

**THE CONCEPT OF TRANSFORMATION OF THE MODEL OF PLANNING  
AND MANAGEMENT PROCESSES BASED ON THE DIGITAL TWIN  
OF THE PRODUCTION SYSTEM IN THE INDUSTRIAL MODEL  
OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE**

A. V. Rechkalov <sup>1a</sup>, A. V. Artuhov <sup>1b</sup>, G. G. Kulikov <sup>2c</sup>, V. N. Novikov <sup>2d</sup>

<sup>1</sup> Ufa Engine Industrial Association (UMPO)

<sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University (USATU)

<sup>a</sup> av@rechkalov.ru, <sup>b</sup> artyukhov@uecrus.com, <sup>c</sup> gennadyg\_98@Yahoo.com, <sup>d</sup> oka\_project@mail.ru

Submitted 2021, September 30

**Abstract.** Within the framework of the basic concepts of system engineering, an approach to the formalization and integration of existing weakly structured models in the form of Planning and production, Management, etc., implemented by traditional (in accordance with GOST) is investigated and proposed The automated control system of the MP in the form of the Central data center of the production process and its control system through sequential digital transformation. The necessary methodological and informational requirements are defined to ensure the identifiability, traceability and manageability of the production processes of enterprises for decision-making during planning and management.

**Keywords:** production systems; digital twin; digital twin; decision support system (DSS); smart factory; planning system.

**КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ  
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО  
ПРОЦЕССА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

А. В. Речкалов <sup>1а</sup>, А. В. Артюхов <sup>1б</sup>, Г. Г. Куликов <sup>2в</sup>, В. Н. Новиков <sup>2г</sup>

<sup>1</sup> АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК»)

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

<sup>a</sup> av@rechkalov.ru, <sup>b</sup> artyukhov@uecrus.com, <sup>c</sup> gennadyg\_98@Yahoo.com, <sup>d</sup> oka\_project@mail.ru

Поступила в редакцию 30.09.2021

**Аннотация.** В рамках базовых понятий системной инженерии исследован и предложен подход к формализации и интеграции существующих слабоструктурированных моделей производственного процесса в форме конструкторско-технологической, нормативно-справочной, плано-производственной, управленческой документации, реализуемых традиционными (в соответствии с ГОСТ) автоматизированными в форме динамической модели ЦД производственного процесса. Определены необходимые методические и информационные тре-

бования для обеспечения идентифицируемости, прослеживаемости и управляемости ЦД производственных процессов предприятий для принятия решений (ПР) при планировании и управлении.

**Ключевые слова:** производственные системы; цифровой двойник; digital twin; система поддержки принятия решения (СППР); smart factory; система планирования.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение уровня специализации производства как основная цель трансформации производственной системы создаваемых в настоящее время машиностроительных холдингов позволяет сконцентрировать ресурсы на определенных технологических направлениях, повысить производительность труда и качество отдельных элементов производственного процесса и выпускаемой продукции в целом, снизить затраты на производство и себестоимость выпускаемой продукции.

Следствием такой трансформации является скачкообразный рост внутрикорпоративных межзаводских поставок, что, в свою очередь, влечет за собой увеличение межзаводского информационного потока и необходимость усложнения и даже принципиального пересмотра методов управления производством. Если в прежней производственной структуре на уровне головной компании холдинга решались, в основном, вопросы стратегического плана, то сейчас на новый уровень выходит необходимость расширения участия головной организации в среднесрочном планировании и оперативном управлении производством и межзаводскими поставками. Учитывая возрастающий информационный поток, такая трансформация системы управления может быть реализована только на основе пересмотра сложившихся традиционных подходов и методов построения информационных систем, в том числе и с учетом современных методологий, определяемых четвертой промышленной революцией, в том числе на основе формирования цифровых двойников.

Четвертая промышленная революция Industry 4 предполагает кардинальное преобразование в области систем управления производственными системами (ПС), потреблением, транспортировкой и поставками ресурсов. Инфраструктура этих систем определяется, прежде всего, применением современных информационных технологий (ИТ). Интеграция цифровых ИТ нового поколения требует трансформации информационных метамоделей (ИМ) управления предприятиями, метамоделей хозяйственной деятельности и в целом бизнес-моделей производственных систем [1–3].

В целом цифровая трансформация промышленности и индустриализация цифровых технологий становятся принципиальным направлением развития предприятий и промышленных комплексов. Темпы цифровой трансформации предприятий определяют и прогресс в развитии общества. Так, по результатам исследования центра IDC, к 2020 году по меньшей мере 55 % организаций были убежденными сторонниками цифровой трансформации. С помощью новых бизнес-моделей и цифровых продуктов и услуг меняется рынок и формируется будущее.

Однако отметим, что эффективное развитие промышленного производства и, в частности, машиностроительного, характеризуется, прежде всего, четким определением его объективных границ, обусловленных технологическими процессами и необходимыми ресурсами. Современные ИТ позволяют не только сопоставить указанные реальные объекты и их связи с ИМ, но и формировать новые виртуальные объекты и связи. При неуправляемом развитии системы это повышает энтропию всей производственной системы, то есть увеличивает хаос. Поэтому цифровую трансформацию и развитие ПС необходимо осуществлять в соответствии с законами как объективного, так и необходимого их разнообразия.

В последние годы во главу угла развития информационных технологий в целом и искусственного интеллекта, в частности, ставится технология цифрового двойника (digital twin – ЦД). В традиционных решениях (без использования ЦД) производственные процессы планируются на основе заранее произведенных расчетов в функциональной (алгоритмической) форме, которые обновляются ежемесячно или ежеквартально. В реальном производстве запланированные процессы имеют отклонения от заранее рассчитанного плана из-за внутренних и внешних воздействий и могут принимать форму неявно выраженных функций, определяемых дифференциально-интегральными уравнениями. Цифровой двойник должен воспринимать (*учитывать*) самые разные ситуации, в том числе и нештатные, неявно выражаемые, через консолидированные данные, которые можно использовать для анализа и прогноза. Данные о состоянии производства собираются в единую систему в режиме реального времени, обрабатываются, анализируются и позволяют определить узкие места и отклонения в производственном процессе, что, в свою очередь, позволяет устранять проблемы, связанные с отклонениями.

Такой цифровой двойник позволит в виртуальном пространстве адекватно смоделировать текущее состояние и прогноз изменения состояния и характеристик всего производственного процесса.

#### ЛОГИКО-СЕМАНТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Если определить понятие цифрового двойника полно (рефлексивно), то цифровой двойник – это цифровое представление реального объекта или системы с его виртуальным дополнением.

