

Научная статья

УДК 004.942

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177673>

## **ТРАНСФОРМАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГТД В ФОРМУ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ**

**Геннадий Григорьевич Куликов<sup>1</sup>✉, Константин Анварович Ризванов<sup>2</sup>,**

**Артем Викторович Иванов<sup>3</sup>, Вадим Андреевич Шукалюк<sup>4</sup>**

<sup>1,2,4</sup>Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ),

Уфа, Россия

<sup>3</sup>Научно - производственное предприятие «Аэросила»,

Ступино. Московская область, Россия

<sup>1</sup>[gennadyg\\_98@yahoo.com](mailto:gennadyg_98@yahoo.com)✉

<sup>2</sup>[rizvanovk@bk.ru](mailto:rizvanovk@bk.ru)

*Аннотация.* В данной статье исследуется применение системной технологии в процессе разработки цифровых двойников для использования в двигателестроительной промышленности. Авторы определяют основные требования и специфические особенности создания цифровых двойников, а также разрабатывают системно-лингвистический подход к формированию формальных моделей изучаемой предметной области. Этот подход позволяет обеспечить должный уровень формализации в процессе создания цифровых двойников как

реальных, так и виртуальных объектов, сохраняя при этом их причинно-следственные связи. Авторы также рассматривают логику представления цифровых двойников в пространственно-временной системе координат Минковского с учетом кибернетического принципа их физической реализуемости. В качестве примера применения данной методологии представляются системные модели метаязыков и системные модели газотурбинных двигателей (ГТД), как объектов управления и контроля, а также модель формирования ресурсов ГТД начиная с этапа технического предложения на их разработку. Таким образом, представлены результаты анализа повышения эффективности применения принципов и методов системной инженерии при разработки цифровых двойников.

**Ключевые слова.** системный подход, категория диалектики, системная инженерия, теория категорий, принцип причинности, графоаналитические метаязыки, технический ресурс ГТД, информационная «гейтовая» система ГТД, нейросеть

**Для цитирования:** Куликов Г.Г., Ризванов К.А., Иванов А.В., Шукалюк В.А. Трансформация автоматизированной информационно-управляющей системы построения системных математических моделей ГТД в форму цифровых двойников // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177673>

Review article

# TRANSFORMATION OF AN AUTOMATED INFORMATION AND CONTROL SYSTEM FOR CONSTRUCTING SYSTEM MATHEMATICAL MODELS OF GAS TURBINE ENGINES IN THE FORM OF DIGITAL TWINS

**Gennady G. Kulikov**<sup>1✉</sup>, **Konstantin A. Rizvanov**<sup>2</sup>, **Artem V. Ivanov**<sup>3</sup>,  
**Vadim A. Shukaluk**<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Ufa University of Science and Technology,

Ufa, Russia

<sup>3</sup>SPE «Aerosila»,

Stupino, Moscow Region, Russia

<sup>1</sup>[gennadyg\\_98@yahoo.com](mailto:gennadyg_98@yahoo.com)✉

<sup>2</sup>[rizvanovk@bk.ru](mailto:rizvanovk@bk.ru)

**Abstract.** The article studies the system technology application in the process of the of digital twins development for employing in the engine manufacturing industry. The authors define the basic requirements and specific features of creating digital twins, as well as consider a systemic-linguistic approach to the formal models forming of the subject area being studied. This approach allows ensuring the proper level of formalization in the process of creating digital twins of both real and virtual objects, while maintaining their cause-and-effect relationships. The authors consider as well the logic of digital twins representing in the space-time Minkowski coordinate system, with account for the cybernetic principle of their physical realizability. As an example of this methodology application, the authors present system models of meta-languages and system models of gas turbine engines (GTE), as objects of management and control, as well as a model for

the GTE resources formation starting from the technical proposal stage for their development. Thus, the results of the analysis of enhancing of the systems engineering principles and methods efficiency while digital twins developing are presented.

**Keywords:** system approach, category of dialectics, systems engineering, theory of categories, principle of causality, graphic-analytical metalanguages, technical resource of gas turbine engine, information gate system of gas turbine engine, neural network

**For citation:** Kulikov G.G., Rizvanov K.A, Ivanov A.V., Shukaluk V.A. Transformation of an automated information and control system for constructing system mathematical models of gas turbine engines in the form of digital twins. *Trudy MAI*, 2023. no. 133.

