

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 658.5 EDN LFAGSL

## Научно-методические подходы к формированию модели технологического ресурса цифрового двойника предприятия

**Е. А. Асанова**, *asanova\_ea@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. Ю. Денисов**, *аспирант, denisov.ay@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Г. А. Ревяков**, *к. т. н., revyakov\_ga@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье исследуются особенности моделирования технологического ресурса при разработке модели цифрового двойника предприятия на всех этапах жизненного цикла, которые включают разработку, производство, эксплуатацию, в том числе ремонтные работы, и рассматриваются как компьютерное сетевое пространство, в котором осуществляется информационное взаимодействие между сетевыми структурами виртуального пространства и физическими объектами, такими как датчики, исполнительные органы, средства управления и контроля.

На платформе научно-методического аппарата анализа и представления объектов информационного взаимодействия рассматриваются актуальные вопросы формирования «виртуального предприятия» как объекта исследования, динамическая модель которого отражает изменения состояний ресурсных компонентов в процессе производства. В качестве методологической основы формирования модели цифрового двойника используются концептуальные положения системного анализа, теории эргатических систем, методы и модели математической экономики. Объект исследования определяется как сложная социально-техническая сущность, функционирующая в информационной среде, распределенной в географическом пространстве. Предлагаемые научно-методические подходы и принципы моделирования цифрового двойника предприятия являются достаточно универсальными, поскольку позволяют обеспечить математическое описание и отображение динамики изменения работоспособности предприятия и производственных показателей.

Представлены основные принципы и научно-методические подходы к формированию имитационной модели, отображающей изменения состояния технологического ресурса виртуального предприятия и процессов, влияющего на производственный потенциал в зависимости от состояния работоспособности технологического ресурса и на функциональную готовность производства в целом. Несмотря на то, что технологический ресурс относится к экзогенным факторам, оцениваются риски и прямая зависимость его работоспособности от состояния других материальных и нематериальных компонентов. Для восстановления работоспособности технологического ресурса предлагается при планировании производства предусматривать варианты эластичной замены деградирующих ресурсных компонентов.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, жизненный цикл, технологический ресурс, производственная функция, производственный элемент

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

## Scientific and Methodological Approaches to the Formation of a Technological Resource Model of a Digital Twin of an Enterprise

**E. A. Asanova**, *asanova\_ea@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. Yu. Denisov**, *postgraduate student, denisov.ay@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**G. A. Revyakov**, *Cand. Sci. (Engineering), revyakov\_ga@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The article studies the process of modeling a technological resource when developing a model of a digital twin of an enterprise at all stages of its life cycle, which include development, production, operation, including repair work. It is viewed as a computer network space in which information interaction takes place between network structures of the virtual space and physical objects, such as sensors, actuators, control and monitoring equipment.

On the platform of the scientific and methodological apparatus of analysis and presentation of objects of information interaction, current issues of construction of a "virtual enterprise" are considered as an object of research, the dynamic model of which reflects changes in the states of resource components in the production process. Conceptual provisions of system analysis, theories of ergatic systems, methods and models of mathematical economics are used as a methodological basis for the formation of a digital twin model. The object of research is defined as a complex socio-technical entity operating in an information environment distributed in geographical space. The proposed scientific and methodological approaches and principles for modeling the enterprise's digital twin system are quite universal, since they allow for a mathematical description and display of the dynamics of changes in the enterprise's performance and production indicators.

The basic principles and scientific and methodological approaches to the formation of a simulation model are presented, reflecting changes in the state of a technological resource of a virtual enterprise and processes that affect production potential depending on the health status of the technological resource and the functional readiness of production as a whole. Despite the fact that a technological resource is an exogenous factor, risks and the direct dependence of its performance on the condition of other material and intangible components are assessed. To restore the performance of a technological resource, it is proposed to provide options for flexible replacement of degrading resource components when planning production.

**Keywords:** digital twin, life cycle, technological resource, production function, production element

## Вступление

В 2019 г., выступая на совещании, посвященном технологическому развитию, президент нашей страны В. В. Путин сказал: «Борьба за технологическое лидерство — прежде всего в сфере искусственного интеллекта — уже стала полем глобальной конкуренции. Скорость создания новых продуктов и решений растет в геометрической прогрессии по экспоненте. Такого рода разработки не имеют аналогов в истории по своему влиянию на экономику и производительность труда, эффективность управления, образования, здравоохранения и повседневную жизнь людей» [1].

Высокая оценка актуальности и востребованности технологии искусственного интеллекта сопровождается важными государственными решениями в области организации и управления развитием науки и производства, что подтверждается, например, принятой в 2019 г. «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта до 2030 года».

Реформирование ракетно-космической промышленности, включая ее важнейшую отрасль — космическое приборостроение и информационные системы, — рассматривается как важнейшая составная часть, определяющая направление научно-технического и технологического развития.

Исходя из того, что скорость принятия инновационных решений в высокотехнологичном производстве увеличивается в геометрической прогрессии, отмечается, что «ключом к успеху будет скорость совершенствования организационной среды крупного бизнеса» [2]. В свою очередь, совершенствование организационной среды тесно связана с необходимостью активного развития и совершенствования производственных технологий и продукции на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) как важнейшего механизма системы менеджмента качества (СМК).

Результаты практического применения технологий информационной поддержки ЖЦ изделий, таких как CALS в США, PLM в ЕС, ИПИ в России, свидетельствует об определенных успехах, достигнутых при выполнении НИОКР, включая снижение затрат на 20 % и времени до 30 % [3].

Развитие отрасли связано с новыми подходами и инновационными научно-техническими решениями, такими как интегрированная сетевая компьюте-

ризация, единая информационно-коммуникационная среда, имитационное моделирование и передовые методы создания цифровых аналогов процесса производства и изделий, оценка рисков и влияния различных факторов, цифровое динамическое моделирование состояний работоспособности объектов и ресурсного обеспечения, информационная и кибербезопасность, научно-технологическое сопровождение ЖЦ проектов.