Как отмечается в [2], первоначально концепция ЦД в менеджменте была озвучена Майклом Гривсом на PLM (Product Lifecycle Management) форуме в Мичиганском университете в начале 2002 г. и позднее, в 2003 г. была представлена на конференции по PLM. Суть концепции состояла в том, что каждый объект можно представить в виде физической и виртуальной системы так, что виртуальная система отображает физическую, и наоборот. При этом подчеркивается, что концепция взаимодействия физического продукта в реальном мире, его цифровой копии в виртуальном мире и наличия информационной связи между ними, объединяющей виртуальное и материальное пространство, по сути и отображает идею ЦД. При этом отмечается, что понятие «ЦД» находится еще в стадии формирования и унификации производных терминов.

В рамках технологии ЦД для физического объекта (изделия, единицы оборудования или процесса) в определенных для них точках зрения, аспектах, сечениях, срезах и т.д. создается математическая модель, которая в дальнейшем используется для анализа поведения объекта или процесса как взаимодействия совокупности объектов. Цифровая модель, как и соответствующий объект, не может быть статичной, она должна сохранять и свойство рефлексии. Она должна постоянно обновляться, чтобы максимально полно соответствовать текущему состоянию объекта во внешней среде. Именно максимальное соответствие ЦД моделируемому объекту, находящемуся под воздействием внешней среды, создает предпосылки для решения принципиальной задачи – моделирования поведения объекта в будущем.

Если на ранних стадиях управления жизненным циклом (PLM) появляются «цифровые двойники» изделий в среде CALS, то на стадии интеллектуального завода (Smart Factory) встает новая актуальная задача – эффективного использования технологического оборудования предприятия на основе цифровизации производства. Возникает необходимость формализации создания цифрового дуализма иного рода – «цифрового двойника» производственной системы (ПС) – инструмента, моделирующего производственные процессы. «Цифровой двойник» (Digital Twin) – формулируется как фундаментальное понятие «цифрового производства» (Smart Factory).

Профессор А. И. Боровков выделяет два типа цифровых двойников – цифровые двойники объекта/продукта (Digital Twin, DT-1) и цифровые двойники производства (Digital Twin, DT-2), которые в основе своей имеют «умную» модель, учитывающую особенности конкретного производства в форме предикатного (терминально-логического) выражения. То есть «умная» математическая модель учитывает особенности производственных операций, таких как литье, штамповка, сварка, сборка и т.д. [4]. Очевидно, что цифровой двойник изделия в процессе производства не существует сам по себе. Он связан со множеством цифровых двойников других объектов, участвующих в процессе производства. Для представления такой совокупности применяется понятие «умной фабрики» (Smart Factory), которое следует связывать как с самим изделием (в этом случае применяется термин «цифровой двойник изделия»), так и с процессом изготовления изделий. В этом случае используется термин «цифровой двойник производственной системы» [5].

Концептуальной схемой верхнего уровня представления таких моделей, как правило, являются семантические атрибутивные описания в форме гипертекстовых и продукционных БЗ, составляющих основу структуры ЭС производственного управления.

В [6, 7] производственная система определяется как особый вид организационно-технической системы, состоящей из средств и предметов производства, базы конструкторско-технологической информации, производственных процессов и комплексов управления ими, совместное функционирование которых позволяет изготавливать изделия, отвечающие своему служебному назначению. Такое представление также подтверждается определением понятия ПС в [6]: производственная система – это большая, сложная, кибернетическая система взаимосвязанных и взаимообусловленных элементов производственного процесса, технической и организационной упорядоченности производства, образующих единое целое, и функционирующих в целях производства промышленной продукции или оказания услуг.

Например, Е. Б. Фролов в [8], подчеркивает, что наиболее сложным для практической реализации является эксплуатационная модель «цифрового двойника» ПС, на которую, в частности, возлагаются следующие функции:

1. Проводить необходимые расчеты для принятия управленческих решений.
2. Отображать в режиме реального времени производственные процессы, протекающие в производственной системе.
3. Проводить различные эксперименты «что если» путем математического моделирования производственных процессов.

Стандарт ПСНТ 429-2020 [9] формулирует понятие цифрового двойника (digital twin) как программно-аппаратный комплекс, реализующий комплексную динамическую модель для исследования и управления деятельностью социотехнической системы.

Данные определения соответствуют представлению производственной системы в виде контура управления (рис. 1), где собственно производственный процесс (ПП) выступает как объект управления, а его ЦД – как процесс управления.



Рис. 1. Укрупненная структура производственной системы

Цифровой двойник производственной системы (ПС) – это виртуальное воспроизведение рабочего состояния реальной производственной системы в цифровом пространстве, включающей как состав ЦД объектов производственного процесса, так и ЦД процесса управления как модели взаимодействия этих объектов в процессе производства. По сути это набор математических моделей в их теоретико-множественной и функциональной нотациях с применением функций в явной и не явно выраженных (уравнений) формах дискретной математики, описывающих состояние объекта и всех его элементов. В общем случае ЦД включает математические модели основных физических объектов (прежде всего ресурсов) и математические модели их взаимодействия в производстве (математические модели процессов, описывающие все варианты взаимодействия этих ресурсов).

В. М. Дозорцев со ссылкой на М. Гривза говорит о формулировке трехчастной модели цифрового двойника «физический объект + виртуальная модель + связи между ними», которая определила связь ЦД с киберфизическими системами, включающими помимо машин и их ЦД также и людей [10].

Такая трактовка понятия ЦД вполне обоснована и подтверждает классическое представление контура управления, состоящее из объекта и субъекта управления, обратной связи и управляющего воздействия, где объектом управления выступает производственный процесс. Информационное взаимодействие производственного процесса и процесса управления в классическом варианте представлено в виде контура с обратной связью, где производственный процесс можно интерпретировать как среду, порождающую информацию, процесс управления – как среду, использующую информацию, а Обратную связь и Управляющее воздействие – как процессы взаимосвязи ЦД и ПП (рис. 2).

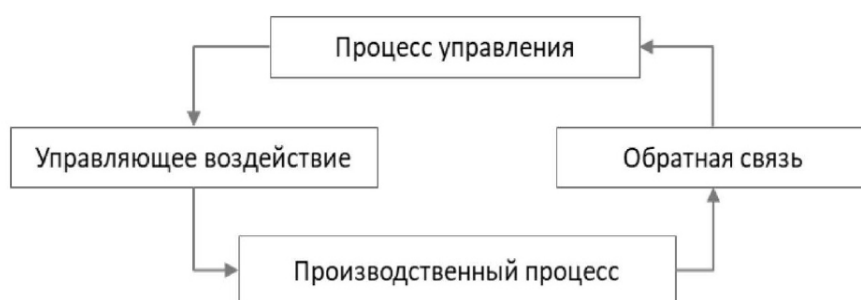


Рис. 2. Контур управления производственным процессом

При этом очевидно ядром ЦД в рамках производственной системы должна быть ситуация с учетом различных факторов, определяющих взаимодействие задействованных в процессе производства ресурсов и получение результата этого взаимодействия – продукта: от эксплуатационных характеристик и доступности ресурсов, перемещения материалов и полуфабрикатов и выполнения производственных операций до реакции приборов автоматического регулирования на изменение этих характеристик. Это определяется задачами бизнеса, типами изделия или объекта, особенностями ресурсов и др.

