

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств.  
Управление в организационных системах

Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries.  
Management in organizational systems

УДК 004.685.5  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-70-80>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Логико-семантическое определение цифрового двойника производственного процесса

А.В. Речкалов <sup>1</sup>,  
А.В. Артюхов <sup>1</sup>,  
Г.Г. Куликов <sup>2</sup>, @

<sup>1</sup> Объединенная двигателестроительная корпорация, Москва, 109147 Россия

<sup>2</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, 450008 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: [gennadyg\\_98@yahoo.com](mailto:gennadyg_98@yahoo.com)

### Резюме

**Цели.** В настоящее время активно развивается методология обобщения и представления знаний об исследуемых предметно-ориентированных областях (ПОО) на базе «модельной гипотезы» определения выделяемых объектов и их связей. Такие системные модели определяют знания о ПОО в любой информационной системе. Методы системной инженерии уже сегодня позволяют создавать информационные модели реальных объектов, дополненные виртуальными составляющими, и наоборот, модели виртуальных объектов, дополненные реальными составляющими. Так, например, наличие информационных моделей технологических и производственных объектов и их связей с реальным оборудованием позволит создавать и управлять реально-виртуальными производственными процессами (ПП) в соответствии с методологией Industry 4. В теоретическом аспекте в основе разработки системных моделей объектов и их связей в ПОО лежит проблема формального непротиворечивого описания (грамматического исчисления) функциональных закономерностей данного множества объектов и их связей. Цель исследования – разработать подход и принципы методологии системного моделирования производственных объектов и их связей для замкнутого управления (прогнозирования, планирования, учета, регулирования и др.) в производственной среде машиностроительного предприятия в форме их цифровых двойников (ЦД).

**Методы.** Используются базовые положения теории множеств, теории графов, и, в частности, положения теории категорий множеств, положения теории формальной логики, теории управления. Применены методы теории системной инженерии, методы организации и управления машиностроительным производством.

**Результаты.** Обоснован подход к формированию метаструктуры цифрового двойника производственного процесса (ЦД ПП) на основе моделей производственных объектов и их связей, разработаны порядок и правила построения системной модели ЦД ПП, разработан подход к структурно-параметрической идентификации моделей ЦД с учетом логико-семантических ограничений.

**Выводы.** Представлен пример идентификации базового множества объектов ЦД организации ПП на основе логико-семантического анализа производственной деятельности и положений единых стандартов Единой системы технологической подготовки производства для машиностроительного производства как исследуемой предметной области, подтверждающий основные положения предлагаемой методологии построения ЦД ПП.

**Ключевые слова:** системные модели, производственные процессы, информационные системы, цифровой двойник, digital twin, система поддержки принятия решения, smart factory, система планирования

• Поступила: 08.07.2022 • Доработана: 19.09.2022 • Принята к опубликованию: 14.11.2022

**Для цитирования:** Речкалов А.В., Артюхов А.В., Куликов Г.Г. Логико-семантическое определение цифрового двойника производственного процесса. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):70–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-70-80>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Logical-semantic definition of a production process digital twin

Alexander V. Rechkalov <sup>1</sup>,  
Alexander V. Artyukhov <sup>1</sup>,  
Gennady G. Kulikov <sup>2, @</sup>

<sup>1</sup> United Engine Corporation, Moscow, 109147 Russia

<sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University, Ufa, 450008 Russia

@ Corresponding author, e-mail: gennadyg\_98@yahoo.com

### Abstract

**Objectives.** A methodology currently being developed for generalizing and presenting knowledge about studied subject-oriented areas is based on a “model hypothesis” for determining the distinguished objects and their relationships. Such system models can be used in any information system to define the knowledge about subject-oriented areas. Systems engineering methods already make it possible to create information models of real objects supplemented by virtual components, and vice versa, i.e., models of virtual objects supplemented by real components. So, for example, the availability of information models of technological and production facilities and their connections with real equipment allow the creation and management of real-virtual production processes (PP) in accordance with Industry 4.0 methodologies. From a theoretical aspect, the development of system models of objects and their connections in subject-oriented areas is based on the problem of a formal consistent description (grammatical calculus) of the functional regularities of a given set of objects and their relationships. The purpose of the study is to develop an approach and principles of methodology for system modeling of production facilities and their connections to provide closed-loop control (forecasting, planning, accounting, regulation, etc.) in the production environments of machinery enterprises taking the form of their digital twins (DTs).

**Methods.** The basic provisions of the theory of sets and graph theory—in particular, the provisions of the theory of categories of sets—are used according to the formal logic and control theories. System Engineering methods are also applied in the organization and management of machinery production.

**Results.** The approach to the formation of a metastructure of production process digital twin (PPDT) based on the models of production facilities and their relationships is substantiated. The procedure and rules for constructing a PPDT system model are developed along with an approach to the structural and parametric identification of DT models, taking logical and semantic restrictions into account.

**Conclusions.** A presented example for identifying the basic set of objects of the organization of the PPDT based on the logical-semantic analysis of production activities and the provisions of the unified standards of the unified system for technological preparation of production of machinery production as a researched subject area confirms the main provisions of the proposed methodology for constructing the PPDT.