Согласно ISO серии 9000 версии 2000 «система управления качеством продукции является важнейшим направлением деятельности предприятий, базируется на информационной системе, поддерживающей автоматизированную обработку данных и документированных процессов обеспечения качества на всех этапах ЖЦ промышленных изделий, автоматизированное с элементами искусственного интеллекта управление процессами, данными, документацией, персоналом и пр.» [4].

Цель данной статьи — формирование методической основы оценки и минимизации рисков прогнозных изменений состояния работоспособности технологического ресурса, считавшегося экзогенным (неизменяющимся, то есть заданным перед началом производственного процесса) фактором, на всех этапах ЖЦ в модели цифрового двойника предприятия, разработанной на основе научно-методического аппарата анализа и представления объектов информационного взаимодействия.

При исследовании научно-практических подходов к решению задачи имитационного моделирования рассматриваются: научно-методическая платформа и основополагающие принципы моделирования единой информационно-производственной среды, построения архитектуры цифровой модели виртуального производства и изделия, математическое моделирование процессов с отражением изменения состояний работоспособности ресурсных составляющих, среди которых важнейшая роль принадлежит технологическому ресурсу.

## Научно-методическая платформа имитационной модели цифрового двойника

Широкое применение технологий искусственного интеллекта в процессах управления разработкой,

созданием и эксплуатацией высокотехнологичной научно-технической продукции должно предусматривать информационную поддержку ЖЦ, когда «в едином информационном пространстве связаны изделие, процесс, предприятие и ресурсы» [5].

На современном этапе развития в качестве инновационного направления повышения эффективности высокотехнологичного производства в условиях ограничения времени рассматривается разработка и внедрение технологий цифрового двойника предприятия, обеспечивающих адекватное отражение в режиме квазиреального времени состояния работоспособности объекта и его составных частей.

Целью создания цифрового предприятия является повышение эффективности производственной деятельности и обеспечения встроенного качества при сжатых сроках выпуска высокотехнологичной продукции [6].

При рассмотрении имитационной модели объекта исследования полагаем, что под цифровым двойником подразумеваются: семейства сложных мультидисциплинарных онтологических, архитектурных, параметризованных математических (ГОСТ Р 27188-2016) и компьютерных (ГОСТ Р 57412-2017) моделей с высоким уровнем соответствия реальным материалам, объектам, техническим и киберфизическим системам, физико-механическим процессам, в том числе технологические и производственные процессы, описываемых 3D нестационарными, а также нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, и обеспечивающих разницу между данными виртуальных и натуральных процессов в пределах  $\pm 5\%$  (DT-1), и/или «умная» модель, учитывающая особенности конкретного производства и технологии изготовления (DT-2) на базе интеллектуальных алгоритмов и машинного обучения [7].

Одной из важнейших задач информационной поддержки производства научно-технической продукции как объекта исследования является оценка уровня технологической готовности и минимизация рисков нарушения технологии производства путем эластичной замены деградировавших ресурсных составляющих, оказывающих негативное влияние на состояние работоспособности технологического ресурса.

Среди методик оценки уровня технологической готовности, которые используются корпорациями и государственными организациями США, следует отметить разработанную NASA методику оценки уровней готовности технологий (Technology Readiness Levels — TRL), согласно которой рассматриваются 9 уровней готовности (зрелости) технологий [8]:

TRL-1 — *начальный уровень, который предусматривает описание основных принципов технологии*, когда результаты НИР начинают передаваться в прикладные НИОКР, аппаратно-программные средства не разработаны, технологии не демонстрировались;

TRL-2 — *сформулированы концептуальные положения технологии и ее приложений*, когда приступили к теоретическому описанию технологии, не требующему детального анализа или доказательства;

TRL-3 — *определены критическая, аналитическая и экспериментальная функции технологии и подтверждающие концептуальные характеристики*, когда активно осуществляются НИОКР;

TRL-4 — *составные части технологии и макет получили подтверждение в лабораторных условиях*, разработан лабораторный макет системы с фрагментарной функциональностью, соответствием формы и технологических компонентов;

TRL-5 — *элементы технологии и макет получили подтверждение в лабораторных условиях*, выполнена проверка функциональности интегрированных составных частей с реальными элементами или подсистемами;

TRL-6 — *модель или прототип системы, или подсистемы продемонстрированы в условиях, соответствующих условиям применения*, проведена лабораторная демонстрация технологии с высокой точностью воспроизведения системы с четким определением путей интеграции технологии;

TRL-7 — *прототип системы продемонстрирован в условиях эксплуатации*, в том числе в ходе проведения летных испытаний, когда получено подтверждение, что прототип соответствует окончательной системе и может быть интегрирован с другими составными частями или подсистемами;

TRL-8 — *завершенная реальная система прошла летные квалификационные испытания*,

в ходе которых получено подтверждение работы технологии в ее окончательном варианте и в реальных условиях эксплуатации;

TRL-9 — *реальная успешно эксплуатируемая система*, которая в окончательном виде прошла испытания и оценку в условиях эксплуатации с положительным результатом.

Рассмотренная методика определения готовности технологии позволяет оценить состояние технологий, обеспечивающих производство научно-технической продукции. Она не противоречит нормативным документам и стандартам, которые определяют систему информационной поддержки ЖЦ высокотехнологичного производства в нашей стране, и позволяет дискретно оценить уровень готовности технологии, что особенно важно при анализе готовности производства в целом.

Компания Gartner разработала методологию оценки зрелости технологии, ориентированную на маркетинговые принципы общественной и профессиональной оценки интереса, проявляемого к технологии и ее востребованности.