Основным элементом производственной системы является производственный процесс (ПП), классическая структура которого представлена на рис. 3 [13, 14], определяемого как процесс взаимодействия производственных ресурсов: Средств труда (СТ), Предмета труда (ПТ) и Трудовых ресурсов (ТР), в результате которого реализуется цель производственного процесса – Продукт (ПР).



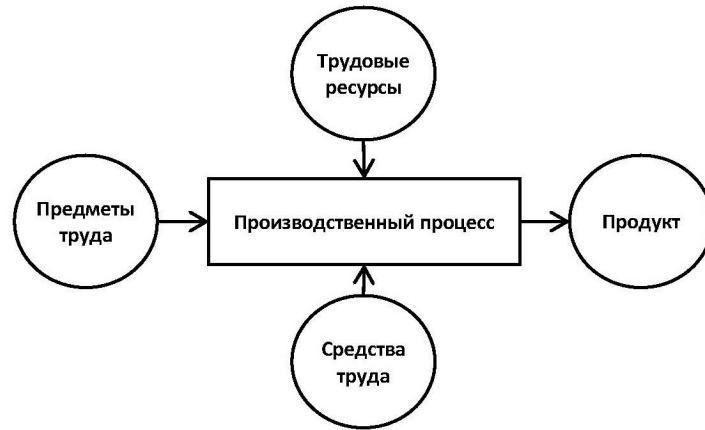


Рис. 3. Общее представление производственного процесса

Процесс производства как физический объект и его цифровой двойник вместе составляют дактическую пару и могут быть с учетом включаемых ЦД объектов ПП объединены понятием «Производственная система». Данный вывод соответствует формулировкам, приведенным в стандарте [9]: «Цифровой двойник производства представляет собой цифровую модель, которая постоянно обновляется и изменяется по мере изменения физического аналога с целью синхронного представления данных о статусе, условиях работы, конфигурации продукта и состоянии ресурсов».

Исходя из этого положения, можно определить свойство цифрового двойника производственного процесса как виртуальное воспроизведение не только рабочего состояния реальной производственной системы в каждый момент времени, но и прогноза (плана) этого состояния во времени на основе принципа управляемого Марковского процесса (цепи Маркова), когда прошедшее состояние определяет настоящее, а настоящее определяет будущее состояние, которое при сравнении с целевыми показателями образует контур обратной связи.

В отличие от традиционных систем АСУ цифровой двойник производственного процесса не просто отражает состояние ресурсов в процессе производства и планирует состояние и использование этих ресурсов, а обрабатывает информацию о их состоянии в режиме реального времени и прогнозирует изменение потребности в ресурсах, загрузки оборудования с выдачей рекомендаций по оптимизации производственных расписаний.

В основе ЦД производственного процесса лежит модель, учитывающая реальные параметры технологических процессов, материалов, оборудования, инструмента и трудовых ресурсов или ЦД технологического процесса, который является и основой организации собственно производственного процесса.

Цифровой двойник производственного процесса как математическая категория множеств может быть построен на базе набора цифровых двойников элементов процесса [2]: ЦД компонента (Component Twin) включает предметы труда – материалы, полуфабрикаты, комплектующие, детали, сборочные единицы; ЦД актива (Asset Twin) включает активы ресурсов производственной системы – основные средства, трудовые ресурсы, инструменты; ЦД комплексного объекта (System Unit Twin) включает результат производственного процесса или продукт, используемый в другом процессе как ресурс или потребляемый человеком; ЦД производственного процесса (Process Twin) отражает процесс взаимодействия ресурсов – СТ, ПТ и ТР с целью получения ПР.

В общем представлении ЦД технологического процесса содержит пять групп моделей: группа моделей продукции, включающая модели взаимосвязи предметов труда в рамках про-

дукта, содержащая количественные, временные, стоимостные и качественные характеристики; группа моделей предметов труда, включающая модели характеристик и параметров каждого обособленного предмета труда и связь с технологической операцией; группа моделей средств труда, включающая модели характеристик и параметров каждого обособленного ресурса, определяющих участие ресурсов в технологической операции; группа моделей трудовых ресурсов, включающая модели характеристик и параметров каждого обособленного ресурса, определяющих участие ресурсов в технологической операции; группа моделей технологических операций, включающая модели взаимосвязи предметов труда и ресурсов, формирующих технологический процесс, включая количественные, временные, стоимостные и качественные характеристики, определяющие участие в процессе производства; группа моделей технологических маршрутов, формирующих последовательность выполнения операций.

Надо отметить ряд моментов, уточняющих приведенное общее представление. Средства труда и трудовые ресурсы в подавляющем большинстве случаев связаны между собой понятием «Рабочее место» или более обобщенно – «Рабочий центр». Соответственно, в рамках модели технологического процесса должно быть сформировано понятие «модель Рабочего центра». Как отмечалось выше, технологический процесс содержит элементы формирования не только количественных, но и качественных и стоимостных характеристик продукции, что, в конечном итоге позволяет дифференцировать модели ЦД: модель количественных характеристик технологической операции (ТО); модель качественных характеристик ТО; модель стоимостных характеристик ТО.

Совокупность данных цифровых двойников представляет собой модель технологического процесса или статическую модель цифрового двойника производственного процесса (рис. 4), которая, по сути, является основой и эталоном организации производственного процесса.



Рис. 4. Общее представление взаимосвязи технологического процесса и производственного процесса

ЦД технологического процесса отражает процесс производства продукции безотносительно количества и сроков их потребности. Потребность продукции, по сути, отображается динамической моделью или моделью процесса планирования выпуска продукции, определяющим динамические характеристики потребности всех элементов ПП. Таким образом, совокупность моделей технологического процесса и моделей планирования и управления выпуском продукции определяют модель ЦД ПП. Исходя из вышесказанного, можно определить, что Цифровой двойник ПП содержит статическую модель состояния и взаимосвязи производственных ресурсов (модель технологического процесса) и динамическую модель планирования и управления производством, отражающую взаимодействие ресурсов в процессе производства продукции (рис. 5), в результате чего реализуется контур управления процессом производства продукции, показанный на рис. 2.