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177673>

## Введение

В научной литературе [2, 3-8] обсуждается значимость системных знаний в процессе создания сложных технических устройств, основывающихся на базовых принципах и категориях диалектической философии. В соответствии с этим, был сформирован системный подход к познанию, названный “Инженерная диалектика”.

В работе исследуются методы применения формальной логики, математической лингвистики, теории множеств и других наук для описания исследуемой предметной области, которые трансформируются в формальную систему знаний на основе пространства Минковского. Использование диалектической логики с кванторами общности и существования позволяет

проводить семантический и логический анализ, а также параметрические исследования объектов в рассматриваемой предметной области [9-11].

Акцентируется особое внимание на значимости принципов формальной логики, таких как определенность, доказательность, ясность и последовательность, для построения научных систем знаний. Описанные методы и подходы могут быть использованы для развития системного мышления и обеспечения высокого качества научных исследований и разработок в технической сфере.

Рассматриваются процессы исследований и научных исследований в “гейтовых” системах новых сложных объектов, которые проводятся параллельно с процессом извлечения и формализации экспертных знаний из исследуемой предметной области. Как пример рассматривается создание системной модели автоматизированного технического средства в сфере проектирования, производства и эксплуатации ГТД. Показано, что результаты данных работ оформляются в формате научно-технической документации и научных отчетов, с учетом их непротиворечивости сведениям из области Internet - ресурсов [12-15, 20].

Авторы предлагают увеличить степень формализации за счет разработки автоматизированной информационной технологии для извлечения экспертных знаний из исследуемой предметной области и уже имеющихся знаний об объекте в форму ЦД. Это позволит улучшить эффективность исследований и повысить качество результатов исследований в данной предметной области (см. рис.1).



Рис. 1 Цифровое измерение исследуемой предметной области

### **Определение понятия Цифровой Двойник**

В различных источниках можно найти множество определений “цифровой двойник” (ЦД). В ГОСТ Р 57700.37-2021 [1] представлено следующее определение: “Цифровой двойник - система, включающая цифровую модель объекта и двусторонние информационные связи с объектом (если объект существует) и/или его составными частями.” ЦД представляет собой высокоточную модель, которая соответствует физическому миру в виртуальном пространстве и представлена в цифровом виде [2].

### **Постановка задачи трансформации системной модели в цифровой двойник**

Трансформация информационных технологий и их объединение в едином цифровом пространстве требует математической формализации диалектических категорий и преобразования их в инженерные категории цифровых двойников, которые представляют собой множество объектов конкретных предметно-ориентированных областей. Создание системных моделей цифровых двойников конкретных предметных областей требует применения специализированных предметно-ориентированных языков, которые также используются для анализа диалектических связей причин и следствий, исследования соответствия законов

формальной логики объектам предметной области, изучения структуры языков и их влияния на характеристики исследуемых предметных областей.

В качестве примера использования формального языка, в котором определяются символы и правила вывода, можно привести работу [8-10]. При добавлении правил преобразования и принятии определённых предложений в качестве аксиом создаётся логическая система, способная интерпретировать символы и определять верность предложений.

К примеру, в процессе семантического исследования конкретной предметной области можно определить базовый словарь, который станет терминальным алфавитом при описании причинно-следственной связи. Он будет включать такие понятия, как объект, явление, причина, следствие, система, функция и т.д.

Для нетерминальной части словаря можно использовать понятия, характерные для предметно-ориентированной сферы, такие как категория, среда и предметная область. После этого создаются синтаксические и семантические правила для конкретного предметно-ориентировочного направления [8].

Синтаксические правила определяют структуру формул, а семантические правила определяют их значение.

