

УДК 004.622

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕМАНТИЧЕСКИХ ФОРМАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ КАТЕГОРИЙ ДИАЛЕКТИКИ И ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫХ МЕТОДОВ

Г.Г.Куликов<sup>1</sup>, К.А. Ризванов<sup>2</sup>, А.В. Иванов<sup>3</sup>, В.А. Шукалюк<sup>4</sup>

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

<sup>1,2,4</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Россия

<sup>3,4</sup>АО «НПП «Аэросила», г. Уфа, Россия

*Поступила в редакцию 11.09.2023*

**Аннотация.** Рассматривается системно-лингвистический подход к проектированию формальных моделей исследуемой предметной области (ИПО) на основе категорий диалектики и теоретико-множественных методов. Показано, что данный подход позволяет обеспечить требуемый уровень формализации цифровых двойников (ЦД) реальных и виртуальных объектов с сохранением их причинно-следственных связей. Рассматривается логика представления ЦД ИПО в пространственно – временном базисе Минковского. Показано, что соответствие применяемых предметно – ориентированных формальных языков для построения ЦД ИПО осуществляется в базисе уровней иерархии, порождающих языков Н. Хомского. Приводятся примеры применения данного подхода для построения семантической мета структуры ЦД ГТД (ИПО) в кибернетическом аспекте.

**Ключевые слова:** системный подход, категория диалектики, системная инженерия, теория категорий, принцип причинности, графоаналитические метаязыки.

### ВВЕДЕНИЕ

При создании сложных технических объектов требуются многофункциональные системные знания об исследуемой предметной области (ИПО) [1-7]. Известно, что системные знания о ИПО базируются, прежде всего, на общих философских законах, отраженных в категориях диалектики. Разработанные в материальной диалектике принципы и законы явились основой системной методологии и системного метода познания в форме «Инженерной диалектики». В системном подходе во всем многообразии воплотились идеи диалектики в естественных областях бытия, инженерии, науки, искусстве, религии и др. В соответствии с этими идеями, например, композиция формальных математических методов, формальной логики, теории множеств, теории категорий, математической лингвистики и др. сегодня определяет формальную систему знаний в математике и в пространстве Минковского. Диалектическая логика, с учетом кванторов общности и существования дает возможность семантически рассмотреть, логически представить, провести параметрические исследования свойств какого-либо объекта, с учетом множества его элементов, их предметного содержания и связей в исследуемой предметной области, как части реального мира.

Диалектика обобщает и связывает опыт многих наук и представляет собой систему категорий, сама создает и поддерживает принципы своего существования и развития. Категории диалектики в своем единстве отражают общие законы развития мира: они объективно содер-

жательны и логически функциональны, являются одновременно и теорией познания, и логикой. Диалектика – это та научная система, в которой важное место занимают принципы формальной логики: определенность, доказательность, ясность, последовательность, непротиворечивость. Она имеет объективное содержание, т.к. отражает закономерности реального мира. Трансформация общих законов диалектики в область инженерной деятельности (системной инженерии), предполагает разработку новых подходов и методов системного представления и моделирования исследуемых ПОО в цифровом пространстве в форме ЦД.

#### **КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ЭТАП ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМНОЙ ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ В СООТВЕТСТВИИ С ЛОГИКОЙ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОЙ КАТЕГОРИИ ДИАЛЕКТИКИ**

Известно, что причинно-следственные связи определяют, как структуру явления внутри объекта, так и между объектами и проявляются через отношения, соответствия, отображения и др. Категория причины и следствия является одной из основных категорий научного исследования [2,3].

Принцип причинности означает, что все природные и общественные явления и процессы детерминированы, упорядочены. Принцип детерминизма (повторяемости) лежит в основе научного познания мира, объяснения явлений в объектах (их предметное содержание) и между объектами. Причиной выступает то явление, которое при определенных условиях с необходимостью вызывает другие явления или обуславливает в нем изменения. Следствие – это явление, которое порождается или изменяется под действием определенной причины в объекте или между объектами, связь между причиной и следствием закономерна и универсальна. Таким образом, все множество явлений исследуемой ПО классифицируется на явления-причины и явления-следствия, и проявляются только при функциональном взаимодействии.