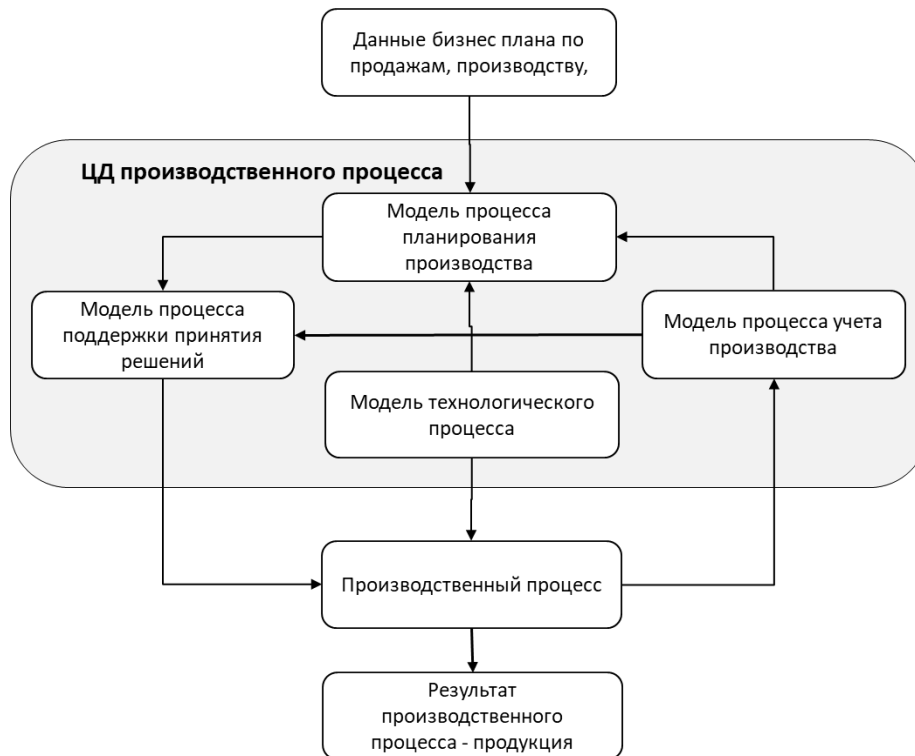


Рис. 5. Концептуальная динамическая модель цифрового двойника производственного процесса

Деление моделей на статические и динамические подтверждается предложенным в [5] делением ЦД на Цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, DTP), которые можно считать условно-постоянной или статической виртуальной моделью объекта и, которые содержат информацию о геометрическом и структурном описании объекта, технические требования и условия, необходимые для реализации ПП, и Цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, DTI), которые описывают конкретный физический экземпляр объекта, с которым DTP-двойник остается связанным на протяжении всего периода изготовления и срока службы и которые содержат производственную и эксплуатационную информацию. DTI-двойник изделия подвергается изменениям в соответствии с изменениями физического экземпляра при его изготовлении и эксплуатации и его можно считать целевым результатом динамической модели объекта.

Резюмируя, необходимо отметить, что ЦД ПП решает задачу формирования прогноза поведения ресурсов и предметов труда во времени в рамках их целевого взаимодействия при производстве готовой продукции в рамках реализации динамической модели ПП. Динамическая модель ПП, построенная на основе статической модели, отражает динамику целевых количественных характеристик ресурсов и выпускаемого продукта во времени. Динамический характер модели ЦД отражается и в стандарте [9]: «Цифровой двойник производства позволяет контролировать производство в режиме реального времени с целью динамического управления объемом производства и соответствия производственному плану». В данном случае потребности продукта во времени представляют собой входные переменные, потребности в остальных ресурсах – выходные переменные, а модель описывает неустановившийся режим ПП.

Производственная система, состоящая из ПП и совокупности ЦД, по определению является элементом системы более высокого уровня, которую можно сформулировать как Бизнес



система. Физическим объектом бизнес системы кроме процесса производства продукции естественным образом становятся процессы обеспечения всем набором ресурсов (обеспечивающие процессы), необходимых для осуществления ПП, обеспечения финансовыми ресурсами, стратегического планирования и др. В соответствии со структурой выделенных объектов и формируется состав соответствующих ЦД.

В работах [13, 14] на основании анализа структурного построения и развития АСУП машиностроительного предприятия (АСУП МП) в соответствии с ГОСТ 19, 34 и др. групп проведено в форме когнитивных и логических аналогий исследование и формализация информационной интерпретации производственных знаний и данных для информационной поддержки принятия производственных решений с применением принципов системной инженерии. Было показано, что традиционная АСУП МП представляет, во-первых, слабоструктурированную комплексную информационную метамодель, отображающую организацию ПП на основе БД нормативно-производственной и конструкторско-технологической информации, во-вторых, это БД показателей (параметров) реальных ПП.

Показано, что количество информации в АСУП, в соответствии с принципом необходимого разнообразия Эшби при определенных условиях может достичь соответствия необходимому уровню управляемости производственными процессами. Таким образом, методы и модели традиционных АСУП можно интерпретировать как слабоструктурированный цифровой двойник, требующий дальнейшей трансформации на новых принципах организации для повышения адекватности формируемых моделей реальной системе и поэтапного приближения к условиям закона Эшби.

#### **ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА**

В соответствии с законом Эшби оптимальное управление достигается при условии соответствия разнообразия управляющего воздействия разнообразию управляемого. Данное свойство обеспечивается двумя факторами: полным знанием поведения управляемой системы со стороны управляющей системы и способностью превратить это знание в адекватное отражение в рамках цифрового двойника, т.е. обеспечить формируемые модели требованиям идентифицируемости и прослеживаемости. Для обеспечения идентифицируемости моделей производственных ресурсов необходимо определить набор характеристик, определяющих состояние ресурса.

В основе построения моделей организации лежит нормативно-справочная информация. Совокупность моделей нормативно-справочной информации, содержащая характеристики и параметры элементов производственного процесса предприятия и их взаимосвязей, отражает количественные параметры преобразования предметов труда для производства единичного продукта и составляет основу для идентификации статической модели ПП. Ресурсы и предметы труда, технологические маршруты и операции, лежащие в основе реального ПП в виде структурированного представления всего многообразия, классифицированы и документированы в регламентах Единой системы технологической документации (ЕСТД) и могут быть приняты за основу классификации элементов ПП при формировании модели ПП. Достаточно подробно данные вопросы исследованы в [15].

Данные стандарты определяют как состав и характеристики элементов производственного процесса, так и состав и характеристики их взаимосвязей в процессе преобразования предметов труда в готовое изделие, и могут быть представлены в виде концептуальной модели технологического процесса (рис. 6).

