база, где дается однозначно интерпретируемое определение цифрового двойника производства [3].

Опыт работы авторов статьи по проектированию и оценке эффективности машиностроительных производств позволил сформировать прикладное, основанное на стандарте и используемое здесь определение, суть которого раскрывается в ряде публикаций [4-7]. Краткое определение ЦД ПСП: цифровой двойник производства – это комплекс данных и моделей различной природы, достаточных для эффективного решения задач оценки и управления этим производством. При этом требования по синхронизации с реальным производством, учитывая текущий уровень зрелости этой технологии и готовности инфраструктуры, также определяются в соответствии с поставленными задачами.

Разработка и эксплуатация программных систем для решения задач моделирования производства из опыта АО «Организация «Агат»

Специалистами АО «Организация «Агат» выполнен ряд проектов по оценке и анализу производств предприятий РКП и частных компаний с широким использованием методов математического и цифрового моделирования.

В поддержку этой деятельности в организации разрабатываются инструментальные средства – программное обеспечение (ПО) для цифрового моделирования производственных систем. На данный момент существуют два таких программных продукта:

1. Система Динамического Моделирования производственно-логистических процессов предприятий машиностроения (далее – СДМ) [8].
2. Автоматизированная Информационная Система моделирования производств (далее – АИС МП).

Оба этих программных продукта в совокупности образуют контур трех типов систем, обеспечивающих реализацию технологий цифровых двойников производств:

- система имитационного исследования ЦД ПСП;
- система расчета производственного расписания («Планировщик»), использующая различные аналитические алгоритмы MES и APS;
- система построения и управления ЦД ПСП.

Для каждого из выделенных типов систем специалистами-разработчиками пройден путь в несколько этапов развития, основные вехи которых представлены на рис. 2.

В настоящее время в промышленной эксплуатации состоит моделирующий комплекс разработки и динамического исследования цифровых двойников производств СДМ, который применяется на практике при реализации проектов повышения эффективности машиностроительных производств, а также при разработке проектов новых или модернизируемых производств.

Автоматизированная Информационная Система моделирования, исследования, планирования машиностроительных производств АИС МП, выполняющая функции построения, сопровождения и эксплуатации ЦД ПСП для решения задач анализа, планирования и управления производственной деятельностью, находится в данный момент в опытной эксплуатации.

С помощью СДМ выполнено более десяти проектов по решению промышленных задач в области оценки, анализа и разработки рациональных конфигураций производств разного уровня детализации и различной степени сложности, в том числе построены цифровые двойники участков, цехов, заводов, производственных объединений.

В СДМ объединены возможности аналитического планирования, имитационного моделирования и разработки моделей производственных систем с функцией валидации исходных данных. Функциональные модули СДМ представлены на рис. 3.

Разработка СДМ продолжается, в настоящее время сформирована методическая база для перехода

2021 г. - н.в.



Рис. 2. Этапы развития инструментальных средств построения, исследования и управления цифровыми двойниками производств, разработанными в разное время специалистами по цифровому моделированию организации. Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

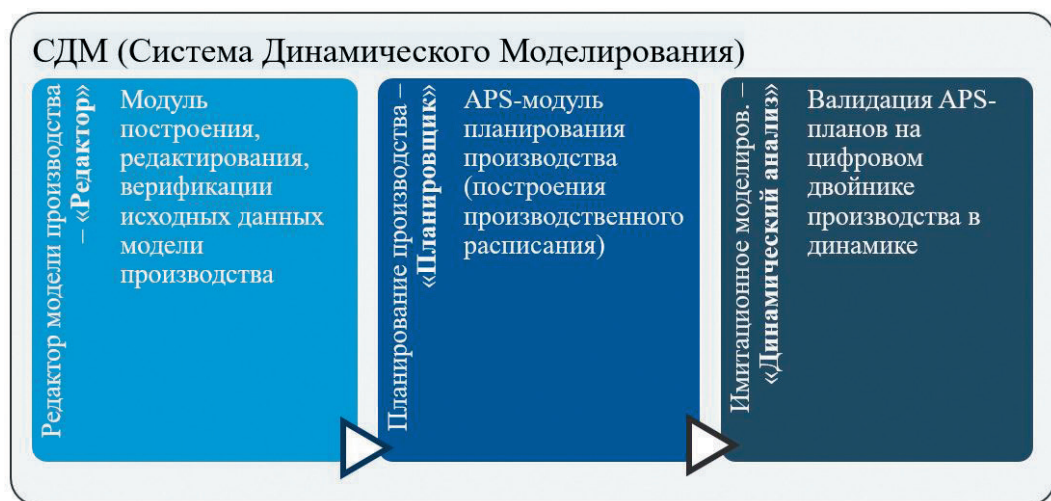


Рис. 3. Функциональные модули СДМ. Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

к следующему качественно иному этапу развития (рис. 4) – планируется реализация версии, которая позволит осуществлять поддержку производства на стадии эксплуатации, в том числе с использованием технологий виртуальной реальности AR/VR с интеграцией в IT-ландшафт производственного контура. Кроме этого, СДМ станет кроссплатформенным решением с поддержкой операционных систем класса Unix.

Анализ опыта применения СДМ показал, что зна-

чительная часть времени на их реализацию затрачивается на подготовку, управление данными моделей ЦД ПСП. Длительность этих процедур при нескольких десятках вариантов исследуемых моделей ПСП достигает 70% от общей длительности реализации проекта. Так, количество вариантов сценариев экспериментов и конфигураций ЦД ПСП по ряду проектов превышало сотню экземпляров. Для управления номенклатурой ЦД ПСП, множеством их конфигураций, вариантов

сценариев экспериментов, а также для управления массивами исходных данных и результатов моделирования в АО «Организация «Агат» начал разрабатываться программный комплекс АИС МП, который использует СДМ в качестве сервиса для динамического моделирования разработанного конкретной конфигурации цифрового двойника. АИС МП с одной стороны является системой – поставщиком исходных данных для построения и исследования ЦД ПСП в СДМ, а с другой стороны – системой – потребителем результатов исследования.