Отметим, что понятие явления предполагает и наличие среды, в которой происходит взаимодействие в объекте или между объектами. Между причиной и следствием существует глубокая логическая связь, определяемая квантором всеобщности. С ней связаны формы связей, которые отражаются такими категориями, как форма и содержание, возможность и действительность, необходимость и случайность и др. Причинно-следственная связь – это одно, но необходимое звено во взаимодействии явлений в процессах. Характерной особенностью причинно-следственной связи является ее необходимость, т.е. данная причина при определенных условиях вызывает определенное следствие. Основным свойством причинно-следственной связи является ее объективная (обязательная), определяемая квантором существования, последовательность во времени. В целом причинно-следственные связи определяются основным правилом (предикатом) логики «Если это, то...». Проблема причинно-следственной связи была решена Гегелем; он предложил свою концепцию: причина и следствие находятся в диалектическом взаимодействии. Причина – это активная субстанция (внешняя по отношению к объекту), которая воздействует на пассивный материальный объект (на его внутреннее состояние), вызывает в нем изменение и превращает его во внешнее следствие. При этом следствие не является инертным, оно, в свою очередь, оказывает противодействие. Следствие превращается из пассивного начала (внутреннего состояния объекта) в активное и снова выступает как причина. По своему характеру причинные связи могут быть разнообразными. Они могут быть прямыми и опосредованными. Различаются внутренние и внешние причины. Внутренняя причина – это взаимодействие внутренних свойств, частей, тенденций данного явления. Внешняя причина – это воздействие одного объекта на другой. Причиной является не одностороннее воздействие одного предмета на другой, а взаимодействие двух и более элементов, входящих в материальное образование. В любом взаимодействии необходимо выделить основное, определяющее, выявить причинную связь. Причина и следствие в единстве образуют причинно-следственную цепь, в которой могут меняться местами: в одной связи данное звено может являться причиной, в другом – следствием, данная причина вызывает следствие, само оно становится причиной нового следствия и так далее. По времени причина всегда предшествует

следствию (хотя иногда это измеряется долями секунды), но не всякое явление предшествующее другому, является его причиной. Следование во времени не является достаточным признаком причины. Причинная зависимость может быть лишь тогда, когда одно явление не только предшествует другому, но и с неизбежностью определяет его. Следование одного явления за другим не является единственным признаком причинной связи, хотя он необходим. «После этого» не означает «По причине этого». Не все, что было раньше этого возможно случайного явления, будет его причиной. Использование всех имеющихся современных знаний о причинных взаимодействиях позволяет сделать вывод о том, что все явления непосредственно или опосредованно ответственны друг другу, все в мире взаимосвязано. В практической деятельности специалистов возможно установить основные причины (или причину), способные вызвать необходимые следствия. Связь между причиной и следствием может иметь не только необходимый, но и случайный характер. В таком случае и следствие будет случайным. Причинные основания при случайной связи причины и следствия допускают возможность появления одного из множества альтернативных следствий. Случайное следствие (событие) может произойти, а может и не быть. Из большого количества различных причин, подчас неизвестных, воздействуют на объект некоторые, неопределенные, и таким образом вызывается неожиданное, случайное следствие.

Самые сложные причинно-следственные связи имеют самоорганизующиеся системы, в которых взаимодействия между объектами и в самих объектах обусловлены их предыдущими состояниями, развитием и воздействием различных внешних факторов. Учитывая многообразие причин, необходимо выделить главные, решающие, это позволит найти в цепи явлений, событий основное звено и даст возможность решить стоящие проблемы.

Данные принципы диалектического анализа позволяют представить исследуемую ПО как систему и проводить дальнейший анализ и синтез с применением математических методов.