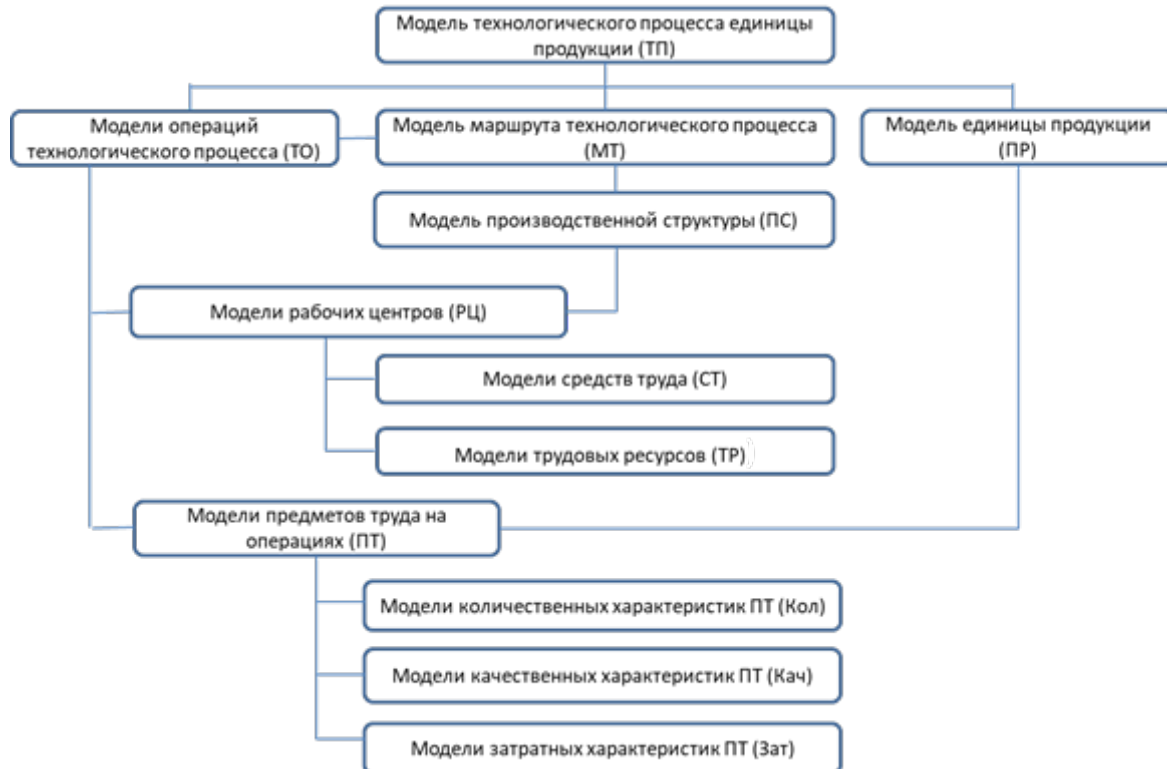


Рис. 6. Концептуальная модель технологического процесса единицы продукции

Концептуальная модель технологического процесса (статическая модель) единицы продукции, представленная на рис. 6, может быть описана с учетом положений, изложенных в [15].

*Модель технологического процесса единицы продукции (ТП)* – составная часть модели производственного процесса, содержащая информацию о целенаправленных действиях по изменению и (или) определению состояния предмета труда. Технологический процесс может быть отнесен к готовому изделию, его составной части или к методам обработки, формообразования и сборки.

В основе технологического процесса лежит определенным образом организованная совокупность производственных ресурсов, документально отраженная в соответствии со стандартами ЕСТД и представляющая собой потенциальную возможность преобразования предметов труда в продукт. Модель технологических процессов единицы продукции формируется на основе интеграции моделей технологических операций, маршрута технологического процесса и единицы продукции (спецификации продукта).

*Единица продукции (ПР)* – предмет труда, определенный как конечная продукция, являющаяся, по существу, целью и результатом производственного процесса. Единица продукции – отдельный экземпляр штучной продукции или определенное в установленном порядке количество нештучной или штучной продукции.

Модель единицы продукции представляет собой спецификацию и технические условия изделия и определяет производственный состав продукта – парные отношения материалов, деталей и сборочных единиц, необходимых для изготовления и сборки изделия в порядке уровня входимости, их применяемости и количественного состава. Модель единицы продукции сформирована на основе состава (классификации) ПТ и разнообразия вариантов входимости и прослеживаемости и содержит десять вариантов связей входимости «Подчиненный ПТ – ПТ Родитель», обеспечивающих прослеживаемость ПТ в производственной спецификации и формирующих спецификацию уникальной единицы продукта.

*Модель технологического маршрута (ТМ)* – сокращенное описание технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения с полным описанием отдельных операций в других технологических документах. Модель ТМ формируется на сочетании состава технологических операций и модели производственной структуры предприятия.

*Модель предметов труда (ПТ)* представляет собой описание набора состояний преобразования исходных ПТ (материала, комплекта ПТ) в процессе выполнения технологических операций, и описание конечного состояния этого ПТ, готового для использования в формировании другого ПТ или продукта. Предметы труда (ПТ) – это взаимосвязанные объекты ПП, полностью овеществляющиеся в конечном продукте (изделии) и сохраняющие Количественные характеристики ПТ, Качественные характеристики ПТ, Затратные характеристики ПТ.

*Модель технологической операции (ТО)* связывает модель количественных, качественных и стоимостных характеристик состояния ПТ на операции и через модель технологического маршрута с моделью РЦ. Технологическая операция (ТО) – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте, обеспечивающая преобразование элементарного ресурса – предмета труда или совокупности предметов труда, в другой предмет труда или продукт. В основе содержания ТО лежит технологический метод.

*Модель производственной структуры (ПС)* сформирована на основе набора типовых вариантов рабочих мест и сгруппированных элементов организационной структуры. ПС представляет собой иерархию обособленных подразделений предприятия.

*Модель рабочих центров (РЦ)* отражает организованную совокупность взаимозаменяемых рабочих мест. В процессе производства средства труда и рабочие в качестве элементарных ресурсов выступают как взаимоувязанные или совокупные условия реализации ПП, которые можно представить в виде совокупного ресурса «рабочее место». Рабочее место – первичная ячейка ПС предприятия, представляющая собой часть производственной площади, оснащенной и оборудованной всем необходимым для выполнения определенной работы и обслуживаемая одним или несколькими рабочими.

*Модель средств труда (СТ)* – доступный ресурс, возможность использования орудий производства, необходимых для осуществления технологического процесса (оборудование, оснастка, инструмент, производственные площади).

*Модель трудовых ресурсов (ТР)* отражает возможность целенаправленных действий человека (рабочего) по реализации ПП, связанных с затратами нервно-мышечной энергии в процессе преобразования предмета труда. Трудовые ресурсы – производственные рабочие и контролеры, непосредственно занятые в производстве.

#### ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ

Планирование ПП – ключевая функция цифрового двойника, модель которой для машиностроительного производства наиболее полно реализована в рамках стандартного решения MRP II. MRP II (англ. manufacturing resource planning – планирование производственных ресурсов) – стратегия производственного планирования, обеспечивающая как операционное, так и финансовое планирование производства. В системе MRP II планирование реализуется внедрением прикладных программных пакетов как в материальном, так и в денежном выражении.

MRP II обеспечивает детальное планирование производства предприятия, включая учет заказов, планирование загрузки производственных мощностей, потребности во всех ресурсах производства (материалы, сырье, комплектующие, оборудование, персонал), планирование производственных затрат, моделирование хода производства, его учет, планирование выпуска готовых изделий, оперативное корректирование плана и производственных заданий. Таким образом, MRP II реализует не только модели планирования, но и модели обратной связи, т.е. производственного и финансового учета.

Модель обратной связи предназначена для регистрации и передачи в модель планирования всей информации о регистрируемых событиях производственной системы. Состав регистрируемых событий определяется событиями, характеризующими те или иные изменения количественных, качественных или затратных характеристик предметов труда и ресурсов, участвующих в ПП, т.е. событиями, определенными моделью технологических операций.

Если данный стандарт рассматривать в рамках его расширенного варианта ERP, то к планированию и учету в материальном и стоимостном выражении добавится функция планирования и учета качественных характеристик производственного процесса.

Модели планирования и обратной связи реализуются с использованием следующих функций:

- Sales and Operation Planning (планирование продаж и операций);
- Demand Management (управление спросом);
- Master Production Scheduling (составление плана производства);
- Material Requirement Planning (планирование материальных потребностей);
- Bill of Materials (спецификации продуктов);
- Inventory Transaction Subsystem (управление складом);
- Scheduled Receipts Subsystem (плановые поставки);
- Shop Floor Control (управление на уровне производственного цеха);
- Capacity Requirement Planning (планирование производственных мощностей);
- Input/output control (контроль входа/выхода);
- Purchasing (материально-техническое снабжение);
- Distribution Resource Planning (планирование ресурсов распределения);
- Tooling Planning and Control (планирование и контроль производственных операций);
- Financial Planning (управление финансами);
- Simulation (моделирование);
- Performance Measurement (оценка результатов деятельности).

Взаимодействие ПТ и РЦ при выполнении производственной операции является ключевым моментом ПП и основным объектом процесса планирования. Разнообразие характеристик такого взаимодействия, сформулированное в [15], определяет разнообразие моделей планирования и возможность их стандартизации и унификации в системах управления производством.

Приведенные выше обоснования структуры и содержания ЦД ПП как составной части ЦД ПС позволили эффективно применить программное обеспечение стандартного MRP решения при внедрении как корпоративной системы управления производством с участием группы входящих в холдинг предприятий, так и реализовать систему управления отдельным машиностроительным предприятием, сформировав на этой базе типовое проектное решение для других предприятий холдинга.

#### **ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Задача управления напрямую связана с обеспечением необходимых информационных условий идентифицируемости и управляемости состояниями ПП, т.е. способности системы к восстановлению плановых состояний в случае воздействия внутренних и внешних возмущающих факторов. Основываясь на моделях, описанных выше, необходимо идентифицировать и определить модели принятия решения для формирования корректного управляющего воздействия. Событием для запуска процесса принятия решения в цифровой системе управления производством является формирование системой сообщений об исключительной ситуации. Сообщения об исключительной ситуации формируются в случае отклонений от нормального хода процессов, в том числе как прогнозируемое отклонение в будущем. Задача

лица, принимающего решение (ЛПР), заблаговременно идентифицировать возникающие отклонения и выработать решение, которое поможет локализовать возникшие или намечающиеся отклонения. С точки зрения концепции построения цифрового двойника подразумевается моделирование принимаемых решений не на реальных процессах, а предварительная проработка принимаемых решений на моделях (рис. 7) [16].

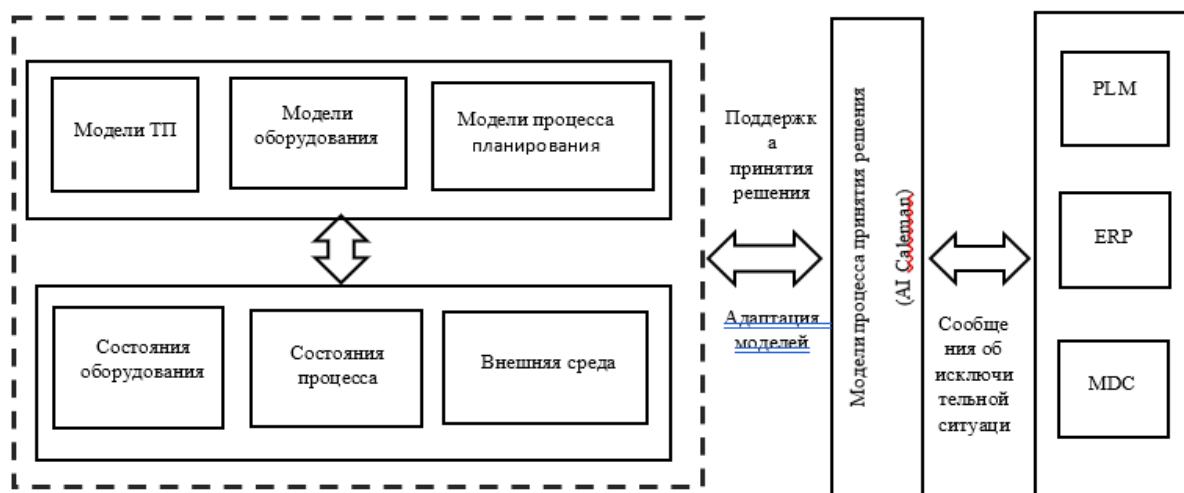


Рис. 7. Структура системы ППР

Также необходимо учитывать, что принятие решения в ПП связано с использованием различных моделей (технологических процессов, производственной системы и др.) и зависит от специфики знаний всех специалистов, участвующих в выработке и принятии решений. С этой точки зрения сбор и интеграция разнородных данных является ключевой задачей при реализации ЦД, что подтверждается в работе [17].

Одним из подходов к описанию предметной области (разнородных моделей) для выявления скрытых связей, недостающих деталей или других неочевидных вещей является использование семантической сети или онтологии. Использование онтологии при разработке ЦД для создания общей базы знаний в качестве центральной части архитектуры ЦД упоминается авторами в работе [18], где описывается использование иерархического подхода к проектированию, состоящего из онтологии верхнего уровня и онтологии домена.