Для определения функционала комплекса АИС МП в части сбора и консолидации данных ЦД ПСП было проведено обследование информационного и ИТ-ландшафтов более десяти предприятий Госкорпорации «Роскосмос», на основании которого были разработаны концептуальные решения, в дальнейшем реализованные в отдельных программных компонентах (подсистемах) комплекса:

- подсистема структурирования и хранения данных информационных моделей производственных систем;
- подсистема управления и организации работы с ЦД ПСП с функциями визуализации и редактирования информационных моделей производственных систем;
- подсистема анализа производственных систем, включая расчет и анализ производственно-экономических показателей;
- подсистема интеграции с внешними информационными системами.

Основные функции АИС МП:

1. Автоматизация сбора, хранения и актуализации

исходных данных для моделирования производственных систем.

2. Конфигурирование моделей производственных систем в зависимости от типа решаемой задачи и уровня представления производственных систем.
3. Автоматизация процессов сбора, хранения и актуализации результатов моделирования производственных систем.
4. Автоматизация расчетов производственно-экономических показателей производственных систем и их анализа.
5. Автоматизация процесса поиска оптимальных конфигураций производственных систем.
6. Автоматизация процессов передачи результатов расчетов во внешние системы для принятия управленческих решений.
7. Автоматизация процессов управления данными производственных паспортов предприятий.
8. Автоматизация процессов управления справочниками данных производственных систем.

Для тестирования возможностей выполнения прикладных задач создан комплексный макет (имитатор) АИС МП, в котором была выполнена интеграция всех его подсистем. При этом для решения задачи моделирования и исследования ЦД ПСП в АИС МП был реализован проектный режим, а для выгрузки необходимой информации в разрезе изделий и производственных подразделений, а также формирования цифрового паспорта предприятия по интересующим разделам – справочный режим.

Для управления цифровыми двойниками произ-

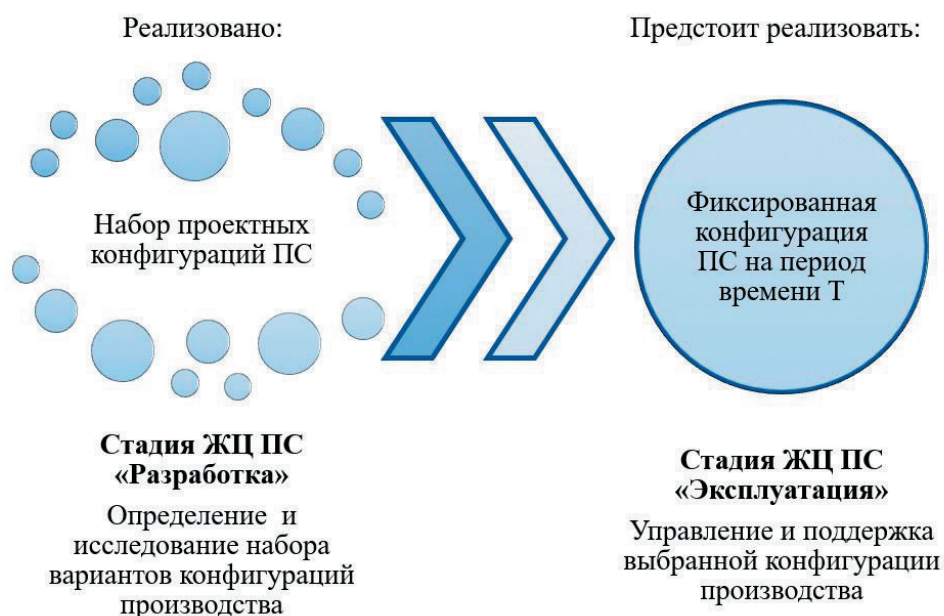


Рис. 4. Следующий этап развития СДМ.

Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

водств АИС МП предоставляет следующие возможности:

- создания проектов как логической организации ЦД ПСП;
- связывания с проектами данных результатов исследований ЦД ПСП;
- управления импортом исходных данных для построения моделей ЦД ПСП в виде пакетной и выборочной их загрузки из систем поставщиков;
- преобразования исходных данных в соответствии с требуемым составом и форматом представления для построения моделей ЦД ПСП;
- управления критериями сбора данных результатов исследования ЦД ПСП для расчета и анализа производственно-экономических показателей.

Дальнейшее развитие АИС МП планируется в части переноса системы на платформу Unix-подобных операционных систем, встраивания в качестве отдельного сервиса в цифровые платформы интегрированных структур (холдингов, объединений, корпораций) и доработки следующих функциональностей:

- автоматизированного и автоматического формирования моделей цифровых двойников;
- использования интеллектуальных алгоритмов анализа исходных данных и формирования заключений о возможности построения ЦД для решения поставленных задач моделирования на массиве исходных данных;
- использования алгоритмов автоматизированной агрегации и детализации уровней представления производства с последующим формированием согласованных динамических моделей производства;

- использования интеллектуальных алгоритмов оптимизации производства по заданным критериям;
- управления разработкой отчетных форм и формирования цифрового паспорта за выбранные периоды времени.

Информационное взаимодействие подсистем АИС МП, используемой в качестве сервиса, в архитектуре IT-контура корпорации представлено на рис. 5, где также показаны сервисные системы контура корпорации, системы контура предприятия и система динамического моделирования СДМ.

Планируется реализация следующих потоков информационного взаимодействия между предприятиями, корпорацией, АИС МП и СДМ:

1. Передача исходных данных для моделирования производственной системы предприятия корпорации от самой корпорации.
2. Получение результатов моделирования производственной системы предприятия корпорации от лица самой корпорации.
3. Передача исходных данных для моделирования производственной системы предприятием корпорации.
4. Получение результатов моделирования производственной системы предприятием корпорации.
5. Загрузка нормализованных исходных данных или результатов моделирования производства в подсистему «Хранения» АИС МП.
6. Передача подготовленных исходных данных в СДМ для построения модели конфигурации производственной системы.