**Keywords:** system models, production processes, information systems, digital twin, decision support system, smart factory, planning system

• Submitted: 08.07.2022 • Revised: 19.09.2022 • Accepted: 14.11.2022

**For citation:** Rechkalov A.V., Artyukhov A.V., Kulikov G.G. Logical-semantic definition of a production process digital twin. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):70–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-70-80>

**Financial disclosure:** The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общество находится в процессе кардинальных изменений, определяемых требованиями четвертой промышленной революции, которая требует активной трансформации существующих систем индустриального производства, управления технологиями, транспортировкой и поставками ресурсов и др.<sup>1</sup>. Основой и главной инфраструктурой нового уклада жизнеустройства, как отмечается в [1], становятся информационные технологии (ИТ). Принципиальное значение в рамках формирования нового уклада при этом приобретает комплексное, интегрированное представление о том, как технологии изменят нашу жизнь, как они преобразуют среду нашего понимания<sup>2</sup>. Согласно результатам исследований аналитической компании IDC, к 2025 г. доля цифровой экономики вырастет до 58.2% в общем объеме мировой экономики [2].

В условиях постоянно усложняющихся индустриальных технологий, усиления конкуренции, ускорения освоения новой техники, внедрение новых методов координации и взаимодействия как во внешней среде, так и в рамках отдельных предприятий становится не только насущной необходимостью, но и ключом к жизненно важной трансформации индустриальных моделей [3]. Цифровые технологии существенно расширяют возможности взаимодействия, повышают эффективность производства и поставок, улучшают распределение и использование ресурсов, реализуют новые методы управления запасами. Появляется возможность широкой системной оптимизации управления производственными процессами и использованием ресурсов.

В последние годы развитие ИТ все больше ориентируется на формирование технологий разработки и применения цифрового двойника (digital twin).

Система цифровых двойников (ЦД), в отличие от традиционных решений, ориентированных на периодические пересчеты планов, может учитывать самые разные нештатные ситуации, которые удастся предсказать, анализируя огромный поток данных. Возможность обработки и анализа данных о текущем состоянии производства в соответствии с планами в режиме реального времени позволяет оперативно реагировать на отклонения в производстве и устранять возникающие проблемы.

Таким образом, система ЦД позволит смоделировать не только состояние производственного процесса<sup>3</sup>, но и его динамику. Основная задача системы ЦД – в реальном времени обеспечить управление всеми факторами, влияющими на производственный процесс.

## 1. ПОНЯТИЕ ЦД ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Понятие цифрового двойника в науке и практике машиностроительного производства достаточно новое и еще не имеет устоявшейся терминологии [4]. Например, в статье «Цифровой двойник Digital Twin of Organization, DTO»<sup>4</sup> приводятся несколько вариантов формулирования понятия ЦД:

- программный аналог физического устройства, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды;
- виртуальный прототип реальных производственных активов – скважины, турбины, ветроэлектрической установки и т.д.;
- цифровое представление объекта, достаточное для удовлетворения требований набора вариантов использования;
- цифровая модель конкретного физического элемента или процесса с подключениями к данным, которая обеспечивает конвергенцию между

<sup>1</sup> Артюхов А.В. *Методы и модели организации производственного процесса многономенклатурного машиностроительного предприятия как объекта управления*: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Самара; 2017. 20 с. [Artyukhov A.V. *Methods and models of the organization of the production process of a multi-product machinery enterprise as a control object*: Cand. Sci. Thesis (Eng.). Samara; 2017. 20 p. (in Russ.).]

<sup>2</sup> Хузмиев И.К. Информационные технологии – инфраструктура четвертой промышленной революции. *Россия: тенденции и перспективы развития*. 2017;12(3):274–277. [Khuzmiev I.K. Information technology is the infrastructure of the fourth industrial revolution. *Russia: trends and development prospects*. 2017;12(3):274–277 (in Russ.).]

<sup>3</sup> В рамках данной статьи имеется в виду процесс производства продукции. [Within the framework of this article, we mean the production process.]

<sup>4</sup> Цифровой двойник Digital Twin of Organization, DTO. [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой\\_двойник\\_\(Digital\\_Twin\\_of\\_Organization.DTO\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin_of_Organization.DTO)). Дата обращения 23.09.2022. [Digital Twin of Organization, DTO. [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой\\_двойник\\_\(Digital\\_Twin\\_of\\_Organization.DTO\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin_of_Organization.DTO)). Accessed September 23, 2022 (in Russ.).]

физическим и виртуальным состояниями с соответствующей скоростью;

- модель, максимально точно описывающая реальные причинно-следственные зависимости между производственными, экономическими, финансовыми и организационными показателями компании.

Можно привести более общую формулировку: «Цифровой двойник – это цифровое представление объекта или системы реального мира»<sup>5</sup>. Если определить понятие цифрового двойника полно (рефлексивно), то цифровой двойник – это цифровое системное представление реального объекта, процесса или системы в виртуальной среде.

Считается, что первоначально концепция ЦД в менеджменте была озвучена Майклом Гривзом на PLM (Product Lifecycle Management) форуме в Мичиганском университете в начале 2002 г. Концепция основывалась на взаимном соответствии и взаимодействии физической системы и ее виртуального отображения на основе виртуальной взаимосвязи [5].

Если первоначально появляются «цифровые двойники» (Digital Twin) изделий, ассоциативно определяющие в виртуальном пространстве предприятия средства и предметы труда, то при формировании интеллектуального предприятия (Smart Factory) или ЦД производственной системы (ЦД ПС) возникает необходимость формализации ЦД производственного процесса (ЦД ПП) [6]. При этом, производственный процесс может быть представлен как процесс взаимодействия средств труда (СТ), предметов труда (ПТ) и трудовых ресурсов (ТР) в пространстве и времени с целью получения результата процесса – продукта (ПР)<sup>6</sup> (рис. 1).