На основе изучения особенностей машиностроительных производств, методов и средств организационно-технологического проектирования предлагается formalizovat знания о предметной области, используя обобщенную онтологию:  $O = (O_i^1 O_j^2 O_k^3)$ , где  $O$  – обобщенная онтология описания объектов предметной области и процессов принятия решений при организационно-технологическом проектировании;  $i = \{1, 2, \dots, n\}$  – онтология технологических процессов;  $j = \{1, 2, \dots, m\}$  – онтология организации производства;  $k = \{1, 2, \dots, p\}$  – онтология процессов ПР.

Рассматриваемые процессы ПР и модели представления знаний нуждаются в создании соответствующих методов, инструментальных средств проектирования и программной реализации создаваемых систем поддержки принятия решений (СППР). В качестве такой платформы, например, можно рассмотреть платформу Infor Coleman AI – комплексное решение с использованием машинного обучения, которое функционирует на уровне, предшествующем уровню бизнес-приложений (ERP, PLM, MDC). Coleman AI осуществляет сбор и анализ данных внутри предприятия и с помощью ML-алгоритмов повышает эффективность различных бизнес-



процессов – таких как: управление задачами, управление складом и складскими остатками, оптимизация маршрутов, прогнозы по профилактическому обслуживанию производственного оборудования, корректировка производственных планов и т.п. [19]. Искусственный интеллект платформы обучается на данных предприятия, характерных для предметной области, функционирующих в рамках модели представления знаний о производстве в виде онтологий.

В общем, модельная гипотеза представления знаний об исследуемой предметной области предполагает, прежде всего, определение и применение ряда формализованных ассоциативно связанных правилами общего грамматического исчисления метаязыков (рис. 8). В [14, 15] определены правила формализации ряда предметно-ориентированных метаязыков в иерархической системе управления МП.



Рис. 8. Иерархическая Структура метаязыков

Несложно показать, что предложенное выше системное представление предметной области производственной деятельности в форме ЦД ПП и их систем планирования и управления соответствует 2 и 3 типам иерархии метаязыков.

К данному типу языков можно отнести технические языки стандартов ЕСКД, ЕСПД и др., а также стандартизованные языки IDEF и UML в соответствии со стандартными требованиями лингвистического обеспечения автоматизированных систем.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эволюционные изменения в подходах к реорганизации систем управления в рамках методологии четвертой промышленной революции на основе создания цифровых двойников позволяют сформировать эффективный подход к трансформации информационных систем (АСУП) в процессах управления. По мнению специалистов, при достаточно высоком уровне обоснования понятия ЦД объекта производственной системы, есть недостаточно исследованная проблема обоснования понятия и содержания ЦД ПП. В статье представлены результаты исследования методов идентификации моделей ПП при формировании ЦД ПП как виртуального элемента производственной системы, апробированные в рамках реализации проектов управления производством машиностроительного холдинга.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016. 285 с. [ K. Schwab, *The fourth industrial revolution*, (in Russian). Moscow: Eksmo, 2016. ]
2. **Официальный документ:** Intelligent Twins. Совместное создание интеллектуальных двойников и построение мира интеллектуальных технологий. [Электронный ресурс]. URL: <https://huawei.ru/upload/docs/Белая%20книга%20Huawei%20Intelligent%20Twins.pdf> (дата обращения 10.08.2021). [ White paper: Intelligent Twins. Co-creation of intelligent twins and building a world of intelligent technologies (2021, Aug. 10). [Online]. Available: <https://huawei.ru/upload/docs/Белая%20книга%20Huawei%20Intelligent%20Twins.pdf> ]
3. Хузмиев И. К. Информационные технологии – инфраструктура четвертой промышленной революции // Россия: тенденции и перспективы развития. Электрон. науч. журнал. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-tehnologii-infrastruktura-chetvertoy-promyshlennoy-revoljutsii/viewer> (дата обращения 10.08.2021). [ I. K. Khuzmiyev (2021, Aug. 10), "Information technologies – infrastructure of the fourth industrial revolution" [Online], (in Russian), in *Rossiya: tendencii i perspektivy razvitiya. Elektron. nauch. Zhurnal*, 2017. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-tehnologii-infrastruktura-chetvertoy-promyshlennoy-revoljutsii/viewer> ]
4. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное / науч. ред. А. Боровков. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с., ил. [ A. Prokhorov, M. Lysachev, *Digital twin. Analysis, trends, world experience. The first edition, corrected and supplemented*, (in Russian). A. Borovkov (scientific. ed.). Moscow: ООО "AlyansPrint", 2020. ]
5. Цифровой двойник. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoy-dvojniki-digital-twin> (дата обращения 10.08.2021). [ *Digital twin* (2021, Aug. 10). [Online], (in Russian). Available: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoy-dvojniki-digital-twin> ]
6. Балашов А. И. Производственный менеджмент: организация производства на предприятии. СПб.: Питер, 2009. 160 с. [ A. I. Balashov, *Production management: organization of production at the enterprise*, (in Russian). St. Petersburg: Piter, 2009. ]
7. Фролов Е. Б. MES – базис для создания «цифрового двойника». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.e-xecutive.ru/management/practices/1989564-mes-bazis-dlya-sozdaniya-tsifrovogo-dvojnika> (дата обращения 10.08.2021). [ E. B. Frolov (2021, Aug. 10), *MES is the basis for creating a "digital twin"* [Online], (in Russian). Available: <https://www.e-xecutive.ru/management/practices/1989564-mes-bazis-dlya-sozdaniya-tsifrovogo-dvojnika> ]
8. Фролов Е. Б., Климов А. С., Зин Мин Хтун. MES — основа для создания «цифрового двойника» производственной системы // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2019. № 2 (49). С. 52–56. [ E. B. Frolov, A. S. Klimov, Min-Htun Zin, "MES - the basis for the creation of a "digital twins" for production systems", (in Russian), in *Vestnik MGTU STANKIN*, no. 2 (49), pp. 52-56, 2019. ]
9. ПНСТ 429-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2020. 8 с. [ Smart manufacturing. Digital manufacturing twins. Part 1. General principles, (in Russian), Preliminary National Standard 429-2020, Moscow, Standartinform, 2020. ]
10. Дозорцев В. М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Часть 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников? // Автоматизация в промышленности. 2020. № 9. DOI: 10.25728/avt-prom.2020.09.01. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/344356240\\_Cifrovye\\_dvojniki\\_v\\_promyshlennosti\\_genezis\\_sostav\\_terminologiya\\_tehnologii\\_platforny\\_perspektivy\\_Cast\\_1\\_Vozniknovenie\\_i\\_stanovlenie\\_cifrovyyh\\_dvojnikov\\_Kak\\_susestvuisie\\_opredelenia\\_otrazaut\\_soderzanie\\_i/link/5f6b8d31458515b7cf495caf/download](https://www.researchgate.net/publication/344356240_Cifrovye_dvojniki_v_promyshlennosti_genezis_sostav_terminologiya_tehnologii_platforny_perspektivy_Cast_1_Vozniknovenie_i_stanovlenie_cifrovyyh_dvojnikov_Kak_susestvuisie_opredelenia_otrazaut_soderzanie_i/link/5f6b8d31458515b7cf495caf/download) (дата обращения 10.08.2021). [ V. M. Dozortsev (2021, Aug. 10), "Digital twins in industry: genesis, composition, terminology, technologies, platforms, prospects. Part 1. Emergence and formation of digital twins. How do existing definitions reflect the content and functions of digital twins?" [Online], (in Russian), in *Avtomatizaciya v promyshlennosti*, no. 9, 2020. Available: [https://www.researchgate.net/publication/344356240\\_Cifrovye\\_dvojniki\\_v\\_promyshlennosti\\_genezis\\_sostav\\_terminologiya\\_tehnologii\\_platforny\\_perspektivy\\_Cast\\_1\\_Vozniknovenie\\_i\\_stanovlenie\\_cifrovyyh\\_dvojnikov\\_Kak\\_susestvuisie\\_opredelenia\\_otrazaut\\_soderzanie\\_i/link/5f6b8d31458515b7cf495caf/download](https://www.researchgate.net/publication/344356240_Cifrovye_dvojniki_v_promyshlennosti_genezis_sostav_terminologiya_tehnologii_platforny_perspektivy_Cast_1_Vozniknovenie_i_stanovlenie_cifrovyyh_dvojnikov_Kak_susestvuisie_opredelenia_otrazaut_soderzanie_i/link/5f6b8d31458515b7cf495caf/download) ]
11. Маркс К., Энгельс Ф. Капитал. Том первый. Соч., 2-е изд. Т. 23. М.: Изд-во политической литературы, 1960. 907 с. [ K. Marx, F. Engels, *Capital. Volume one. Composition, 2nd ed. Vol. 23*, (in Russian). Moscow: Izd-vo politicheskoy literatury, 1960. ]
12. ГОСТ Р ИСО 15531-1-2008. Промышленные автоматизированные системы и интеграция. Данные по управлению промышленным производством. Часть 1. Общий обзор. М.: Стандартинформ, 2008. 20 с. [ *Industrial automation systems and integration. Industrial manufacturing management data. Part 1. General overview*, (in Russian), Federal Standart R ISO 15531-1-2008, Moscow, Standartinform, 2008. ]
13. Куликов Г. Г., Речкалов А. В., Артюхов А. В. Методология системного моделирования адаптивного управления машиностроительным производством // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 4. С. 115–125. DOI: 10.14529/ctcr200412. [ G. G. Kulikov, A. V. Rechkalov, A. V. Artyukhov, "Methodology of system modeling of adaptive management of machine-building production", (in Russian), in *Vestnik YuUrGU. Seriya "Komputernye tehnologii, upravlenie, radioelektronika"*, vol. 20, no. 4, pp. 115-125, 2020. DOI: 10.14529/ctcr200412. ]
14. Артюхов А. В., Куликов Г. Г., Речкалов А. В. Логическая структура концептуальной модели информационно-аналитической системы (ИАС), основанной на слабоструктурированных знаниях производственной системы // Вестник ЮУрГУ.

Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т. 18, № 4. С. 78–87. DOI: 10.14529/ctcr180408. [ A. V. Artyukhov, Kulikov G. G., Rechkalov A. V., “Logical structure of conceptual model of the information and analytical system (IAS) based on poorly structured knowledge of the production system”, (in Russian), in *Vestnik YuUrGU. Seriya “Komputernie tehnologii, upravlenie, radioelektronika”*, vol. 18, no. 4, pp. 78-87, 2018. DOI: 10.14529/ctcr180408. ]

15. **Артюхов А. В.** Методы и модели организации производственного процесса многономенклатурного машиностроительного предприятия как объекта управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.22. Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, 2017. 129 с. [ A. V. Artyukhov, *Methods and models of the organization of the production process of a multi-product machine-building enterprise as a control object: Cand. Tech. Sci. Diss.*, (in Russian). Samara: Samarskij nacionalnyj issledovatel'skij universitet im. akad. S. P. Koroleva, 2017. ]

16. **Зориктеев В. Ц., Новиков В. Н.** Система поддержки принятия решений при организационно-технологическом проектировании с использованием онтологий // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 1 (7). С. 46–49. [ V. Z. Zoriktuev, V. N. Novikov, “System of a support of decision-making at organizational-technological designing with ontology”, (in Russian), in *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva*, no. 1 (7), pp. 46-49, 2015. ]

17. **An architecture** of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System / B. A. Talkhestani, et al. // Open Access. 2019. [Electronic resource]. URL: <https://degruijter.com/document/doi/10.1515/auto-2019-0039/html> (Accessed 10.07.2021).

18. **Generic** Digital Twin Architecture for Industrial Energy System / G. Steindl, et al. // Applied sciences. 2020. No.10. DOI: 10.3390/app10248903. [Electronic resource]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/347264619\\_Generic\\_Digital\\_Twin\\_Architecture\\_for\\_Industrial\\_Energy\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/347264619_Generic_Digital_Twin_Architecture_for_Industrial_Energy_Systems) (Accessed 10.07.2021)

19. **The Future** of the Future: Cognitive Artificial Intelligence. [Electronic resource]. URL: <https://www.infor.com/resources/the-future-of-the-future-cognitive-artificial-intelligence> (accessed 10.07.2021)

#### ОБ АВТОРАХ

**РЕЧКАЛОВ Александр Васильевич**, д-р. техн. наук, проф., эксперт (АО «Объединенная двигателестроительная корпорация»).

**АРТЮХОВ Александр Викторович**, канд. техн. наук, ген. директор (АО «Объединенная двигателестроительная корпорация»).

**КУЛИКОВ Геннадий Григорьевич**, д-р. техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем управления (УГАТУ).

**НОВИКОВ Владимир Николаевич**, асп. каф. автоматизированных систем управления (УГАТУ).

**RECHKALOV, Alexander Vasilevich**, Prof., Dr. of Tech. Sci., chief specialist of the UEC.

**ARTYUKHOV, Alexander Victorovich**, Cand. of Tech. Sci., Prof., General Director of UEC.

**KULIKOV, Gennady Grigorievich**, Prof., Dept. of Automated Control Systems (USATU). Dr. of Tech. Sci.

**NOVIKOV, Vladimir Nikolaevich**, postgraduate student, Dept. of Automated Control Systems (USATU).

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 1 (95), pp. 120-135, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).