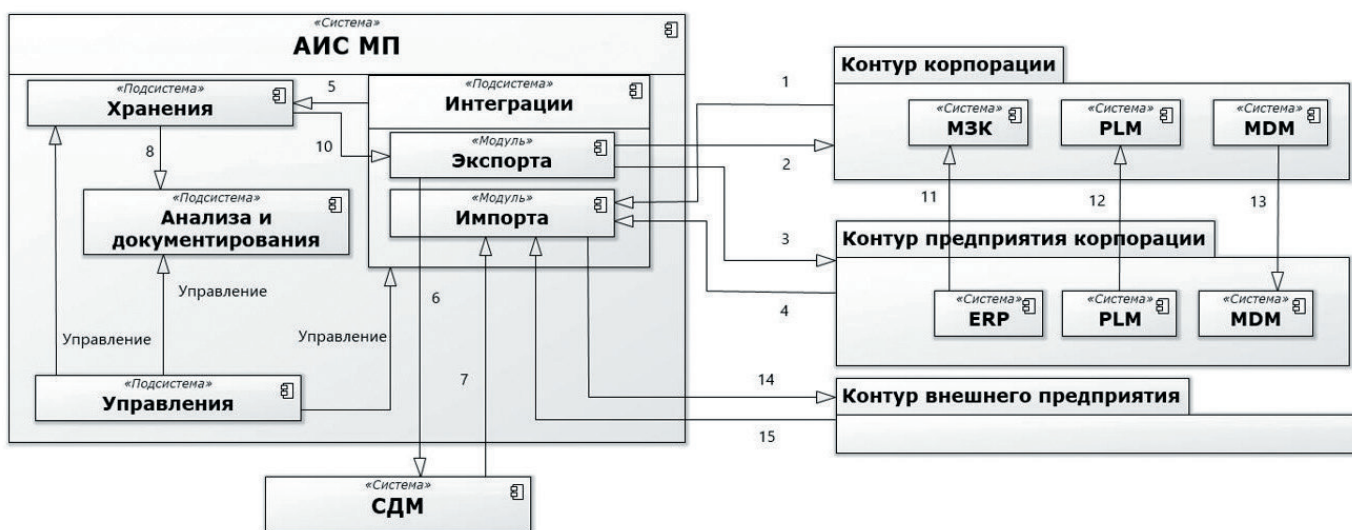


Рис. 5. Информационное взаимодействие подсистем АИС МП в качестве сервиса в IT-контуре корпорации, где:

МЗК – система межзаводской кооперации корпорации;

СДМ – система динамического моделирования.

Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

7. Передача результатов моделирования в формате табличных файлов в подсистему «Интеграции» АИС МП.
8. Передача массива выборки данных результатов моделирования для расчета производственно-экономических показателей, их анализа и визуализации.
9. Организация потоков управления подсистемами.
10. Передача данных результатов моделирования для экспорта в потребляющую систему.
11. Передача и валидация на стороне корпорации данных о производственных ресурсах предприятия.
12. Передача и валидация на стороне корпорации конструктивно-технологических данных об изделиях, выпускаемых или предполагаемых к выпуску.
13. Согласование мастер-данных конструкторско-технологического и производственного характера. При этом управляющая модель мастер-данных находится в IT-контуре корпорации.
14. Передача исходных данных для моделирования производственной системы внешним предприятием.
15. Получение результатов моделирования производственной системы внешним предприятием.

Принципы разработки цифровых двойников

Эффективность использования цифрового двойника производства во многом определяется принципами его построения, которые задают состав и структуру модели производственной системы.

Принцип системности модели – постановка задачи исследования должна соответствовать варианту использования ПСП, который формируется при рассмотрении в контексте ее системного окружения. Этот контекст задается структурой связей рассматриваемой ПСП с системами, потребляющими результаты ее деятельности (система-потребитель), и с системами, обеспечивающими ее функционирование (обеспечивающая система). При рассмотрении продукта и системы производства, потребляющей системой является продуктовая система, а обеспечивающая система – это производственная система. При рассмотрении системы производства и информационной системы, потребляющей является производственная система, обеспечивающей – информационная система, которая осуществляет информационную поддержку процессов ее жизненного цикла, в частности путем построения и исследования ее программными механизмами цифровых двойников производств.

Взаимодействие систем реализуется относительно их состояний или стадий ЖЦ. Комбинация стадий рассматриваемых систем позволит определить варианты

использования цифровых двойников производств, а также сами цели управления ими (см. рис. 6).

Поскольку конфигурация обеспечивающей системы формируется на основе требований конфигурации системы-потребителя, то между системами формируются связи «наследования конфигураций» – требования потребляющей системы определяют конфигурацию обеспечивающей. При построении ЦД ПСП это означает, что при построении моделей ЦД необходимо учитывать эти связи путем формирования правил наследования конфигураций. В дальнейшем эти правила могут быть формализованы и использованы в процессе построения моделей ЦД для его автоматизации, что существенно повысит производительность использования цифровых двойников производств и обеспечит необходимую основу для управления производственной системой в непрерывном режиме эксплуатации.

Принцип типизации задач. Предполагает выделение трех типов задач при исследовании ПСП и последовательное их решение. Необходимость решения следующей задачи этой последовательности определяется результатами решения предыдущей задачи. Ввиду того, что каждая последующая задача по трудоемкости существенно превосходит предыдущую, применение такого принципа позволит сократить длительность процесса моделирования ЦД ПСП путем исключения на ранних стадиях исследования непригодных для исследования эффективности конфигураций ПСП.