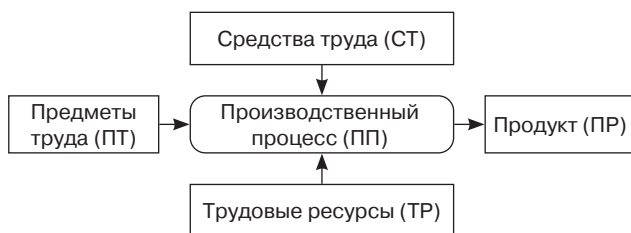


Рис. 1. Взаимодействие элементов производственного процесса

Предметы труда как элементы производственного процесса представляют собой материалы,

комплектующие изделия, полуфабрикаты, детали и сборочные единицы, а их модели являются, по существу, цифровыми двойниками-компонентами (Component Twin). Модели оборудования, инструмента, трудовых ресурсов являются ЦД ресурса (Asset Twin). Модели результата производственного процесса являются ЦД продукции (System Unit Twin). Модели процесса взаимодействия этих элементов представляют собой ЦД ПП (Process Twin) [5]. В целом совокупность этих элементов представляет собой ЦД ПС (рис. 2).

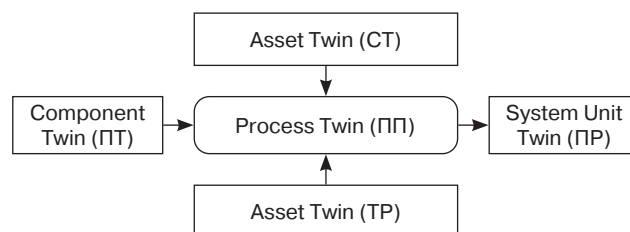


Рис. 2. Взаимодействие элементов ЦД ПС

В итоге можно согласиться с формулировкой понятия ЦД ПС: «Цифровой двойник производственной системы 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»<sup>7</sup>. Определение цифрового двойника как программно-аппаратного комплекса, реализующего комплексную динамическую модель для исследования и управления деятельностью социотехнической системы позволяет представить процесс производства в виде контура управления, где собственно производственный процесс (ПП) выступает как объект управления, а его ЦД – как процесс управления с обратной связью (рис. 3).

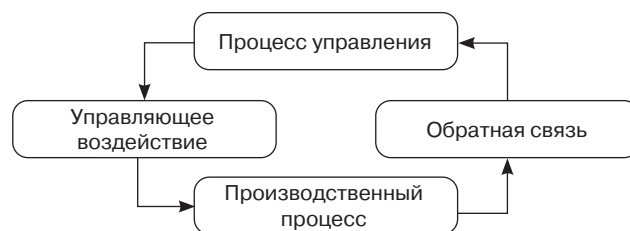


Рис. 3. Процесс производства как контур управления

Исходя из этого положения можно сформулировать принципы формирования ЦД ПП на основе моделей традиционных систем АСУ: ЦД должен отражать текущее состояние производственного

<sup>5</sup> Digital Twin. <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin>. Дата обращения 23.09.2022. / Accessed September 23, 2022.

<sup>6</sup> Артюхов А.В. *Методы и модели организации производственного процесса многоменклатурного машиностроительного предприятия как объекта управления*: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Самара; 2017. 20 с. [Artyukhov A.V. *Methods and models of the organization of the production process of a multi-product machinery enterprise as a control object*: Cand. Sci. Thesis (Eng.). Samara; 2017. 20 p. (in Russ.).]

<sup>7</sup> ПНСТ 429-2020. *Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения*. М.: Стандартинформ; 2020. 8 с. [PNST 429-2020. *Smart manufacturing. Production digital twins. Part 1. General provisions*. Moscow: Standartinform; 2020. 8 p. (in Russ.).]



процесса и осуществлять прогноз этого состояния в форме фазовых траекторий (в пространстве состояний) планов на основе детального анализа возмущающих воздействий; вырабатывать варианты поведения системы и формировать рекомендации для принятия решений. При этом все действия совершаются в режиме реального времени.

В то же время отмечается, что для практической реализации концепции ЦД наиболее сложной является модель ЦД ПП, реализующая ряд принципиальных функций [6, 7]:

- отображение в режиме реального времени производственных процессов, протекающих в производственной системе;
- проведение расчетов для принятия управленческих решений;
- реализация процессов поддержки принятия решений, например, «что если» на основе моделирования поведения производственных процессов.

## 2. СТРУКТУРА ЦД ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

ЦД ПП, определяемый как отражение процесса взаимодействия СТ, ПТ и ТР с целью получения ПР, в основе содержит пять групп моделей:

- группа моделей продукции, включающая состав и взаимосвязи предметов труда в рамках продукта, в т.ч. количественные, временные, стоимостные и качественные характеристики, определяющие потребительную стоимость результата производственного процесса;
- группа моделей предметов труда, включающая модели используемых в процессе производства материалов, полуфабрикатов, покупных комплектующих изделий, а также находящихся в процессе производства деталей и сборочных единиц, полностью овеществляющихся в продукте;
- группа моделей средств труда, включающая модели характеристик и параметров каждого обособленного ресурса в рамках участия 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 процессов как совокупности или последовательности технологических операций, включая количественные, временные, стоимостные и качественные характеристики взаимосвязи предметов труда и ресурсов.

Учитывая, что в данном случае модели СТ, ПТ, ТР и ПР содержат данные, только необходимые для реализации ПП, эти модели являются отражением технологического процесса, который определяет статическую (структурную) организацию производственного

процесса. Понятие «статический» в данном случае носит относительный характер. Безусловно, все приведенные модели поддерживают изменения, свойственные соответствующим физическим объектам, но эти изменения в рамках ЦД ПП отражаются, в основном, вне зависимости от его динамических характеристик. Соответственно, формулировка понятия технологического процесса как комплекса моделей технологического процесса, содержащих информацию о технологических процессах как целенаправленных действиях по изменению и (или) определению состояния предмета труда, которые могут быть отнесены к готовому изделию, его составной части или к методам обработки, формообразования и сборки<sup>8</sup>, соответствует содержанию статической модели ПП или цифровому двойнику организации производственного процесса (ЦД ОПП).