С точки зрения изучения особенностей технологического ресурса в системе информационной поддержки ЖЦ научно-технической продукции и высокотехнологичного производства рассматривается возможность применения научно-методического аппарата анализа и представления объектов информационного взаимодействия, разработанной на методологической платформе синтеза концептуальных положений системного анализа, теории эргатических систем (ЭС), методов и моделей математической экономики. При формировании облика имитационной цифровой модели предприятие рассматривается как модель сложной ЭС, функционирующая в пространственно распределенной информационно-коммуникационной среде, в которой математически описываются и отражаются динамические изменения свойств и характеристик объекта информационного взаимодействия, в том числе свойства приема, обработки, хранения и распределения информации с учетом изменений, характеризующих состояние работоспособности объекта под действием внутренних процессов и воздействий окружающей среды [9].

Наряду с важнейшим направлением технологического обеспечения производства научно-техни-

ческой продукции, на всех этапах ее ЖЦ стоит задача реорганизации отраслевой информационной инфраструктуры и создания единого информационного пространства. Из анализа развития информационных технологий в США следует, что, наряду с количественным и качественным наращиванием системных возможностей, реализуется сетевой принцип использования ресурсных компонентов. Например, в интересах МО США развернута Глобальная информационная грид-система (GIG — Global Information Grid) — многоуровневая сетевая информационная система, включающая в себя принадлежащие государству и арендуемые каналы связи, вычислительные системы и услуги, ПО, приложения, данные, сервисы безопасности, другие сопутствующие услуги [10].

В качестве важного ориентира инновационных процессов развития информационной инфраструктуры, стимулирующих технологическое развитие в заданном направлении, рассматривается вариант формирования цифрового двойника во взаимосвязи с положениями концепции сетецентрического взаимодействия, предусматривающий создание устойчивых, защищенных от несанкционированного доступа, самоорганизующихся сетей, обеспечивающих сбор, информационно-аналитическую обработку данных и оперативное распределение информации в органы управления, производственные подразделения и на исполнительные механизмы [11]. С учетом расположения производственных подразделений в географически распределенном пространстве целесообразно исследовать санкционированный обмен информацией между ними с позиций научно-методического аппарата анализа и представления объекта информационного взаимодействия, математическая модель которого описывает процессы производства и оценку динамики изменения состояний привлекаемых материальных ( $X$ -кадрового,  $Y$ -материально-технического,  $Z$ -инфраструктурного,  $G$ -географического) и нематериальных ( $T$ -технологического,  $I$ -информационного,  $H$ -организационного,  $\Psi$ -морально-психологического) ресурсов [5, 9].

Среди нематериальных производственных активов особое положение занимает технологический ресурс, работоспособность которого характеризуется готовностью и способностью имеющихся технологий

обеспечить выполнение задач по разработке, созданию и эксплуатации, то есть на всех этапах ЖЦ высокотехнологичной научно-технической продукции [6].

Создание интегрированной информационной среды предполагает развертывание гибкой, настраиваемой программно-технической системы (ПТС), способной обеспечить интеграцию в существующие ПТС и наращивание функциональных возможностей всех компонентов системы с учетом специфики предприятия, в том числе путем использования так называемых «шлюзов» между существующими, модернизируемыми и разрабатываемыми системами.

Парадигма цифровой поддержки ЖЦ на платформе модели цифрового двойника объекта заключается в «непрерывном интегрированном информационном обеспечении участников ЖЦ данными об изделиях и связанных с ними процессах и сводится к созданию единой интегрированной модели изделия» [3] на технологической основе тотальной компьютеризации всех «сил и средств» (ресурсов), участвующих в ЖЦ инновационной продукции. По аналогии с концепцией сетецентрического взаимодействия [11], спроецированной на технологии, любое подразделение, участвующее в ЖЦ изделия и производства, представляется в виде компьютерной сети, объединяющей совокупность элементов трех видов [8]:

- *сенсоры или датчиковая аппаратура*, обеспечивающая текущими данными, характеризующими состояние ресурсных компонентов на этапах ЖЦ изделия;

- *факторы*, обеспечивающие формирование и исполнение управляющих команд системы, и *средства*, которые выполняют команды и управляющие сигналы от информационно-управляющих устройств, реализующих интеллектуальные функции анализа датчиковой информации, выработки управляющих сигналов и команд с последующей их обработкой через исполнительные устройства;

- *органы контроля и управления* всеми производственными единицами на этапах ЖЦ.

Под цифровым двойником предприятия понимаем систему, обеспечивающую в автоматическом режиме получение, хранение, обработку и распределение больших массивов информации и данных,

характеризующих производственные процессы, ресурсы и производимую продукцию на всех этапах ЖЦ. Поэтому в модели виртуального предприятия предусматривается оперативное выявление слабых сторон, минимизация рисков и создание информационно-управляющей системы, автономно функционирующей, самостоятельно организующейся и самовосстанавливающейся [8].

## Научно-методические подходы к моделированию технологического ресурса

Технология (от греч. *τέχνη* — искусство, мастерство, ремесло, наука и технология), совокупность приемов и способов получения, добычи, обработки или переработки сырья, материалов, полуфабрикатов или изделий, осуществляемых в различных отраслях промышленности, в строительстве и т. п.; научная дисциплина. На практике под технологией подразумевается комплекс организационных мер, операций и приемов, направленных на изготовление изделия с заранее заданным номинальным качеством (конечный продукт труда), его эксплуатацию и ремонт [12].

В соответствии с [6] при разработке модели цифрового двойника объекта вводится понятие производственного элемента, инвариантного типу производимого продукта (далее — ПЭ), который наделяется функцией элементарной виртуальной конструкции. При агрегировании взаимодействующих между собой в сетевой среде информационного взаимодействия (ИВ) ПЭ формируется 3-мерная обобщенная виртуальная модель цифрового производства (рис. 1) в виде базового модуля каждой технологической операции, из совокупности которых формируется со сложной сетевой внутренней интегрированной информационной средой цифровая технологическая модель объекта, функционирующего в окружающем сетевом, географически распределенном информационном пространстве.