Типы задач по порядку следования в последовательности решения:

1. Задачи определения принципиальной возможности изготовления заданной номенклатуры изделий. Решаются эти задачи путем анализа технических возможностей средств производства на предмет удовлетворения требованиям к изготавливаемой номенклатуре продукции. Для решения такого типа задач разрабатывается и исследуется цифровой двойник ПСП изготовления типа изделия.
2. Задачи определения достаточности производственных мощностей для изготовления номенклатуры продуктов в заданных объемах. Здесь проводится анализ соответствия производственных мощностей требуемым объемам производства, при этом используется цифровой двойник ПСП изготовления изделий одного типа в заданных объемах.
3. Задачи определения эффективности использования производственных мощностей. Для задач этого типа применяются цифровые двойники производства всей номенклатуры разных изделий в требуемых объемах.

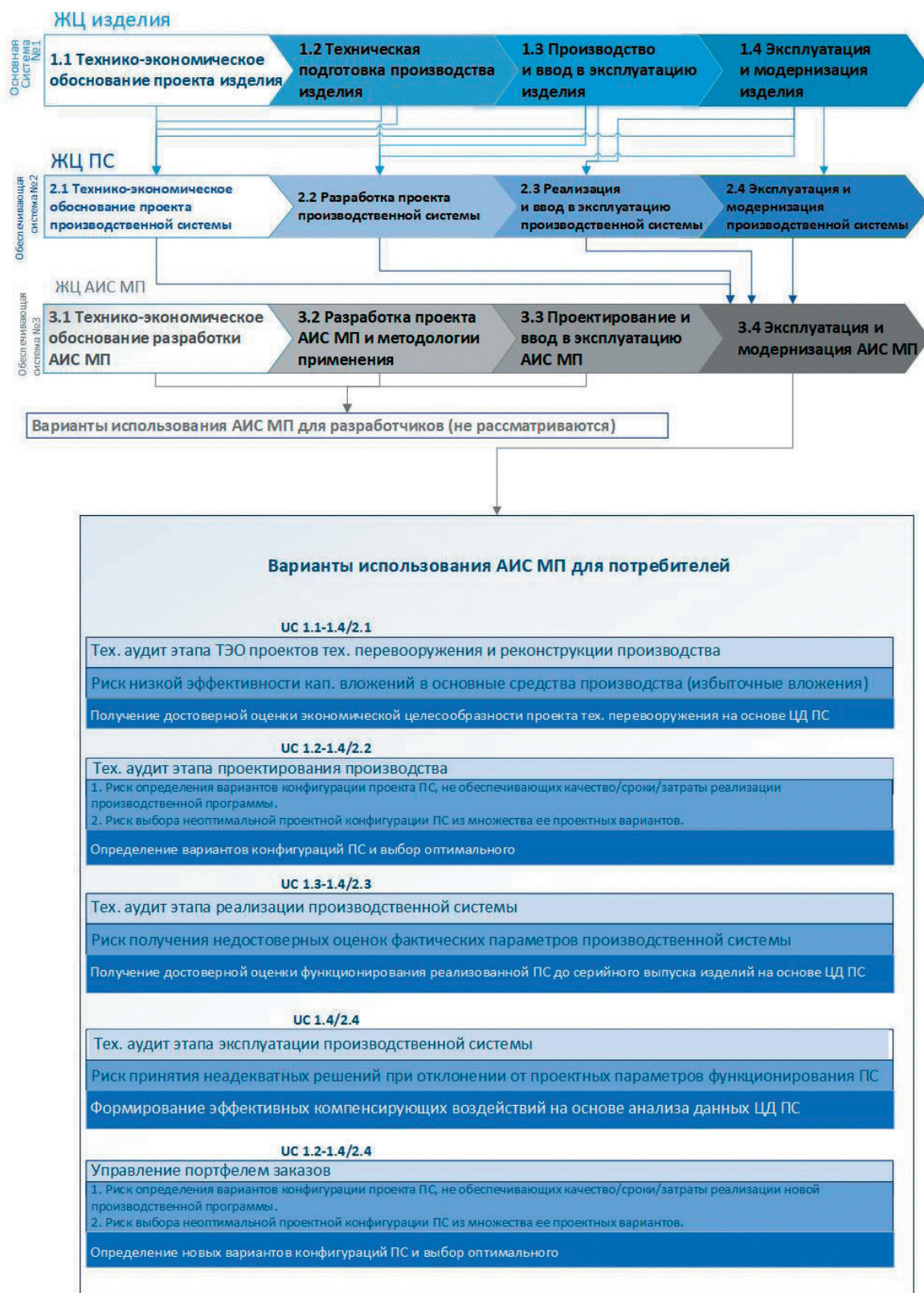


Рис. 6. Схема формирования вариантов использования ЦД ПСП, где: UC – «Use case» (вариант использования); ПС – производственная система; ЦД ПС – цифровой двойник производственной системы. Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

Третий принцип – принцип декомпозиции. Задачи исследования ПСП должны быть реализованы на различных уровнях представления производственной системы (см. рис. 7).

Всего можно выделить три уровня представления: 1. Стратегический уровень. Потребителем результатов моделирования на этом уровне является руководство интегрированной структуры (корпорации,

холдинга). На стратегическом уровне моделируются цифровые двойники межзаводской кооперации, при этом сам завод рассматривается как производственная мощность.

2. **Тактический уровень.** Потребителем результатов моделирования является директор по производству конкретного предприятия, моделируются цифровые двойники предприятий (заводов), производственной мощностью являются передел, цех, участок.

3. **Оперативный уровень.** Потребителем результатов моделирования является начальник цеха, моделируются цифровые двойники цехов, производственная мощность – это рабочее место.

Принцип эталонирования. Реализация этого принципа основана на построении идеальной конфигурации ПСП для каждого экземпляра номенклатуры типов изделий по отдельности без учета других экземпляров номенклатуры. Параметры функционирования таких идеальных конфигураций ПСП позволяют оценить параметры функционирования реальных конфигураций ПСП по каждому экземпляру номенклатуры. Такое сравнение позволит оценить степень совершенства производственной системы.

Принцип агрегации. Агрегированию подлежат основные компоненты производственной системы: изделия или предметы производства, производственные мощности, работы.