В общем виде модели определяются как статические, описывающие объекты в стационарных режимах их работы, и динамические, описывающие переходные процессы. Динамический характер модели ЦД ПП отражается в стандарте: «Цифровой двойник производства позволяет контролировать производство в режиме реального времени с целью динамического управления объемом производства и соответствия производственному плану»<sup>9</sup>. В данном случае потребности продукта во времени представляют собой входные переменные, потребности в остальных ресурсах – выходные переменные, а модель описывает неустановившийся режим производственного процесса.

Количественные и временные характеристики взаимодействия ресурсов в процессе производства, определяемые спросом на готовую продукцию, формируют исходные данные для модели планирования или ЦД планирования производственного процесса.

Структура модели планирования прежде всего зависит от структуры исходных данных, формируемых по результатам планирования спроса. Анализ моделей планирования и управления, основанный на описаниях MRP-алгоритмов<sup>10</sup> и ERP-систем<sup>11</sup>, позволяет выделить два типа данных спроса: объемно-календарный и позаказный, а также определить комплекс моделей управления ПП. Соответственно, ЦД планирования ПП может быть

<sup>8</sup> ГОСТ 3.1109-82. Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов; 1981. 15 с. [GOST 3.1109-82. Interstate standard. Unified system of technological documentation. Terms and definitions of basic concepts. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1981. 15 p. (in Russ.).]

<sup>9</sup> ПНСТ 429-2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. М.: Стандартинформ; 2020. 8 с. [PNST 429-2020. Smart manufacturing. Twins of digital production. Part 1. General provisions. Moscow: Standartinform; 2020. 8 p. (in Russ.).]

<sup>10</sup> MRP – manufacturing resource planning.

<sup>11</sup> ERP – enterprise resource planning.

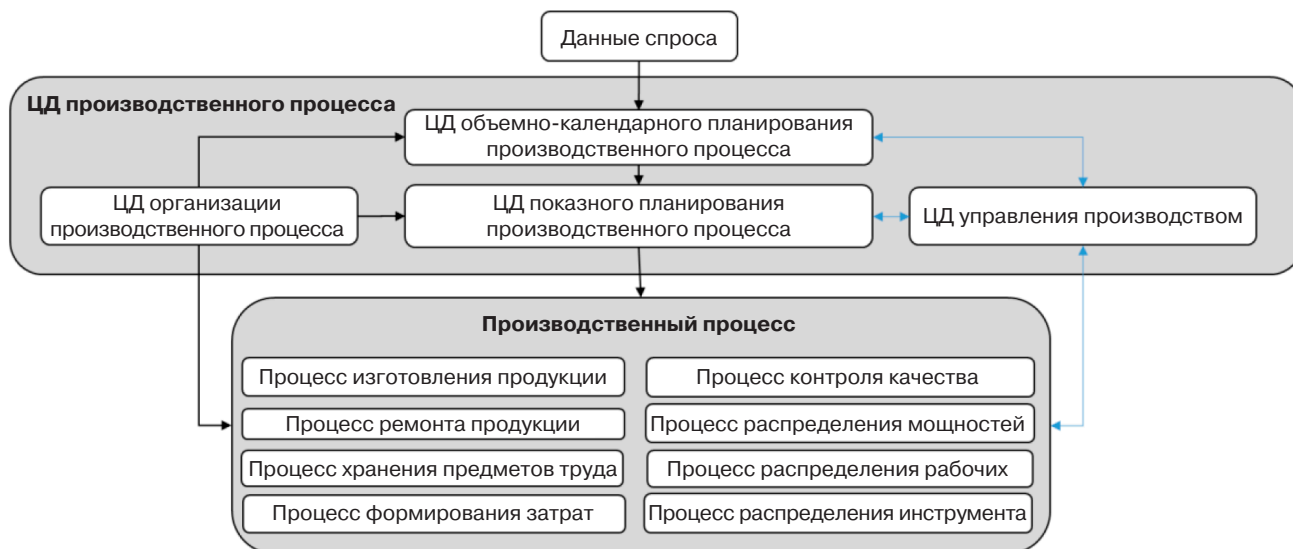


Рис. 4. Развернутая верхнеуровневая структура ЦД ПП

представлен двумя связанными ЦД: ЦД объемно-календарного планирования ПП и ЦД позаказного планирования ПП, а комплекс моделей обратной связи и управляющего воздействия – ЦД управления ПП [8].

ЦД объемно-календарного планирования реализует следующие основные функции:

- укрупненное планирование производственных мощностей;
- укрупненное планирование закупаемых изделий и материалов;
- составление главного календарного плана производства.

ЦД позаказного планирования реализует следующие основные функции:

- планирование производственных заказов;
- планирование распределения мощностей;
- планирование заказов на ремонт изделий;
- планирование заказов на хранение и распределение;
- планирование заказов на закупку.

ЦД управления производством реализует следующие основные функции:

- учет производства;
- поддержка принятия решений;
- управление прямыми производственными затратами;
- управление контролем качества;
- управление распределением инструмента.