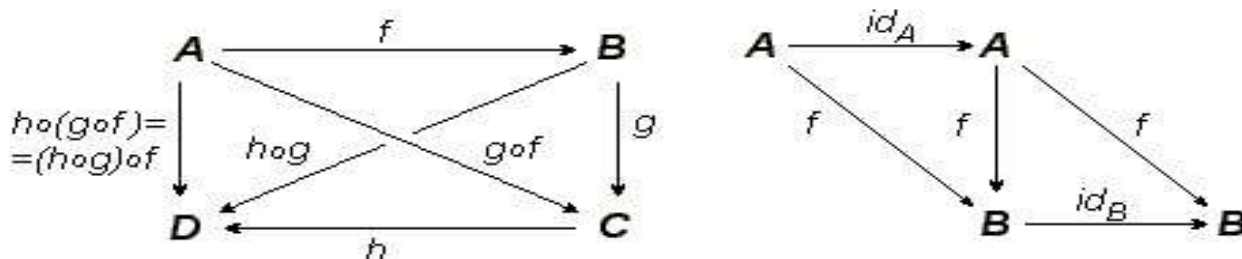


Рис. 2. Организационно-функциональная схема композиции объектов и их морфизмов

### Пример 1. Система формализованных причинно- следственных связей для описания бизнес-процессов

Бизнес-процессы можно описать с использованием предметно-ориентированных метаязыков в соответствии с иерархией Хомского. Согласно формальной грамматике Хомского, четверка элементов составляет основу для описания: алфавит терминальных и нетерминальных символов, конечный набор продукций и начальный символ.

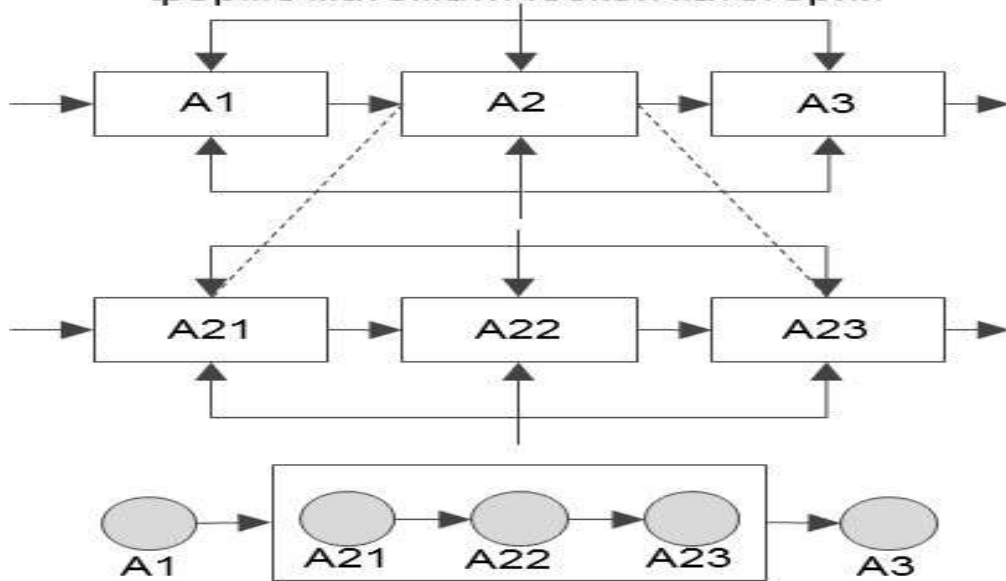
На диаграмме бизнес-процесса IDEF0 можно проиллюстрировать использование данных элементов для описания процесса. Нотация IDEF0 - это методология функционального моделирования, представляющая собой графическую систему для описания бизнес-процессов, которую можно использовать для трансформации цифрового двойника (см. рис. 3-4).



Рис. 3. Алгоритм трансформации цифрового двойника

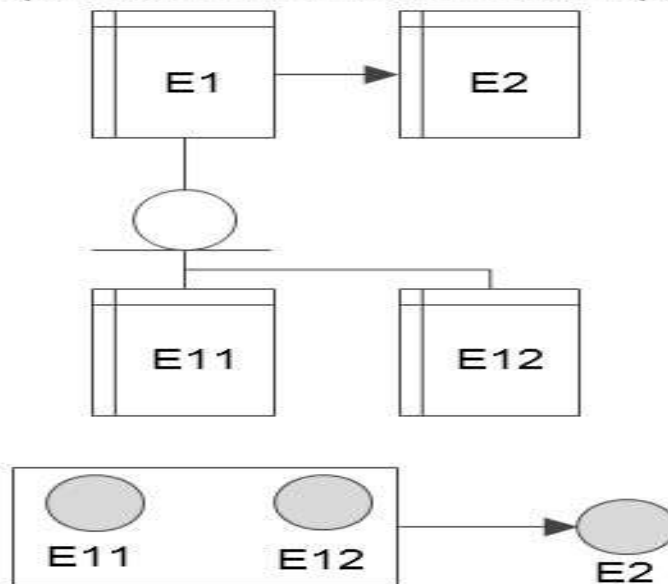


Представление функциональной модели в форме математической категории



**Класс объектов** –  $ObjC$  – входы/выходы бизнес-процесса ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ )  
**Класс морфизмов** –  $Hom_C(A_i, A_j)$  – функции бизнес-процесса  
 Операция композиции ассоциативна за счет декомпозиции