Агрегирование предметов производства возможно по трем признакам:

- по структуре изделия, при котором агрегациями могут быть узел, агрегат, изделие, комплекс и т.п.;

- по типам изделий: класс, группа, подгруппа и т.п.;
- по уровням связанных работ: машинокомплект, бригадокомплект, цехокомплект и т.п.

Для компонентов типа «работы» возможны следующие агрегации: группа переходов, операция, группа операций, технологический процесс, передел, производство. Для производственных мощностей: группа рабочих мест, участок, цех, завод и т.п.

Этот принцип позволяет не только сократить затраты на исследования цифровых двойников, но и формировать модели ЦД ПСП для различных уровней представления производства.

Группы пользователей программных систем и решаемые задачи

Группы пользователей и решаемые задачи с помощью АИС МП зависят от уровней рассмотрения производства и уровня принятия решений: стратегический, тактический, оперативный. На рис. 7 показана матрица соответствия выделенных групп пользователей, их ключевых задач и уровней ПСП.

В табл. 1 приведены примеры конкретных решаемых вопросов и оперируемых показателей для соответствующих уровней производственной системы: дирекции, служб и цехов.

На рис. 8 представлена экранная форма разработанного макета АИС МП, где интерактивное 3D-изображение системы производства в перспективе будет отображаться средствами в VR/AR технологий. Интерактивное изображение генерируется в зависимости от двух контекстуальных параметров:

- стадия жизненного цикла ПСП, где на шкале пока-



Рис. 7. Группы пользователей и решаемые задачи на трех уровнях представления производства. Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

заны вехи проектной модели ЖЦ ПСП;

- уровень представления ПСП, где на шкале показаны единицы мощности ПСП (кооперация предприятий, завод, производство, цех, участок, рабочее место), связанные с уровнями ее представлений.

Рассмотрение стадий ЖЦ ПСП необходимо при планировании последовательных этапов перехода действующего производства при его модернизации от очереди к очереди, что связано с этапами финансирования строительства, реконструкции, закупки оборудования и др.

Рассмотрение уровней представления ПСП необхо-

димо для выделения контекста принимаемых управленческих решений для руководителей соответствующих уровней. Следует заметить, что показатели агрегации/декомпозиции связаны в систему и соответствуют друг другу, т.е. агрегированные показатели рассчитываются на основе их составляющих, в том числе и по результатам динамических прогонов и обработки результатов имитационных экспериментов.

Система связанных показателей для каждого из уровней рассмотрения производственной системы представлена на рис. 9.

Уровень стратегических решений (дирекция)		Уровень тактических решений (службы)		Уровень оперативных решений (цех)	
Решаемые вопросы	Показатели	Решаемые вопросы	Показатели	Решаемые вопросы	Показатели
Какие заказы взять в работу?	Заказы-товарные изделия (ед.), мощность изд./год	Какова структура производства?	Состав и кол-во оборудования, персонала	Партии запуска	Объем партии, кол-во партий
Какие мощности нужны?	Кол-во чел., чел.-час., станко-час.	Запуск в производство	ДСЕ, сроки, кол-во	Закрепление работы, наряд-заказы	Норм.-час., чел.-час.
Каковы финансовые ресурсы?	Затраты, прибыль, рентабельность	Сроки, эффективность	Циклы, загрузка, Тц, Пц, ОЕЕ, МСЕ, КИО, объемы НЗП	Брак, простои, ТОиР	Кол-во годных ДСЕ, объем ремонтов
Контроль выполнения программ	Шт., руб., загрузка предприятий	Планы и их обеспечение	Выполнение плана, норм.-час., шт.	Что, если?	План решения внештатных ситуаций
Этапность реализации	Этапы, транши, планы перехода	Расход ресурсов	Э/энергия, кВт, воздух, мЗ и т.п.	Отчетность	Шт., норм.-час., чел.-час. и др.

Принятые в таблице сокращения:

ДСЕ – детали и сборочные единицы;

КИО – коэффициент использования оборудования;

Пц – производственный цикл;

ТОиР – техническое обслуживание и ремонт оборудования;

Тц – технологический цикл;

НЗП – незавершенное производство;

МСЕ – Manufacturing Cycle Effectiveness, с англ. показатель эффективности операционного цикла изделия;

ОЕЕ – Overall Equipment Effectiveness, с англ. показатель общей эффективности оборудования.

Табл. 1. Примеры решаемых вопросов и оперируемых показателей для каждого из уровней рассмотрения производственной системы.

Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

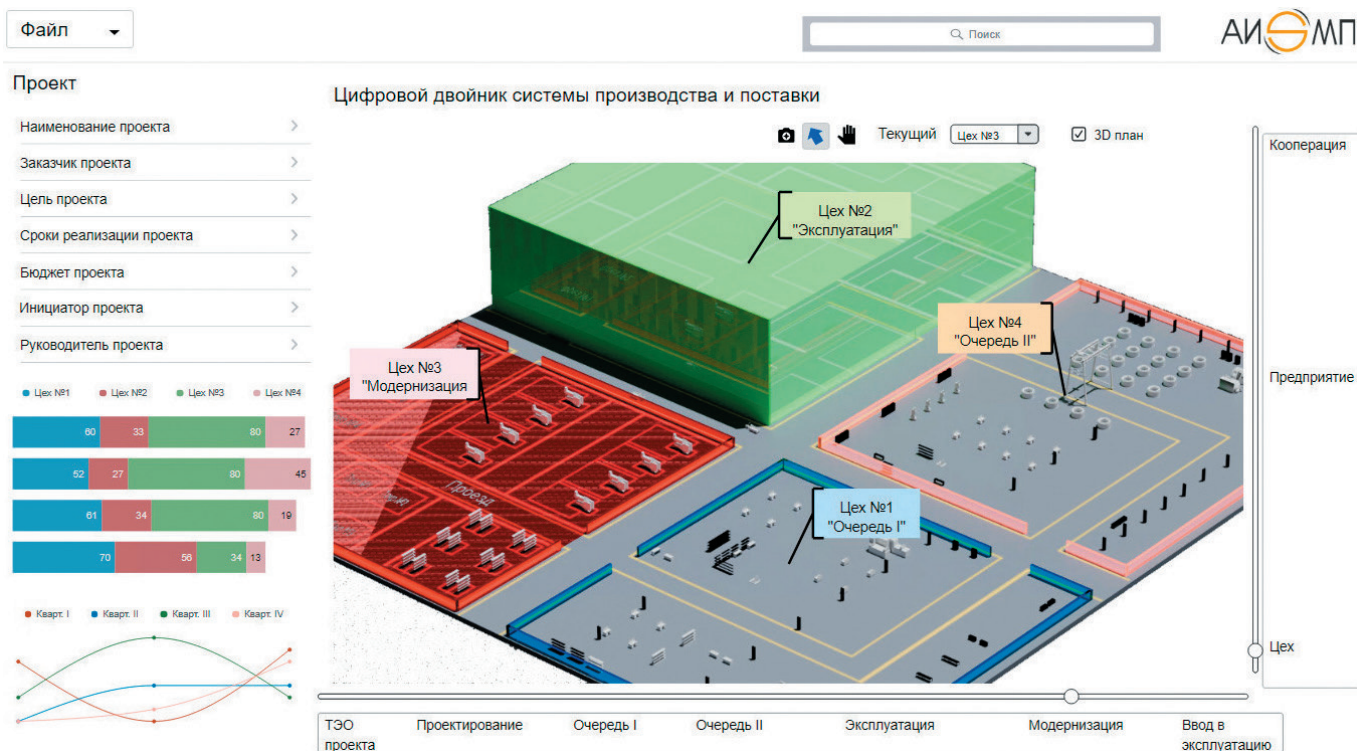
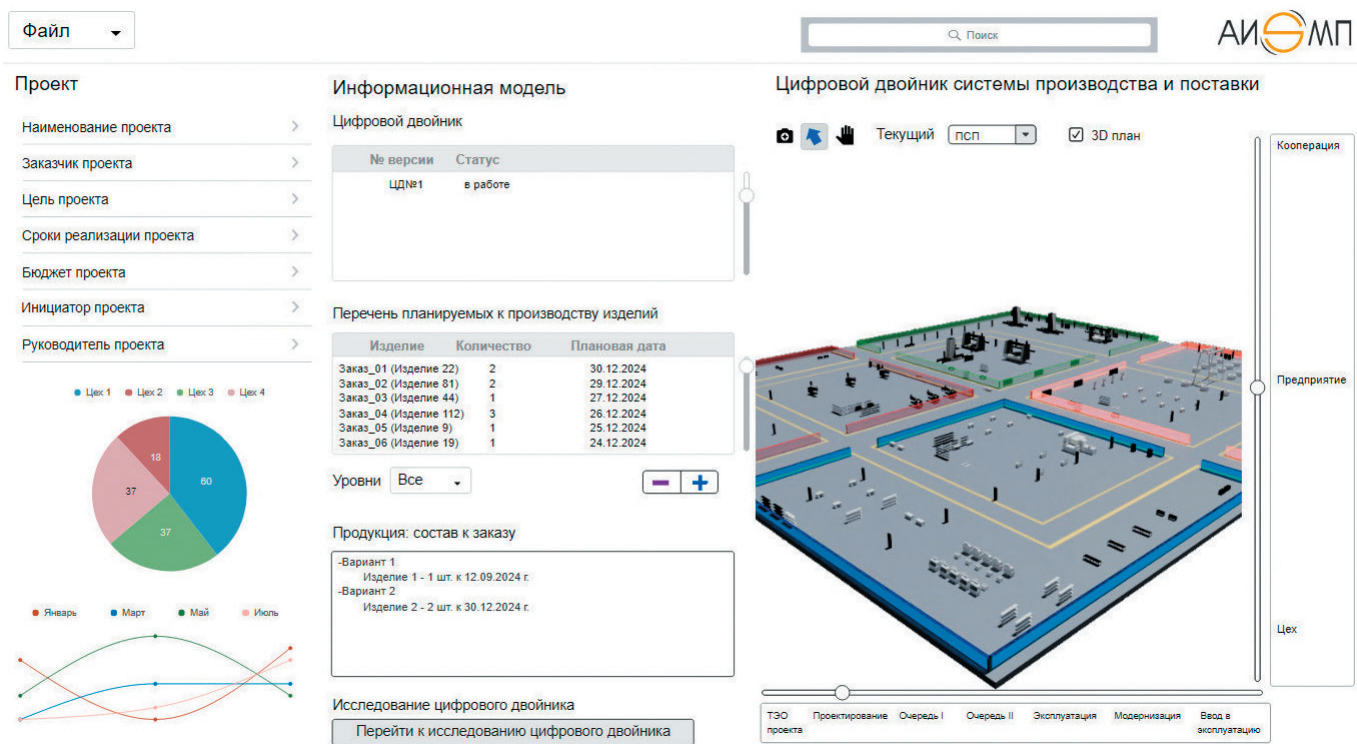


Рис. 8. Вид макета экранной формы макета АИС МП в режиме «Проект»: а) информационная модель ПСП; б) интерактивное редактирование ПС цеха № 3 в контексте ПСП (уровень ПС – «Цех», стадия ЖЦ ПС – «Модернизация»).

Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

Уровень цеха		Уровень предприятия		Уровень структуры (холдинга), ГК									
<p>Показатели, определяющие размерность ПС</p> <p>Кол-во в различных разрезах (по типам, видам, моделям, профессий и т.д.):</p> <ul style="list-style-type: none"> •оборудование, шт. •персонал, чел. •проезв. площади, кв.м •площади хранения, кв.м •эффективный фонд времени (мощность, н.ч./ст.ч.) 	→	<p>Показатели, определяющие степень загрузки ПС</p> <ul style="list-style-type: none"> •номенклатура ДСЕ, шт. •∑ трудоемкость, н.ч. •∑ станкоемкость, ст.ч. •∑ материалоемкость, руб. •∑ энергоемкость (э/э, т/э, вода, воздух) •номенкл. операций, шт. •номенкл. ДСЕ-опер., шт. 	→	<p>Показатели эффективности выполнения заказов</p> <ul style="list-style-type: none"> •цикл технологический, ч. •цикл производственный, ч. •МСЕ* ДСЕ, ед. •время пролеживания ДСЕ, ч. •выполненные наряд-заказы в срок (уровень сервиса), шт./ % 	→	<p>Показатели эффективности использования ПС</p> <ul style="list-style-type: none"> •коэф. загрузки оборуд., % •коэф. загрузки перс., % •ОБЕ*, ед. •простой персонала, ч. •переналадка оборуд., ч. •энергопотребление, (э/э, т/э, вода, воздух) 	→	<p>Экономические показатели ПС</p> <ul style="list-style-type: none"> •производительность, руб. •∑ объем НЗП, руб. •переменные затраты, руб. •постоянные затраты, руб. •выручка, руб. •прибыль, руб. •рентабельность, руб. •стоимость оборуд., руб. •остаточная стоимость, руб. 	→	<p>Показатели текущего прогресса выполнения плана</p> <ul style="list-style-type: none"> •выполнение плана, шт. •выполнение плана, н.ч. •выполнение плана, % •∑ объем НЗП, н.ч. •мощность, шт./период •пропускная способность, шт./период 	→	<p>Показатели качества производственного процесса ПС</p> <ul style="list-style-type: none"> •кол-во годных изд., шт. •исправимый брак, шт./н.ч. •ненправ. брак, шт./н.ч. •выпуск годных изд., % •∑объемы переделок, н.ч. 	→
<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня предприятия</p> <p>+</p> <p>Кол-во в различных разрезах:</p> <ul style="list-style-type: none"> •цехов, ед. •поставщиков, ед. •контрагентов, ед. •общая площадь, кв.м 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня предприятия</p> <p>+</p> <p>Кол-во в различных разрезах:</p> <ul style="list-style-type: none"> •номенклатура заказов, шт. •производственная программа •объем закупок, руб. 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня предприятия</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •МСЕ заказа, ед. •выполненные заказы в срок (уровень сервиса), шт./ % •произведенные заказы, шт., руб. •отгруженные заказы, шт., руб. 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня предприятия</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •загрузка цехов, н.ч. •коэф. загрузки цехов, % •простой цехов, ч. •объемы сверхурочных работ, н.ч. •производительность труда, руб./1 раб. 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня предприятия</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •стоимость активов, руб. •себестоимость заказов, руб. •объем собственных работ в себестоимости, % 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня предприятия</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •объем поставок, шт. •объем поставок, руб. •∑ объем НЗП заказов, н.ч. •∑ объем НЗП заказов, руб. 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня предприятия</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •объем рекламаций, шт. •объем рекламаций, % 	→
<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня холдинга/ГК</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •кол-во заводов, ед. •общая площадь, кв.м •расстояния между заводами, км 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня холдинга/ГК</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •номенклатура программ, ед. •номенклатура продукции в рамках программ, шт. 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня холдинга/ГК</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •произведенная продукция, шт., руб. •отгруженная продукция, шт., руб. •выполнение программы в срок (уровень сервиса), шт./ % 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня холдинга/ГК</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •загрузка предпр. н.ч •коэф. загрузки предприятий, % •простой предпр., ч. 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня холдинга/ГК</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •стоимость активов, руб. •себестоимость продукции, руб. •объемы работ в себестоимости программ, % 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня холдинга/ГК</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •выполнение программ (ФЦП), шт. •выполнение программ (ФЦП), руб. •мощность, ед./период 	→	<p>То же:</p> <p>расчет/агрегация до уровня холдинга/ГК</p> <p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> •объем рекламаций, шт. •объем рекламаций, % 	→

*ПС - производственная система; МСЕ - Manufacturing Cycle Effectiveness, показатель эффективности операционного цикла; ОЕЕ - Overall Equipment Effectiveness, показатель общей эффективности оборудования

Рис. 9. Система связанных показателей для каждого из уровней рассмотрения производственной системы. Источник: разработано авторами на основе собственных исследований

Заключение

Результаты выполнения проектов экспертизы дискретных машиностроительных производств, с одной стороны, показали наличие существенных возможностей для повышения их общей эффективности при относительно невысокой трудоемкости реализации мероприятий. При этом в среднем можно достичь сокращения циклов производства на 30%, сокращение цикла оборачиваемости запасов на 40%, повышение загрузки оборудования не менее чем на 25% и др. Но с другой стороны, в условиях высокой неопределенности объемов портфеля заказов, когда в отдельных случаях колебания достигали +/- 70%, а также колебаниях в несколько раз за короткий промежуток времени и самих объемов производства, разработка оптимальной конфигурации производства, обеспечивающей предприятию долгосрочное устойчивое развитие на перспективу от пяти лет, является очень сложной и трудоемкой исследовательской задачей. Успешность решения этой задачи во многом определяется уровнем поддержки указанных в статье

принципов разработки цифровых двойников производств в применяемых для их управления программно-информационных системах.

Кроме того, на архитектуру и функциональность специализированных программных средств существенное влияние оказывает сам облик перспективного современного производства, отличительными признаками которого являются: высокая эффективность, крупная серийность с возможностью индивидуализации продукции под запросы потребителя, короткие циклы, гибкость и переналаживаемость. Эти особенности требуют проектирования, внедрения и эксплуатацию как минимум двух контуров (конфигураций) производства – условно постоянной и гибкой, настраиваемой конфигурации производства, а также формирования такой ИТ-инфраструктуры предприятия, которая обеспечит информационную поддержку его функционирования с учетом особенностей выпускаемой продукции (конструкция и материалы), устройства самого производства и специфики производственных заказов.