При описании функционирования модели ПЭ используется понятие динамической производственной функции (ДПФ), которая описана в [13]. Функциональная зависимость ПФ характеризуется показателями «полезного» продукта, являющегося

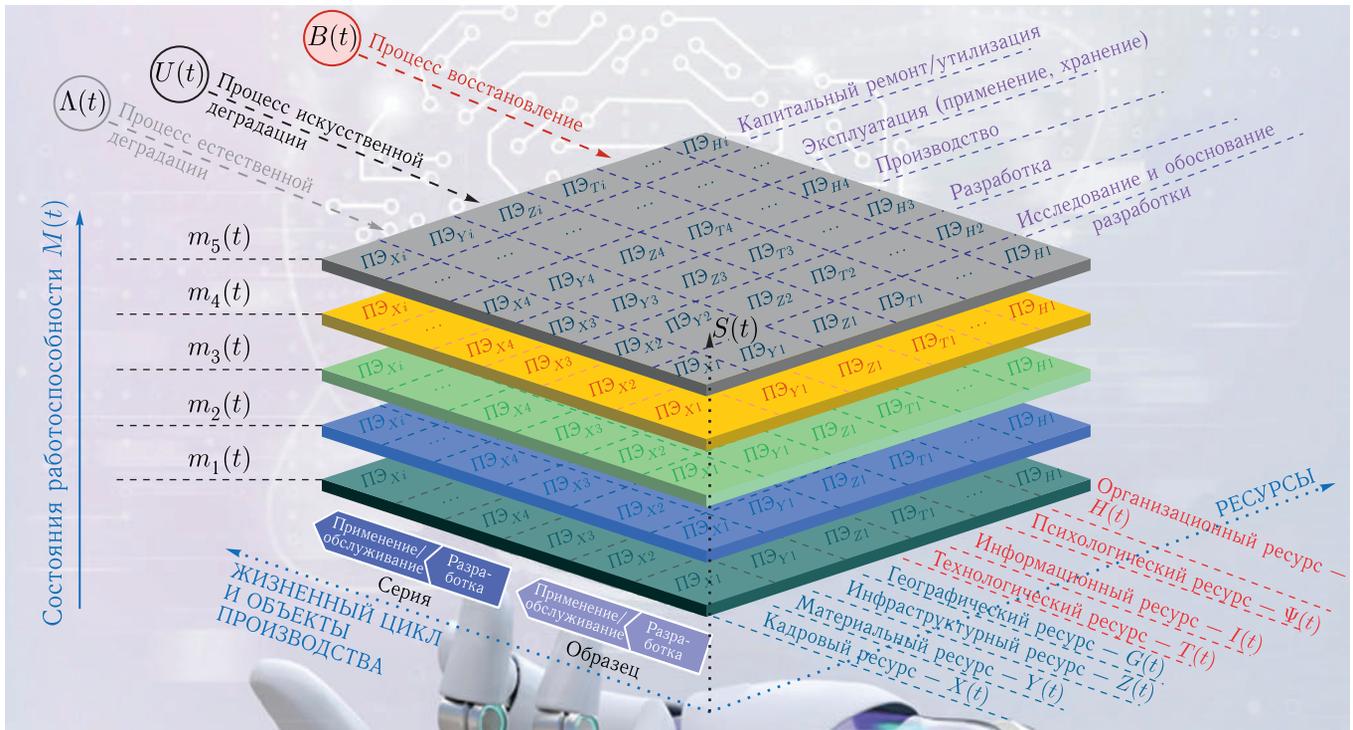


Рис. 1. Обобщенная модель объекта информационного взаимодействия в виде базового модуля динамической производственной функции

основным результатом производственной деятельности, и производственных отходов.

Поскольку технологический ресурс ( $T$ -ресурс) характеризуется технологическим уровнем, т. е. совокупностью приемов и технологических способов (ТС) решения производственной задачи, он весьма существенно влияет на выпуск полезного продукта, показатели количественных и качественных характеристик производства. Согласно [9] принято считать, что:

- технология является экзогенным производственным фактором, который выбирается перед началом производственного процесса и в ходе его не изменяется;
- количественная и качественная составляющие  $T$ -ресурса —  $T(t) = \langle m^T(t), k^T(t) \rangle = \text{const}$ , — не изменяются в ходе производственного процесса;
- количественные и качественные показатели  $T$ -ресурса фиксируются перед началом производства и используются при параметрической настройке динамической модели виртуального производства.

Однако при более тщательном исследовании виртуальной модели производства можно заметить,

что изменения состояний работоспособности материальных и нематериальных ресурсных компонентов в сетевой структуре оказывают друг на друга весьма заметное влияние. Это обстоятельство относится и к технологическому ресурсному компоненту.

В модели ПФ результат функционирования ПЭ на выходе можно разделить на:

- *полезный продукт*, выпускаемый в соответствии с целевым назначением ПЭ в виде изделия и/или услуги;
- *производственные отходы*, формирование которых обусловлено деградацией ресурсов —  $m^X(t)$ ,  $m^Y(t)$ ,  $m^Z(t)$ ; производственные отходы формируют технологические условия —  $D(t)$ , которые, в свою очередь, влияют на темпы выпуска всех других типов продуктов [9].

В [13] представлена абстрактная динамическая система виртуального производства (рис. 2), которая задается уравнениями входа, состояния и выхода и достаточно адекватно отражает состав, основные показатели функционирования и состояния работоспособности производственных ресурсов и объекта исследования в целом.