Представление информационной модели в форме математической категории



**Класс объектов** –  $ObjC$  – сущности информационной модели ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ )  
**Класс морфизмов** –  $Hom_C(A_i, A_j)$  – отношения между сущностями  
 Операция композиции ассоциативна за счет категоризации

Рис. 4. Математическая категория цифрового двойника

## Пример 2. Концептуальное проектирование ГТД и его систем

На этапе концептуального проектирования с использованием метаязыков, таких как естественный язык (ЕЯ), графический язык (ГЯ), графоаналитический язык (ГАЯ), математический язык (МЯ) и языки программирования (ПЯ), были определены ключевые задачи, решаемые в рамках данного исследования. Эти задачи включали обеспечение адекватности комплексной модели газотурбинного двигателя (ГТД) его реальным системам, разработку технологии моделирования системы “газотурбинный двигатель + система автоматического управления и контроля FADEC” с учётом возможных отказов на базе полунатурного моделирующего стенда и разработку методики испытания ГТД в условиях возникновения системных отказов. Современная теория системного моделирования ключевых этапов жизненного цикла развития ГТД и его систем (включая систему автоматического управления и контроля FADEC) является инструментом для создания полунатуральных моделирующих комплексов [16-21]. Современная теория полунатурного моделирования предусматривает двухуровневую систему моделирования: нижний уровень включает полунатурное моделирование “газотурбинный двигатель+FADEC”, где газотурбинный двигатель и его системы представлены в виде математической модели реального времени (компьютерное моделирование), а FADEC представлен в виде реального блока.

Ключевым инструментом в процессах создания ГТД являются программные комплексы для термогазодинамических расчетов его статических и динамических характеристик (ДХ, ВСК, и др.), представляющих собой системные модели для синтеза и анализа систем автоматического управления, контроля и диагностики

САУКиД типа FADEC. Это Программные комплексы: “ГРАД” (Казанский гос. университет), DVIGw (Уфимский гос. авиационный тех. университет), GasTurb (Мюнхенский тех. Университет), “ThermoGTE” (зарегистрирован в реестре программ в 2014 г.). Для моделирования САУКиД ГТД используются программные комплексы MATLAB (среда визуально-ориентированного программирования Simulink), LabVIEW (среда разработки) и др. Указанное множество программных комплексов позволяет сформировать вычислительную платформу для создания автоматизированной информационно-управляющей системы построения системных математических моделей ГТД и их САУКиД в форме цифровых двойников. Для проектирования метаструктур системных (сквозных) моделей бизнес процессов моделирования, указанное множество программных комплексов в вычислительной платформе дополняется программными пакетами бизнес моделирования SADT (BPWIN, ERWIN (IDEF0, IDEF1X, IDEF3, и др.).

### **Пример 3. Архитектура системной семантической модели цифрового двойника**

Определим область исследования с помощью ряда вопросов, связанных с назначением, использованием, управлением техническим ресурсом газотурбинного двигателя (ГТД) и его основных электромеханических систем на протяжении его жизненного цикла [21]. Ресурс, включающий взаимосвязанные параметры, такие как ресурс горячей части двигателя и ресурс агрегатов, учитывается и анализируется на разных этапах жизненного цикла [4]. Одной из основных задач учета и анализа этих параметров является учет и анализ параметров оставшегося ресурса. Продление ресурса ГТД и его электромеханических систем осуществляется на основе анализа данных, полученных с ГТД на испытательных стендах компании. На

рис. 5 показана декомпозиция функциональной модели процесса увеличения ресурса ГТД и его электромеханических систем.