Анализ ERP-систем позволяет также дифференцировать производственный процесс как объект управления в виде совокупности однородных по внутренней структуре, относительно самостоятельных, но взаимосвязанных процессов:

- процесс изготовления продукции;
- процесс ремонта продукции;
- процесс хранения предметов труда;
- процесс формирования затрат;
- процесс контроля качества;

- процесс распределения мощностей;
- процесс распределения рабочих;
- процесс распределения инструмента.

Соответственно, развернутая модель ЦД ПП приобретает вид совокупности взаимосвязанных контуров управления, которые можно сформулировать как функциональные области (ФО) цифрового двойника (рис. 4).

Таким образом, ЦД ПП представляет собой совокупность ЦД:

- организации производственного процесса;
- объемно-календарного планирования производства;
- позаказного планирования производства;
- управления производством.

Каждый цифровой двойник состоит из контуров управления соответствующих функциональных областей (ФО). Каждая ФО в рамках детального описания моделей может содержать трехуровневую структуру: процессы, процедуры, шаги. Соответственно, ЦД ПП представляет собой совокупность моделей, сформированную на основе состава функций каждого ЦД, соответствующих ФО и иерархического описания моделей (рис. 5).

Представленная на рис. 5 обобщенная структура ЦД ПП может быть положена в основу идентификации и построения конкретных функциональных и информационных моделей функциональных областей ЦД ПП.

### 3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЦД ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

В соответствии с законом о необходимом разнообразии Эшби [9] 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



Рис. 5. Обобщенная структура ЦД ПП

превратить это знание в адекватное отражение в рамках цифрового двойника, т.е. обеспечить формируемые модели требованиям идентифицируемости и прослеживаемости. Идентифицируемость – это свойство, которому модель должна удовлетворять, чтобы была возможность получить точный вывод<sup>12</sup>. Модель идентифицируема, если теоретически возможно узнать истинные значения основных параметров этой модели после получения из нее бесконечного числа наблюдений. Обычно модель идентифицируема только при определенных технических ограничениях, и в этом случае набор этих требований называется условиями идентификации

Понятие идентификации систем можно определить как совокупность методов для построения математических моделей динамической системы по данным наблюдений<sup>13</sup>. Другое определение: идентификация – это процесс построения моделей объектов различной природы. При этом процесс идентификации складывается из двух взаимосвязанных этапов: идентификации структуры моделей и идентификации параметров в моделях выбранной структуры. При построении структуры модели (или набора конкурирующих либо взаимодополняющих структур) используется априорная информация об объекте. Для каждого класса объектов формируются банки структур с сопутствующей информацией<sup>14</sup>.

Исходя из особенностей содержания ЦД, процесс идентификации должен основываться на следующих принципиальных положениях:

- *Идентификация ЦД организации производства*, как содержащего статическую модель производственного процесса, основывается на анализе структуры и параметров технологического процесса, документированных в стандартах Единой системы технологической документации (ЕСТД).
- *Идентификация ЦД процесса объемно-календарного планирования и ЦД процесса показного планирования* основывается на структуре процессов, определенных в международных стандартах производственного планирования и управления APICS<sup>15</sup>, методологии MRP/ERP и параметрах, определяемых на основе анализа совокупности производственных процессов.
- *Идентификация ЦД процессов управления производством* в части процессов учета производства, анализа и принятия решений основывается на принципах Эшби [9], предполагающих обеспечение максимальной детализации планово-учетных характеристик производственного процесса, определяющих поддержание гомеостаза производственной системы.

Таким образом, для обеспечения идентифицируемости моделей ЦД ПП необходимо определить структуру и набор параметров, определяющих идентифицируемость каждого вида объектов ПП (СТ, ПТ, ТР, ПР), процессов их взаимодействия и перечень технических ограничений, определяющих условия идентификации.

Подход к идентификации структуры ЦД ПП на основе положений теории множеств, и, в частности, положений теории категорий, а также положений

<sup>12</sup> Идентифицируемость. Википедия. <https://ru.wikibrief.org/wiki/Identifiability>. Дата обращения 23.09.2022. [Identifiability. Wikipedia. <https://ru.wikibrief.org/wiki/Identifiability>. Accessed September 09, 2022 (in Russ.).]

<sup>13</sup> Идентификация систем. Википедия. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Идентификация\\_систем](https://ru.wikipedia.org/wiki/Идентификация_систем). Дата обращения 23.09.2022. [Systems identification. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/System\\_identification](https://en.wikipedia.org/wiki/System_identification). Accessed September 09, 2022.]

<sup>14</sup> Бойко Р.С. О моделировании дискретно-непрерывных процессов. *Молодой ученый*. 2010;4(15):93–98. [Boyko R.S. On modeling discrete-continuous processes. *Young scientist*. 2010;4(15):93–98 (in Russ.).]

<sup>15</sup> APICS – American Production and Inventory Control Society.

формальной логики позволит сформировать методы идентификации метаструктуры ЦД на основе формализации экспертных знаний. При этом важно отметить, что концептуальной схемой верхнего уровня представления структуры ЦД, как правило, являются семантические атрибутивные описания в форме гипертекстовых и продукционных баз знаний, составляющих основу структуры экспертных систем производственного управления.

#### 4. ПОДХОД К ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦД НА ПРИМЕРЕ ЦД ОРГАНИЗАЦИИ ПП

Рассмотрим подход к идентификации ЦД ОПП на основе формализации знаний, сформулированных в стандартах Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП)<sup>16, 17</sup> путем определения семантических границ исследуемой предметной области (ПО) ПП по текстовым документам с помощью графоаналитического представления объектов ПП. В данном случае СТ ( $Ctr$ ), ПТ ( $Ptr$ ), ТР ( $Trr$ ), ПР ( $Pro$ ) представляют собой множества объектов, а ПП – множества (связей) морфизмов. При этом, если мы исключаем из рассмотрения динамические характеристики ПП (количество и время), то формируем графическое представление ЦД ОПП или граф онтологической модели, который определяет границы предметной области (ПО) и структуру ЦД ОПП. Для более корректного представления структуры объектов в составе СТ выделяем мощности (оборудование, склады, производственные площади) ( $Msch$ ) и инструменты (инструменты и приспособления) ( $Ins$ ) (рис. 6).