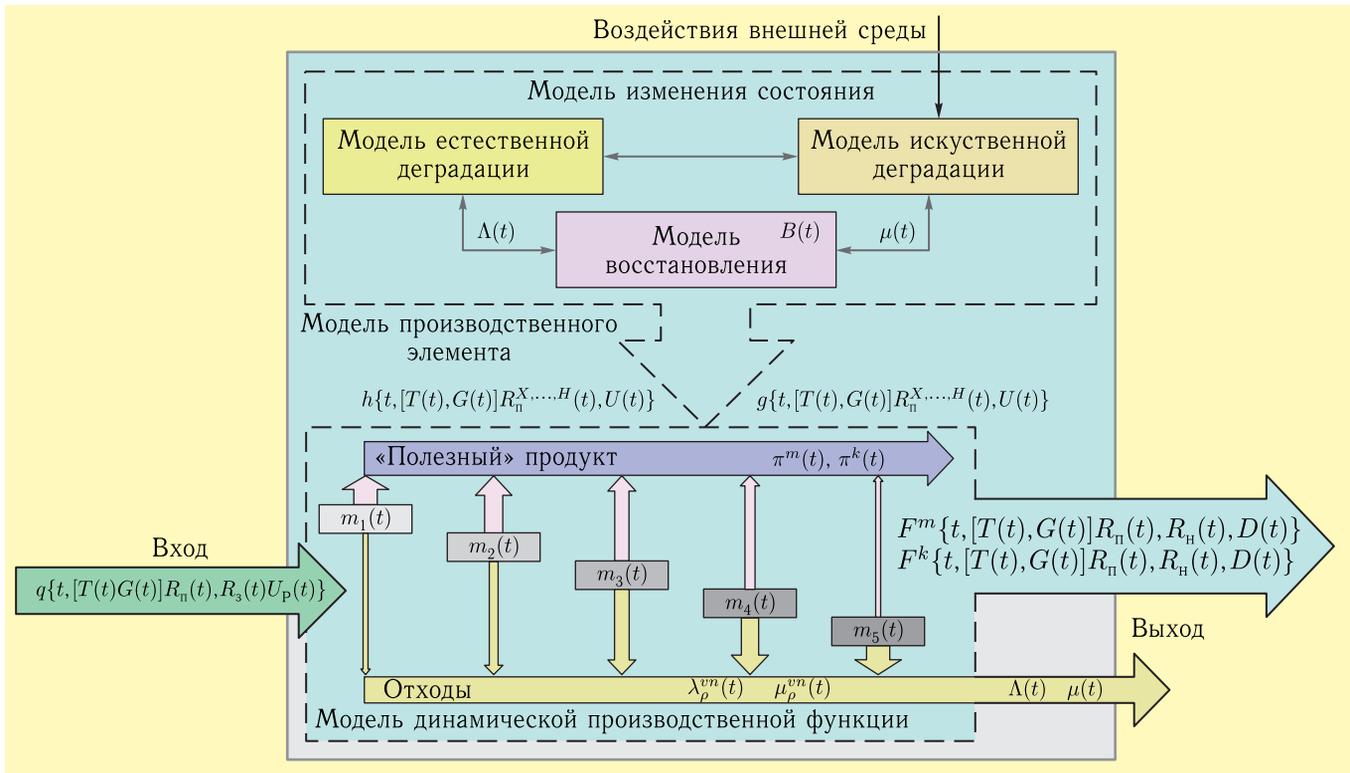


Рис. 2. Модель виртуального производственного процесса в виде ПЭ

Модель ПЭ (рис. 2) дискретно отображает текущее состояние виртуального объекта на стадиях ЖЦ в зависимости от работоспособности, где  $m_1^T(t)$  — состояние полной технологической готовности, а  $m_5^T(t)$  — состояние полного отсутствия работоспособности технологического ресурса [9]. При рассмотрении технологии как важной ресурсной составляющей следует обратить внимание на оценку состояния готовности технологического ресурса к производственному процессу и контроль изменения состояния его работоспособности в ходе выпуска «полезной» продукции.

В модели цифрового двойника предприятия смоделированы процессы естественной и искусственной деградации, а также восстановления ПЭ (рис. 2), состояние работоспособности которых влияет на уровень и показатели, характеризующие работоспособность друг друга и объекта в целом [13].

В обобщенной модели объекта ИВ учет взаимных влияний осуществляется во всей совокупности ПЭ, которые в данном случае моделируют ресурсные составляющие как элементы (узлы) сетевой информационной среды, функционирующей в рас-

деленном сетевом пространстве. Взаимные влияния ресурсных компонентов ПЭ в процессе функционирования модели отображаются с помощью макроТС —  $T_j^G(t)$ , что отображается в табл. 1 [14].

Представленные в табл. 1 и 2 показатели учета взаимных влияний ПЭ при выполнении производственного задания показывают, что каждая макроТС —  $T_j^G(t)$  испытывает ресурсные влияния — [V].

Значения показателей макроТС —  $T_j^G(t)$  используются при параметрической настройке

Таблица 1. Учет влияния изменений количественных показателей ПЭ

$T_j^G(t)$	ПЭ <sub>1</sub>	ПЭ <sub>2</sub>	...	ПЭ <sub>N-1</sub>	ПЭ <sub>N</sub>
ПЭ <sub>1</sub>	1	$V_{1/2}^m$	...	$V_{1/N-1}^m$	$V_{1/N}^m$
ПЭ <sub>2</sub>	$V_{2/1}^m$	1	...	$V_{2/N-1}^m$	$V_{2/N}^m$
.	.	.	...	.	.
ПЭ <sub>N-1</sub>	$V_{N-1/1}^m$	$V_{N-1/2}^m$	...	1	$V_{N-1/N}^m$
ПЭ <sub>N</sub>	$V_{N/1}^m$	$V_{N/2}^m$	...	$V_{N/N-1}^m$	1