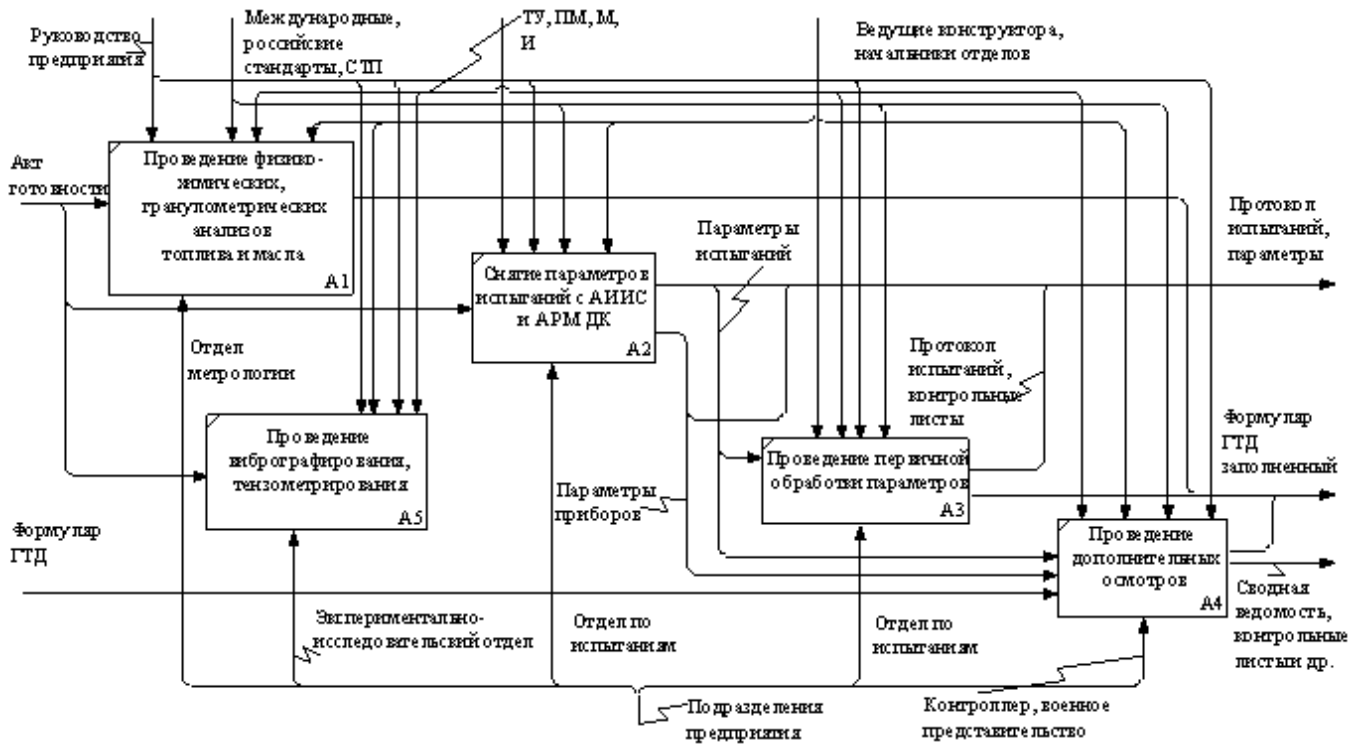


Рис. 5. Декомпозиция функциональной модели трансформации цифрового двойника

Сегодня доступно формализовывать опыт специалиста (как Естественного интеллекта) с этапа определения необходимых характеристик системной модели ресурсов в технической спецификации и техзадании на разработку [6]. Предложенный подход можно рассматривать как алгоритм для процесса создания технического решения в форме метасистемы и её подсистем. Это общий подход к декомпозиции технических решений. Например, для конкретного рассматриваемого вопроса формирования технического решения для ресурса газотурбинного двигателя, виртуально создается модель системы, начиная с этапа техзадания, которая улучшается на следующих этапах системы "гейтов".

В настоящее время стали активно использоваться системы близкие к искусственному интеллекту, это прежде всего: поисковые системы со своей логикой и ограниченном синтаксисом формирования запросов и анализом ответов; предметно ориентированные с логикой кластеризации и классификации предъявляемых семантических объектов в сравнении с объектами из области исследуемой предметной области в Internet в заданных аспектах (например программа Антиплагиат); нейросети с логикой формирования расширяемых онтологических моделей в области исследуемой предметной области Internet, формируемой на основе онтологического содержания запроса. Примером такой нейросети может служить ChatGPT, представляющий собой крупную языковую модель, обучаемую Open AI, которая применяет глубокое обучение для генерирования онтологического текста ответов на задаваемые вопросы. Рекомендуется, используя опыт специалиста для обучения нейросети, которая далее могла бы помогать принимать различные решения, касающихся вопросов о продлении ресурса газотурбинного двигателя. На рис. 6 представлен пример фрагмента системной модели запроса, формируемого экспертом на научное исследование вопроса о техническом ресурсе и оформление результата в форме абзаца научно - исследовательской статьи или технического отчёта.