На первом этапе анализируется текстовое и табличное представление данных множеств объектов, отраженных в стандартах ЕСТД. Например, множество технологических методов  $Tmt = \{tmt_1, tmt_2, \dots, tmt_n\}$  представляет собой перечень элементов структуры и характеристики методов взаимодействия предметов труда  $Ptr$ ; множество спецификаций  $Spc = \{spc_1, spc_2, \dots, spc_n\}$  представляет собой взаимосвязанный перечень предметов труда  $Ptr = \{Ptr_1, Ptr_2, \dots, Ptr_n\}$  – закупаемых материалов, полуфабрикатов, покупных заготовок,

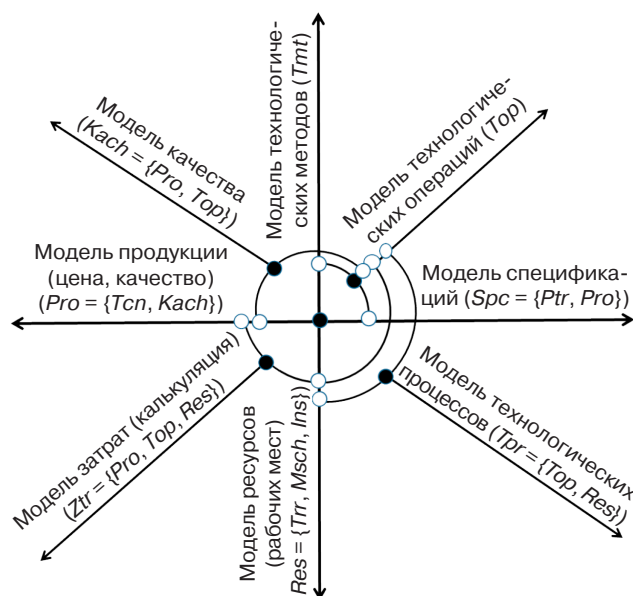


Рис. 6. Графическое представление структуры ЦД организации ПП

а также изготавливаемых деталей и сборочных единиц, находящихся на операциях<sup>18</sup>. При этом, для каждой пары элементов множества  $Spc$  и множества  $Tmt$  формируется множество морфизмов – технологических операций  $Top = \{top_1, top_2, \dots, top_n\}$ , т.е.  $Tmt \subset Top$  и  $Spc \subset Top$ .

Множество производственных рабочих с указанием профессий и квалификационных характеристик  $Trp = \{trp_1, trp_2, \dots, trp_n\}$ , множество мощностей  $Msch = \{msch_1, msch_2, \dots, msch_n\}$ , множество инструментов  $Ins = \{ins_1, ins_2, \dots, ins_n\}$  входят в множество ресурсов (рабочих мест)  $Trp \subset Res$ ,  $Msch \subset Res$ ,  $Ins \subset Res$ . Аналогичным образом формируются другие множества представленной структуры ЦД ОПП.

На следующем этапе на основе графоаналитического и синтаксического анализа документов ЕСТПП формируются характеристики каждого объекта множества. Результатом идентификации моделей ЦД ОПП является формальная структура системной модели ЦД ОПП (табл. 1, 2)<sup>19</sup> [1].

<sup>16</sup> ГОСТ 3.1109-82. Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов; 1981. 15 с. [GOST 3.1109-82. Interstate standard. Unified system for technological documentation. Terms and definitions of main concepts. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1981. 15 p. (in Russ.).]

<sup>17</sup> ГОСТ 14.004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов; 1983. 8 с. [GOST 14.004-83. Technological preparation of production. Terms and definitions of basic concepts. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1983. 8 p. (in Russ.).]

<sup>18</sup> ГОСТ 3.1109-82. Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Издательство стандартов; 1981. 15 с. [GOST 3.1109-82. Interstate standard. Unified system for technological documentation. Terms and definitions of main concepts. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1981. 15 p. (in Russ.).]

<sup>19</sup> Артюхов А.В. Методы и модели организации производственного процесса многономенклатурного машиностроительного предприятия как объекта управления: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Самара; 2017. 20 с. [Artyukhov A.V. Methods and models of the organization of the production process of a multi-product machinery enterprise as a control object: Cand. Sci. Thesis (Eng.). Samara; 2017. 20 p. (in Russ.).]



Модель организации производственного процесса представляет собой метамодель, объединяющую состав элементарных моделей. Представленная в табл. 1, 2 метамодель организации производственного процесса отражает также разнообразие функциональных взаимосвязей элементов

производственного процесса: элементарных предметов труда, элементарных средств труда, элементарных технологических процессов (операций), элементарных межоперационных производственных процессов, определяющих состав и содержание ЦД ОПП.