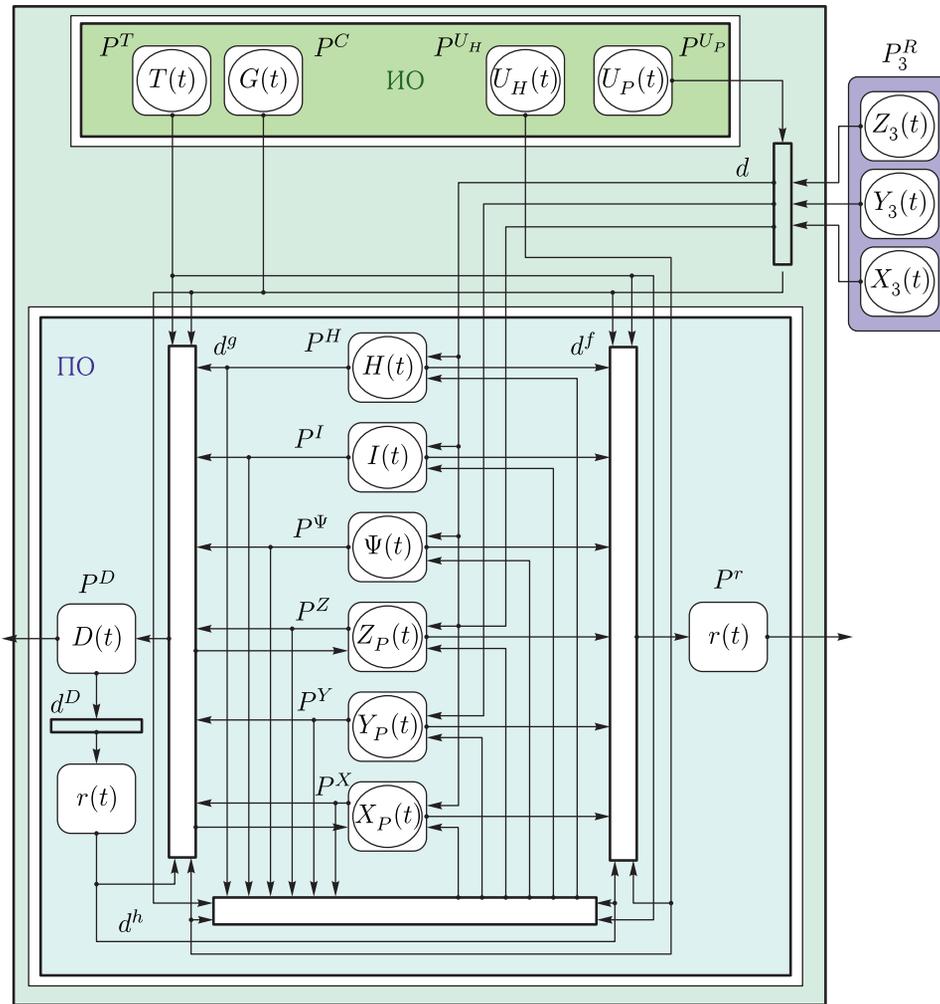


Рис. 3. Структура математической модели функционирования ПЭ в формализмах языка сетей Петри

Таблица 2. Учет влияния изменений показателей качества ПЭ

$T_j^G(t)$	ПЭ <sub>1</sub>	ПЭ <sub>2</sub>	...	ПЭ <sub>N-1</sub>	ПЭ <sub>N</sub>
ПЭ <sub>1</sub>	1	$V_{1/2}^k$	...	$V_{1/N-1}^k$	$V_{1/N}^k$
ПЭ <sub>2</sub>	$V_{2/1}^k$	1	...	$V_{2/N-1}^k$	$V_{2/N}^k$
.	.	.	...	.	.
ПЭ <sub>N-1</sub>	$V_{N-1/1}^k$	$V_{N-1/2}^k$	...	1	$V_{N-1/N}^k$
ПЭ <sub>N</sub>	$V_{N/1}^k$	$V_{N/2}^k$	...	$V_{N/N-1}^k$	1

моделей, отражающих процесс функционирования ресурсных компонентов в ходе производства.

Для программно-технической реализации математических моделей ПЭ используются формализмы сетей Петри (рис. 3), обеспечивающие дис-

кретное отражение изменения состояний от  $m_1(t)$  до  $m_5(t)$  работоспособности ПЭ, что, в свою очередь, влияет на функциональную готовность и состояние работоспособности виртуальной ПФ.

Работоспособность каждого ресурса (рис. 3) представлена состоянием обобщенного накопителя. В частности, технологический ресурс характеризуется количественным и качественным показателями обобщенного накопителя —  $P^T = \langle m^T(t), k^E(t) \rangle$ .

Различные ТС характеризуются зависимостью «выпуск–затраты», отражающей эффективность технологического множества  $\Omega$ , на котором задаются векторные отображения ПФ выпуска «полезного» продукта —  $e = F_i(t)$  и функции отходов  $r = F(t): e = F(r), r = H(e) \mid \langle e, r \rangle \in \Omega$  [13, 15].

При разработке модели выпуска «полезной» продукции ПЭ используется модель ПФ Коба–Дугласа, с помощью которой описывается переход выпуска полезной продукции —  $d^f$ :

$$r_j = a_j \prod_j e_{ij}^{\alpha_i}, \quad j \in \overline{1, J}, \quad (1)$$

где  $r_j$  — количество полезного продукта, выпускаемого ПЭ в единицу времени;  $e_{ij}$  — производственный потенциал  $i$ -го типа ресурса, используемого для производства продукта —  $r_j$  в  $j$ -м производственном процессе;  $a_j$  — масштабный коэффициент, характеризующий качество используемого в  $j$ -м ТС производства;  $\alpha_i$  — показатели степени, характеризующие вклад  $i$ -го ресурсного компонента, используемого в данном ТС ( $\sum_i \alpha_i = 1$ ),  $i = \overline{1, N}$ ;  $N$  — число используемых в  $j$ -м производстве типов ресурсов.