Рис. 6 Фрагмент примера сценария взаимодействия Эксперта с Искусственным интеллектом (на основе нейросети ) в исследуемой предметной области.

## Заключение

1. На основе логики “Инженерной диалектики” разработаны подход и метод формирования цифровых двойников объектов исследуемой предметной области на основе их системных моделей.

2. Показано, что данный подход способствует формализации (соблюдению) условия “идентифицируемости и прослеживаемости” (установление причинно-следственных связей между состояниями разных объектов, систем и подсистем газотурбинного двигателя на этапах “гейта”), обеспечивая решение обратной задачи диагностики и контроля: имея данные об отказе, можно выявить его воздействие на системы и подсистемы двигателя, что обеспечивает цифровой двойник.

3. Предложена архитектура ЦД на множестве системных моделей объектов, систем и подсистем исследуемой предметной области.

### **Список источников**

1. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. - М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с.
2. Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175930>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)
3. Фролов И.Т. Введение в философию. - М.: Республика, 2003. - 623 с.
4. Беляев Б.В., Лебедев А.С. Методика прогнозирования остаточного ресурса при разгерметизации летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168167>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-08)
5. Эзрохи Ю.А., Каленский С.М. Идентификация математической модели ГТД по результатам испытаний // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164276>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-19)
6. Филимонов И.А. Опыт создания персональной поисковой библиографической системы, ориентированной на конкретную область научных или инженерных знаний // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=119009>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-16](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-16)

7. Куликов Г.Г., Набатов А.Н., Речкалов А.В. Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Системное моделирование предметной области. - Уфа: УГАТУ, 2003. - 103 с.
8. Donald E. Knuth. Literate programming // The Computer Journal, 1984, vol. 27, pp. 97-111. URL:<https://doi.org/10.1093/comjnl/27.2.97>
9. Р. Голдблатт. Топосы. Категорный анализ логики. – М.: Мир, 1983. - 488 с.
10. Feferman Anita, Feferman Solomon. Alfred Tarski: A Life. Cambridge University Press, 2004, pp 332-333.
11. Bartosz Milewski. Category Theory. URL:  
<https://bartoszmilewski.com/category/category-theory>
12. Логиновский О.В., Ризванов К.А., Куликов Г.Г. Применение VI-принципов в гейтовой системе управления проектом создания цифрового двойника ГТД // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2020. Т. 20. № 1. С. 16–26. DOI:  
[10.14529/ctcr200102](https://doi.org/10.14529/ctcr200102)
13. Куликов Г. Г., Черкасов Б. А. Математические модели, используемые в САПР двигателя и систем управления. Автоматика и регулирование реактивных двигателей. - М.: Машиностроение, 1988. С. 323–343.
14. Фатиков В.С. и др. Комплекс информационного и полунатурного моделирования для исследования систем автоматического управления и контроля многодвигательных силовых установок при их эксплуатации по состоянию // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. № 2. С. 155–160.



15. Распопов Е.В. и др. Интеллектуальная система запуска для нового поколения авиационных ГТД // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2007. Т. 9. № 2 (20). С. 153–157.
16. Арьков В.Ю. и др. Полунатурное моделирование отказов ГТД для испытаний систем контроля и диагностики двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. № 7 (15). С. 167–173.
17. G. Kulikov et al. Dynamic Modeling Of Gas Turbines, Springer-Verlag, New York, 2004, 309 p.
18. Kulikov G. et al. Intelligent information technologies for control and diagnostics of gas turbine engines and their systems at all stages of their life cycle // Proc. Ametmas-Noe Int. Workshop on Problems of Technology Transfer, Ufa, 1999. pp. 121–124.
19. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. – М.: Стандартинформ, 2007. - 14 с.
20. Куликов Г.Г. и др. Способ полунатурных испытаний систем автоматического управления и контроля газотурбинных двигателей и стенд для его реализации. Патент 2340883 РФ, МПК G01M 15/14. №2007118610/06. Бюл. № 34, 10.12.2008.
21. Гумеров, Х.С., Куликов Г.Г., Ризванов К.А. Системная модель информационной поддержки длительных испытаний и эксплуатации газотурбинного двигателя на основе показателя остаточного ресурса // Материалы 3-й научно-практической конференции молодых специалистов и ученых. - М.: ОАО «ОКБ Сухого», 2005. С. 583-586.