**Таблица 1.** Структура системной модели ЦД ОПП. Часть 1

Модели предметов труда		Состав технологических методов	Модели технологических операций
Состав ПТ	Структура ПТ		
Изделие Материал Основной материал Вспомогательный материал Полуфабрикат Заготовка Исходная заготовка Листоштампованное изделие Отливка Поковка Комплектующее изделие Деталь Сборочная единица Сборочный комплект Готовое изделие Агрегат Отремонтированное изделие Шихта Сплав Блок заготовок Дефектное изделие Технологические потери Вторичные материальные ресурсы Используемые отходы Неиспользуемые отходы Безвозвратные отходы	Идентификация ПТ: А – Анонимный ПТ Н – Номерной ПТ П – Номерная партия ПТ З – Заказной ПТ  Тип прослеживаемой входимости: А – А А – П А – Н А – З П – П П – Н П – З Н – Н Н – З З – З	Литье Формование Раскрой материала Ковка Объемная штамповка Листовая штамповка Поверхностное пластическое деформирование Обработка резанием Обработка термическая Обработка электрофизическая Обработка электрохимическая Обработка гальванопластика Слесарная обработка Сборка Сварка Клепка Пайка Склеивание Нанесение покрытия Технический контроль Испытания Комплектование Разукрепление (разборка) Транспортирование Хранение Ремонт Переработка отходов	МТО1 МТО2 МТО3 МТО4 МТО5 МТО6 МТО7 МТО8 МТО9

**Таблица 2.** Структура системной модели ЦД ОПП. Часть 2

Модель организационной структуры	Модели рабочих мест		Модели организации операций технологического процесса	Модели межоперационных процессов
	Структура рабочего места	Тип рабочего места		
Подразделения: - склады закупаемых ПТ - склады реализуемых ПТ - склады выведенных из производства ПТ - склады находящихся в производстве ПТ - склады законченных обработкой и готовых к сборке ПТ - склады консигнационные собственные - склады консигнационные не собственные - производственные цехи - производственные участки	Группа механизмов  Механизм  Группа рабочих  Рабочий	Простое рабочее место  Многостаночное рабочее место  Комплексное рабочее место	Модель однопредметного переналаживаемого процесса Модель однопредметного переналаживаемого процесса Модель многопредметного переналаживаемого процесса	Модели формирования производственных партий ПТ Модели формирования передаточных партий ПТ Модели формирования страхового запаса Модели ожидания обработки ПТ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Сформулированы логико-семантические требования формирования системных моделей логистических, производственных, сервисных и других процессов в форме их ЦД, являющихся необходимыми условиями построения кибернетической модели управления с обратными связями, с требуемыми запасами устойчивости и качеством.
2. На основе формализации результатов логико-семантического анализа производственного процесса и процесса управления разработан подход к формированию структурно-параметрической модели ЦД ПП с учетом существующих внешних ограничений (границ).
3. На основе указанного выше подхода разработана метаструктура ЦД ПП, показано, что существующие структуры производственных объектов и ПП могут быть согласованы (гармонизированы) с учетом требований международных стандартов ISO «Умное производство»<sup>20</sup>.
4. Показано, что применение основных положений теории множеств, и, в частности, положений теории категорий множеств и положений формальной логики позволяет сформировать подход к идентификации модели ЦД ПП на основе формализации экспертных знаний.
5. Представлен пример идентификации ЦД ОПП, основанный на логико-семантическом анализе положений стандартов ЕСТПП.

### Вклад авторов

**А.В. Речкалов** – предложил подход к цифровой трансформации автоматизированных систем управления производством действующих машиностроительных

предприятий (МП) на основе формализации логико-семантической модели производственного процесса (ПП). Показал, что существующие метаструктуры производственных объектов и ПП могут быть согласованы (гармонизированы) с требованиями международных стандартов ISO «Умное производство».

**А.В. Артюхов** – разработал методику и алгоритм проектирования системных моделей плановых, логистических, производственных, сервисных и других процессов МП в форме их цифровых двойников (ЦД) на основе структурно-параметрической идентификации из условия их прослеживаемости и управляемости. Показал, что на основе ЦД ПП МП целесообразно формировать метаструктуру распределенных (параллельных) ПП для МП, объединенных в машиностроительный холдинг. Предложил подход к формированию структуры информационной системы управления с обратными связями.

**Г.Г. Куликов** – предложил использовать базовые положения теории множеств, и в частности, положения теории категорий множеств и математической логики для формального описания ЦД ПП.

### Authors' contributions

**A.V. Rechkalov** has proposed an approach to the digital transformation of automated production control systems of operating machinery enterprises (ME) based on the formalization of the logical-semantic model of the production process (PP). He showed that the existing metastructures of production facilities and PP can be harmonized with the requirements of ISO "Smart Manufacturing."

**A.V. Artyukhov** has developed a methodology and algorithm to design system models of planning, logistics, production, service, and other ME processes in the form of their digital twins (DT) based on structural and parametric identification under the condition of their traceability and controllability. He showed that on the basis of ME PPDT it is expedient to form metastructures of the distributed (parallel) PP for ME united in a machinery holding. He proposed an approach to the formation of the structure of an information management system with feedback.