В соответствии с выражением (1) математическая модель работы перехода  $d^f$ , формирующего количественный уровень выпуска полезного продукта, зависит от состояния обобщенного накопителя  $P^*$  и может быть представлена выражением вида

$$\begin{aligned} r(t) &= a^{fm} u_H(t) Q(t) \left[ P^{fx}(t) \right]^{\alpha^{fm_x}} \times \\ &\quad \times \left[ P^{fy}(t) \right]^{\alpha^{fm_y}} \left[ P^{fz}(t) \right]^{\alpha^{fm_z}}, \\ k(t) &= a^{fk} u_H(t) Q(t) \left[ P^{fx}(t) \right]^{\alpha^{fk_x}} \times \\ &\quad \times \left[ P^{fy}(t) \right]^{\alpha^{fk_y}} \left[ P^{fz}(t) \right]^{\alpha^{fk_z}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $r(t)$  — текущий уровень выпускаемого ПЭ «полезного» продукта;  $a^f$  — масштабный коэффициент ( $a_r^f \geq 0$ ), определяющий уровень применяемого ТС;  $Q(t)$  — показатель качества организационно-технологических условий производства, который задается выражением

$$Q(t) = [k^T(t)]^{\eta^{fD}} [k^H(t)]^{\eta^{fH}} [k^I(t)]^{\eta^{fI}} [k^\psi(t)]^{\eta^{f\psi}}, \quad (3)$$

где  $k^T(t) > 0$ ,  $k^H(t) > 0$ ,  $k^I(t) > 0$ ,  $k^Y(t) > 0$  — показатели качества нематериальных ресурсов;  $\eta^{fT}$ ,  $\eta^{fH}$ ,  $\eta^{fI}$ ,  $\eta^{fY}$  — показатели влияния внешних факторов на нематериальные ресурсы [15].

Организации, участвующие в наукоемких проектах и высокотехнологичных производствах, как

правило, располагаются на значительном расстоянии друг от друга и используют различные, иногда сложно сопрягаемые научно-технические и инженерные решения, разнородное технологическое оборудование и программное обеспечение (ПО).

Поскольку ТС является экзогенным производственным фактором и задается перед началом производственного процесса, необходимо:

1. Определить состояние готовности технологического ресурса к производственному процессу в соответствии с моделью, дискретно отображающей состояние виртуального технологического ресурса (рис. 2), понимая, что только при состоянии  $m_1^T(t)$  — полной технологической готовности — следует приступать к производству высокотехнологичной продукции.

2. В процессе производства существуют риски, связанные с деградацией и снижением качественных и количественных показателей материальных и нематериальных ресурсных компонентов, которые могут оказать негативное воздействие на состояние технологического ресурса, вплоть до остановки производства.

При рассмотрении объекта исследования в виде ПЭ его математическая модель описывается выражением вида

$$\begin{aligned} r(t) &= a u_H(t) Q(t) \mathfrak{S}_X^{\alpha_X}(t) \mathfrak{S}_Y^{\alpha_Y}(t) \mathfrak{S}_Z^{\alpha_Z}(t) \times \\ &\quad \times \mathfrak{S}_G^{\alpha_G}(t) \mathfrak{S}_T^{\alpha_T}(t) \mathfrak{S}_I^{\alpha_I}(t) \mathfrak{S}_\Psi^{\alpha_\Psi}(t) \mathfrak{S}_H^{\alpha_H}(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $r(t) = r_{\Pi}(t) + r_Y(t) + r_O(t)$ ,  $r_{\Pi}(t)$ ,  $r_Y(t)$ ,  $r_O(t)$  — виртуальные целевые, управляющие и обеспечивающие продукты, произведенные в единицу времени;

$a$  — масштабный коэффициент, характеризующий технологию производства;

$u_H(t)$  — показатель, определяющий качество управления ресурсами;

$Q(t) = k_T^{\eta_T} k_I^{\eta_I} k_\Psi^{\eta_\Psi} k_H^{\eta_H}$  — показатель, характеризующий уровень организационно-технических условий;

$k_T^{\eta_T}$ ,  $k_I^{\eta_I}$ ,  $k_\Psi^{\eta_\Psi}$ ,  $k_H^{\eta_H}$  — показатели качества условий производства;

$\mathfrak{S}_X(t)$ ,  $\mathfrak{S}_Y(t)$ ,  $\mathfrak{S}_Z(t)$ ,  $\mathfrak{S}_G(t)$ ,  $\mathfrak{S}_T(t)$ ,  $\mathfrak{S}_I(t)$ ,  $\mathfrak{S}_\Psi(t)$ ,  $\mathfrak{S}_H(t)$  — показатели потенциалов, вовлекаемых в производство материальных и нематериальных активов;

$\eta_T + \eta_I + \eta_\psi + \eta_H = 1$  — показатели, характеризующие возможность эластичной замены производственных условий;

$\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z, \alpha_G, \alpha_T, \alpha_I, \alpha_\psi, \alpha_H$  — показатели эластичности изменения ресурсных компонентов производственного потенциала [15].

Условиями выполнения производственного задания являются:

1. Соответствие заданного количества производимого продукта произведенному —  $R(T_0) \geq R_3(T_0)$ ,  $R(T) = \int_0^T r(t) d(t)$ , где  $T_0$  — время производства,  $R(T_0)$  и  $R_3(T_0)$  — показатели произведенные и заданные (плановые).

2. Показатель качества производимой продукции должен соответствовать заданному качеству, т.е. быть не хуже —  $k(t_0) \geq k_3(t_0)$ , где:  $k(t_0)$  и  $k_3(t_0)$  — показатели качества продукции реальные и заданные (плановые).