Список литературы

1. Каица Г. Применение цифрового двойника в соответствии со стандартом ISO 23247 к гибким производственным процессам / Г. Каица, Р. Санз. – Текст: электронный // Appl. Sci. – 2024. – Т. 14, 4204. – С. 1-19. – URL: https://www.researchgate.net/publication/380618638_Immersive_Digital_Twin_under_ISO_23247_Applied_to_Flexible_Manufacturing_Processes (дата обращения: 19.11.2024).
2. Царев М. В. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования / М. В. Царев, Ю. С. Андреев. – Текст: электронный // Изв. вузов. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 7. – С. 517-531. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-v-promyshlennosti-istoriya-razvitiya-klassifikatsiya-tehnologii-stsenarii-ispolzovaniya> (дата обращения: 20.04.2024).
3. Шао Г. Анализ новой серии стандартов ISO 23247 по структуре цифровых двойников для производства / Г. Шао, С. Фрешетт, В. Шринивасан. – Текст: электронный // Национальный институт стандартов и технологий (NIST): [сайт]. – URL: <https://www.nist.gov/publications/analysis-new-iso-23247-series-standards-digital-twin-framework-manufacturing> (дата обращения: 18.11.2024).
4. Кабанов А. А. Цифровое моделирование и имитирование систем аэрокосмического производства с целью управления операционной эффективностью / А. А. Кабанов, М. Ю. Мохов, И. А. Федоров. – Текст: непосредственный // «Экономика космоса». – 2022. – № 1. – С. 57-68. – DOI: 10.48612/agat/space_economics/2022.01.01.09.
5. Кабанов А. А. Архитектура системы управления цифровыми двойниками производств как основа интеграции различных моделей их представления / А. А. Кабанов, И. А. Федоров. – Текст: непосредственный // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 82. – С. 162-176. – DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-162-176.
6. Кабанов А. А. Разработка концепций и экспертиза инвестиционных проектов при расширении машиностроительных производств / А. А. Кабанов, М. Ю. Мохов, И. В. Соколов, А. Х. Тлибеков, И. А. Федоров. – Текст: непосредственный // «Экономика космоса». – 2023. – № 5. – С. 19-30. – DOI: 10.48612/agat/space_economics/2023.02.05.02.
7. Лисов А. А. Сравнение подходов к анализу производственных систем с использованием карт потока создания ценности и инструментов цифрового моделирования / А. А. Лисов, А. А. Кабанов, Ю. М. Панина, Е. В. Грачев. – Текст: непосредственный // «Экономика космоса». – 2024. – № 8. – С. 42-57. – DOI 10.48612/agat/space_economics/2024.03.08.05.
8. Система динамического моделирования производственно-логистических процессов предприятия (СДМ) (Российская Федерация, свидетельство на программу для ЭВМ №2020664561): опублик. 13.11.2020 / М. Ю. Мохов, И. А. Ильин, А. А. Кабанов, В. С. Жамкова. – М.: ФИПС. – Бюл. № 11. – Текст: непосредственный.

List of literature

1. Caiza G. Immersive digital twin under ISO 23247 applied to flexible manufacturing processes / G. Caiza, R. Sanz. – Text: electronic // Appl. Sci. – 2024. – Vol. 14, 4204. – pp. 1-19. – URL: https://www.researchgate.net/publication/380618638_Immersive_Digital_Twin_under_ISO_23247_Applied_to_Flexible_Manufacturing_Processes (accessed: 19.11.2024).
2. Tsarev M. V. Digital twins in industry: the history of development, classification, technologies, use cases / M. V. Tsarev, Y. S. Andreev. – Text: electronic // Izvestiya Universities. Instrument-making. – 2021. – Vol. 64, № 7. – pp. 517-531. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-v-promyshlennosti-istoriya-razvitiya-klassifikatsiya-tehnologii-stsenarii-ispolzovaniya> (accessed: 20.04.2024).
3. Shao G. An Analysis of the New ISO 23247 Series of Standards on Digital Twin Framework for Manufacturing / G. Shao, S. Frechette, V. Srinivasan. – Text: electronic // National Institute of Standards and Technology (NIST): [website]. – URL: <https://www.nist.gov/publications/analysis-new-iso-23247-series-standards-digital-twin-framework-manufacturing> (accessed: 18.11.2024).
4. Kabanov A. A. Digital modeling and simulation of aerospace manufacturing systems to manage operational efficiency / A. A. Kabanov, M. Y. Mokhov, I. A. Fedorov. – Text: direct // "Space economics". – 2022. – № 1. – pp. 57-68. – DOI: 10.48612/agat/space_economics/2022.01.01.09.
5. Kabanov A. A. Architecture of management system for digital twins of productions as a basis for integration of different models of their representations / A. A. Kabanov, I. A. Fedorov. – Text: direct // Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University. – 2022. – № 82. – pp. 162-176. – DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-162-176.
6. Kabanov A. A. Developing concepts and expertise of investment projects while expanding machine-building industries / A. A. Kabanov, M. Y. Mokhov, I. V. Sokolov, A. Kh. Tlibekov, I. A. Fedorov. – Text: direct // "Space economics". – 2023. – № 5. – pp. 19-30. – DOI: 10.48612/agat/space_economics/2023.02.05.02.
7. Lisov A. A. Comparison of approaches to the analysis of production systems using value stream maps and digital modeling tools / A. A. Lisov, A. A. Kabanov, Y. M. Panina, E. V. Grachev. – Text: direct // "Space economics". – 2024. – № 8. – pp. 42-57. – DOI: 10.48612/agat/space_economics/2024.03.08.05.
8. Dynamic modeling system for production and logistics processes of an enterprise (SDM) (Russian Federation, certificate for computer program № 2020664561): published 13.11.2020 / M. Y. Mokhov, I. A. Ilyin, A. A. Kabanov, V. S. Zhamkova. – M.: FIPS. – Bulletin № 11. – Text: direct.

Рукопись получена: 14.10.2024

Рукопись одобрена: 12.12.2024