**G.G. Kulikov** has proposed to use the basic provisions of the theory of sets, in particular, the provisions of the theory of categories of sets and the provisions of mathematical logic for a formal description of the PPDT.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Речкалов А.В., Артюхов А.В., Куликов Г.Г., Новиков В.Н. Концепция системного представления предметной области при формировании цифрового двойника производственного процесса машиностроительного предприятия. *Вестник УГАТУ*. 2022;26(1–95):120–135. [https://doi.org/10.54708/19926502\\_2022\\_26195120](https://doi.org/10.54708/19926502_2022_26195120)
2. Шваб К. *Четвертая промышленная революция = The Fourth Industrial Revolution*: пер. с англ. М.: Эксмо; 2018. 285 с. ISBN 978-5-699-98379-7
3. Толстых Т.О., Гамидуллаева Л.А., Шкарупета Е.В. Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях цифрового производства и индустрии 4.0. *Экономика в промышленности*. 2018;11(1):11–19. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2018-1-11-19>

## REFERENCES

1. Rechkalov A.V., Artyukhov A.V., Kulikov G.G., Novikov V.N. 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. *Vestnik UGATU*. 2022;26(1–95):120–135 (in Russ.). [https://doi.org/10.54708/19926502\\_2022\\_26195120](https://doi.org/10.54708/19926502_2022_26195120)
2. Shvab K. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya = The Fourth Industrial Revolution*: transl. from Eng. Moscow: Eksmo; 2018. 285 p. (in Russ.). ISBN 978-5-699-98379-7 [Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum; 2016. 192 p.]
3. Tolstykh T.O., Gamidullaeva L.A., Shkarupeta E.V. Key factors of development of the industrial enterprises in the conditions of the industry 4.0. *Ekonomika v promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics*. 2018;11(1):11–19 (in Russ.). <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2018-1-11-19>

4. 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;9:3–11 <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.09.01>
5. Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт*; под научн. ред. проф. Борова А. 1-е изд., исправл. и доп. М.: ООО «Альянс-Принт»; 2020. 401 с. ISBN 978-5-98094-008-9
6. Фролов Е.Б., Климов А.С., Зин Мин Хтун. MES – основа для создания «цифрового двойника» производственной системы. *Вестник МГТУ СТАНКИН*. 2019;2(49):52–56.
7. Соломенцев Ю.М., Фролов Е.Б. «Цифровой двойник» производственной системы – перспективный инструмент повышения эффективности станочного парка машиностроительного предприятия. *Станочный парк*. 2018;8:36–39.
8. Гаврилов Д.А. *Управление производством на базе стандарта MRP II. Серия: Теория и практика менеджмента*. СПб.: Питер; 2003. 352 с.
9. Эшби У.Р. *Введение в кибернетику*: пер. с англ. М.: Ленанд; 2021. 432 с. ISBN 978-5-453-00197-2
4. Dozortsev V.M. Digital twins in industry: genesis, composition, terminology, technologies, platforms, prospects. Part 1. The emergence and development of digital twins. How do the existing definitions reflect the content and functions of digital twins? *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*. 2020;9:3–11 (in Russ.). <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.09.01>
5. Prokhorov A., Lysachev M. *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoi opyt (Digital twin. Analysis, trends, world experience)*. Prof. Borovkov A. (Sci. Ed.). 1st ed. Moscow: Al'yansPrint; 2020. 401 p. (in Russ.). ISBN 978-5-98094-008-9
6. Frolov E.B., Klimov A.S., Zin Min Khtun. MES – the basis for the creation of a “digital twins” for production systems. *Vestnik MGTU “Stankin.”* 2019;2(49):52–56 (in Russ.).
7. Solomentsev Yu.M., Frolov E.B. “Digital twin” of the production system is a promising tool for improving the efficiency of the machine park of a machine-building enterprise. *Stanochnyi Park*. 2018;8:36–39 (in Russ.).
8. Gavrilov D.A. *Upravlenie proizvodstvom na baze standarta MRP II. Seriya: Teoriya i praktika menedzhmenta (Production Management Based on the MRP II Standard. Series: Theory and Practice of Management)*. St. Petersburg: Peter; 2003. 352 p. (in Russ.).
9. Eshbi U.R. *Vvedenie v kibernetiku (Introduction to Cybernetics)*: transl. from Eng. Moscow: Lenand; 2021. 432 p. (in Russ.). ISBN 978-5-453-00197-2 [Ashby W.R. *An Introduction to Cybernetics*. London: Chapman & Hall; 1956.]

#### Об авторах

**Речкалов Александр Васильевич**, д.т.н., профессор, эксперт, АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (109147, Россия, Москва, пер. Маяковского, д. 11). E-mail: av@rechkalov.ru. Scopus Author ID 6507553020.

**Артюхов Александр Викторович**, к.т.н., генеральный директор, АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (109147, Россия, Москва, пер. Маяковского, д. 11). E-mail: artyukhov@uecrus.com. Scopus Author ID 57457052400.

**Куликов Геннадий Григорьевич**, д.т.н., профессор кафедры автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (450008, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. К. Маркса, д. 12). E-mail: gennadyg\_98@yahoo.com. Scopus Author ID 7102426624.

#### About the authors

**Alexander V. Rechkalov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Expert, United Engine Corporation (11, Mayakovskogo per., Moscow, 109147 Russia). E-mail: av@rechkalov.ru. Scopus Author ID 6507553020.

**Alexander V. Artyukhov**, Cand. Sci. (Eng.), General Director, United Engine Corporation (11, Mayakovskogo per., Moscow, 109147 Russia). artyukhov@uecrus.com. Scopus Author ID 57457052400.

**Gennady G. Kulikov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Dept. of Automated Control Systems, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marksa ul., Ufa, The Republic of Bashkortostan, 450008 Russia). E-mail: gennadyg\_98@yahoo.com. Scopus Author ID 7102426624.

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 31.01.2023 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 10.

Тираж 100 экз. Заказ № 20.

Подписку на печатную версию

*Russian Technological Journal* можно оформить через ООО «Агентство «Книга-Сервис», [www.akc.ru](http://www.akc.ru).

Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.

78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian Federation.

Signed to print January 31, 2023.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 10.

100 copies. Order No. 20.

Subscription to the *Russian Technological Journal* printed version can be made through the *Kniga-Servis* Agency, [www.akc.ru](http://www.akc.ru).

Subscription index: **79641**.