Несмотря на то, что технологический ресурс относится к экзогенным факторам, в цифровой модели производственного процесса должна быть предусмотрена функция контроля состояния и возможность восстановления его работоспособности. Из выражений (3) и (4) со всей очевидностью следует возможность эластичной замены в виртуальном двойнике элементов из состава материальных и нематериальных ресурсных компонентов, состояние которых характеризуется высокими рисками и способно оказать негативное воздействие на работоспособность технологического ресурса. В этой связи предлагается обратить внимание на следующие обстоятельства:

– *необходимость учитывать риски деградации важных составляющих материальных и нематериальных ресурсных компонентов, которые могут оказать негативное воздействие на состояние работоспособности технологического ресурса;*

– *устойчивость и более высокая надежность технологического ресурса должна обеспечиваться, в том числе путем планирования и проработки вариантов эластичной замены и/или дублирования критических позиций.*

Цифровой двойник представляет собой должным образом синхронизированную в виртуальном пространстве совокупность мегамассивов информации и данных о физическом объекте и процессах,

обеспечивающих в режиме реального времени конвергенцию на протяжении ЖЦ между физическими и виртуальными состояниями, и рассматривается в качестве цифровых репродукций живых и неживых сущностей [16]. Физические и виртуальные данные, а также данные взаимодействия между ними отражают состояние объекта [10].

## Заключение

В условиях цифровой трансформации, компьютерного моделирования, цифрового проектирования и производства актуальность приобретают методы и формы моделирования нематериальных ресурсных компонентов, среди которых особое значение для оценки работоспособности объекта имеет показатель, характеризующий состояние технологического ресурса, подверженного различным рискам и воздействиям в условиях сетевого взаимодействия всех ресурсных составляющих объекта исследования в пространственно распределенной (по трем координатам) среде и в единой системе времени.

Одной из важнейших задач цифрового двойника предприятия, решаемых с помощью цифрового производственного планирования, является оценка рисков, выявление и контроль критических позиций («узких мест») технологического процесса, планирование вариантов оперативных действий по поддержанию заданного состояния работоспособности, в том числе с применением для обеспечения плановых количественных и качественных производственных показателей методов эластичной замены ресурсных компонентов, утративших заданное состояние работоспособности.

При разработке динамической цифровой модели целесообразно предусмотреть рациональные варианты эластичной замены тех или иных ресурсных составляющих, влияющих на работоспособность технологического ресурса с учетом того, что:

– избыточное дублирование неприемлемо с точки зрения больших затрат на содержание резервных компонентов и работу в условиях неполной загрузки;

– недостаточное резервирование сопряжено с риском остановки производственного процесса

при недостаточной надежности материальных и нематериальных ресурсных компонентов, что может иметь критическое значение при возможном вынужденном простое.

## Список литературы

1. Путин В. В. Совещание по вопросам развития технологий в области искусственного интеллекта. <http://kremlin.ru/events/president/news/60630>
2. Computing Curricula 2005. The Overview Report // ACM and IEEE Computer Society, 2005. 62 с.
3. Братухин А. Г., Дмитриев В. Г. Стратегия, концепция, принципы CALS // Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / Гл. ред. А. Г. Братухин. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. С. 15–26.
4. Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф., Ибрагимов И. М., Никифоров А. Д. Информационная поддержка жизненного цикла изделий машиностроения: принципы, системы и технологии CALS/ИПИ: Учеб. пособ. для студентов вузов. М.: ИЦ «Академия», 2007. 304 с.
5. Дерябин Н. И., Куприков М. Ю., Маркин Л. В., Денискин Ю. И., Брагинцева Л. М., Евдокименко В. Н., Латышева В. В. Кадровое обеспечение // Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / Гл. ред. А. Г. Братухин. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. С. 557–575.
6. Жамойдик Т. И., Ревяков Г. А. Научно-методические подходы к решению задачи моделирования предприятия на базе концептуальных положений цифровых технологий // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2021, т. 8, вып. 2. С. 32–42.
7. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии»/ КонсультантПлюс: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru). 2022.
8. Губинский А. М. Управление технологическим развитием в сфере обороны и безопасности России, США и Китая: Исторические аспекты и современный опыт. Т. II. США. М.: Издательские решения, 2021. 710 с.
9. Ревяков Г. А. Моделирование жизненного цикла научно-технической продукции // Наука и технологии: В 2-х тт. Т. 2. Материалы XXXIX Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. М.: РАН, 2019. С. 75–83.
10. Graig F. Lee, David Chadwick. The Virtual Organization Concept for Authorization Management in Federated Clouds, Open Stack Design Summit. Hong Kong, November 8, 2013.
11. Vice Admiral Arthur K. Cebrowski, U.S/ Navy, and John J. Garstka. Network-Centric Warfare: Its Origin and Future / January 1998.
12. Большая российская энциклопедия. Т. 32. М.: БРЭ, 2016. С. 113–114.
13. Ревяков Г. А. Имитационное моделирование жизненного цикла изделий на базе научно-методического аппарата анализа и представления объектов информационного взаимодействия // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации ВВСТ». СПб.: ВКА, 2018. С. 69–76.
14. Ревяков Г. А. Моделирование предприятия на базе научно-методического аппарата анализа и представления объектов информационного взаимодействия // Сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». М.: АО «РКС», 2018. С. 549–566.
15. Логутова Л. В., Ревяков Г. А. Интеллектуальная система управления предприятием / Описание к патенту на изобретение № 2746687. Бюлл.: № 11. М.: ФИПС, 2021. 28 с.
16. Bolton R. N. et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms // J. of Service Management, 2018, vol. 29, № 5. P. 776–808.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.08.2023  
Дата принятия рукописи  
в печать 27.10.2023