## References

1. GOST R 57700.37–2021. *Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoyniki izdelii. Obshchie polozheniya* (GOST R 57700.37–2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions), Moscow, Rossiiskii institut standartizatsii, 2021, 15 p.
2. Kuznetsova S.V., Semenov A.S. *Trudy MAI*, 2023, no. 131. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175930>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)
3. Frolov I.T. *Vvedenie v filosofiyu* (Introduction to philosophy), Moscow, Respublika, 2003, 623 p.
4. Belyaev B.V., Lebedev A.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168167>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-08)
5. Ezrokhi Yu.A., Kalenskii S.M. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164276>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-19)
6. Filimonov I.A. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119009>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-16](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-16)
7. Kulikov G.G., Nabatov A.N., Rechkalov A.V. *Avtomatizirovannoe proektirovanie informatsionno-upravlyayushchikh sistem. Sistemnoe modelirovanie predmetnoi oblasti* (Automated design of information and control systems. System modeling of the subject area.), Ufa, UGATU, 2003, 103 p.
8. Donald E. Knuth. Literate programming, *The Computer Journal*, 1984, vol. 27, pp. 97-111. URL: <https://doi.org/10.1093/comjnl/27.2.97>

9. Robert Goldblatt. *Topoi: The Categorical Analysis of Logic*, Courier Corporation, 2013, 576 p.
10. Feferman Anita, Feferman Solomon. *Alfred Tarski: A Life*. Cambridge University Press, 2004, pp 332-333.
11. Bartosz Milewski. *Category Theory*. URL: <https://bartoszmilewski.com/category/category-theory>
12. Loginovskii O.V., Rizvanov K.A., Kulikov G.G. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 16–26. DOI: [10.14529/ctcr200102](https://doi.org/10.14529/ctcr200102)
13. Kulikov G.G., Cherkasov B.A. *Matematicheskie modeli, ispol'zuemye v SAPR dvigatelya i sistem upravleniya. Avtomatika i regulirovanie reaktivnykh dvigatelei* (Mathematical models used in CAD for engines and control systems. Automation and regulation of jet engines), Moscow, Mashinostroenie, 1988, pp. 323–343.
14. Fatikov V.S. et al. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2005, no. 2, pp. 155–160.
15. Raspopov E.V. et al. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, vol. 9, no. 2 (20), pp. 153–157.
16. Ar'kov V.Yu. et al. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2004, no. 7 (15), pp. 167–173.
17. G. Kulikov et al. *Dynamic Modeling Of Gas Turbines*, Springer-Verlag, New York, 2004, 309 p.

18. Kulikov G. et al. Intelligent information technologies for control and diagnostics of gas turbine engines and their systems at all stages of their life cycle, *Proc. Ametmas-Noe Int. Workshop on Problems of Technology Transfer*, Ufa, 1999, pp. 121–124.
19. *GOST R ISO/MEK 15288-2005. Informatsionnaya tekhnologiya. Sistemnaya inzheneriya. Protsessy zhiznennogo tsikla sistem* (GOST R ISO/IEC 15288-2005. Information technology. Systems Engineering. Systems life cycle processes), Moscow, Standartinform, 2007, 14 p.
20. Kulikov G.G. et al. Sposob polunaturnykh ispytaniy sistem avtomaticheskogo upravleniya i kontrolya gazoturbinnnykh dvigatelei i stend dlya ego realizatsii. *Patent 2340883 RF*, MPK G01M 15/14. №2007118610/06. Byul. no. 34, 10.12.2008.
21. Gumerov, Kh.S., Kulikov G.G., Rizvanov K.A. *Materialy 3-i nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh spetsialistov i uchenykh*, Moscow, OAO «OKB Sukhogo», 2005, pp. 583586.

Статья поступила в редакцию 12.10.2023

Одобрена после рецензирования 24.10.2023

Принята к публикации 25.12.2023

The article was submitted on 12.10.2023; approved after reviewing on 24.10.2023; accepted for publication on 25.12.2023