Базовые положения системной формализации, исходящие из выше рассмотренных принципов диалектики представлены в виде структурных схем на рис. 1. В качестве исходных категорий здесь приняты: материя, движение, пространство, время. В качестве производных понятий выделяются категории причина - следствие, сущность - явление, количество - качество, свойство - мера.

В соответствии с квантором существования определяются взаимосвязанные объекты (конкретные вещи и связи), которые являются так же системами, при этом они могут быть подсистемами в других системах, и они совместно со своими связями формируют структуру системы. Отметим, что эти определения являются «рекурсивными».

Системы и их элементы характеризуются свойствами, которые проявляются через отношения. Причем эти свойства и отношения могут быть также отражены своей системой и будут иметь свойство "рекурсии". На структурных схемах данное свойство представляется с помощью стрелок, отображающих «обратные связи».

Для системы и ее элементов существуют границы, которые определяют различие и тождество, внутренние и внешние свойства, которые существуют в единстве и могут вступать в противоречие. Элементы могут быть разделены на классы с помощью меры, которая количественно определяет границу.

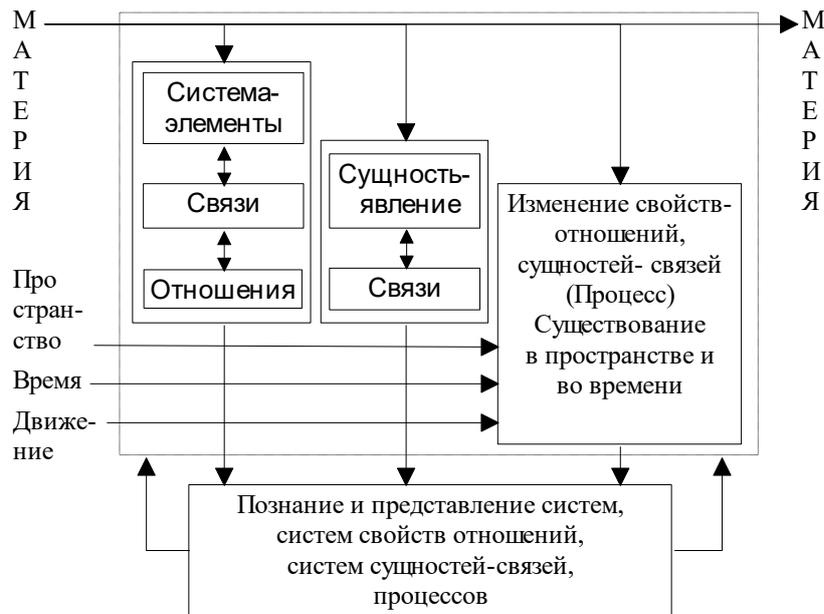


Рис. 1. Организационно-функциональная схема верхнего уровня основных понятий

Отдельные элементы в классе определяют количественные границы и представляют собой конкретные экземпляры. Сами системы, их элементы, свойства, отношения существуют во времени. В этом смысле процессы развития системы и ее элементов происходят как взаимоотношения причины и следствия в физическом и временном пространствах Минковского.

Очевидно, что при исследовании, проектировании и создании реальной системы необходимо определить элементы и структуру их взаимодействия в пространстве и во времени с помощью различных мер. При этом "параллельно" реальной системе существует ее информационное отображение - информационная система (виртуальная система), которые связаны в цифровом пространстве.

Анализ методологий исследования в различных предметных областях, связанный с техническими системами, например, в области конструирования и технологии изготовления машин, создания АСУ и других, показывает, что они соответствуют указанным положениям диалектики и поддерживаются в промышленности системой ГОСТов на проектирование - ЕСКД, ЕСТД, ЕСПД и другие [5,6]. Исследуемая предметная область представляется в форме метасистемы: функциональной (структурной) схемы, в которой через отношения и взаимосвязи подсистем и элементов отражаются их основные функциональные свойства. Далее эти свойства и отношения более полно раскрываются через комплекс графических схем, чертежей, информационных данных выраженных через спецификации, инструкции, расчеты и т.д.

Свойства систем, функциональные отношения их подсистем и элементов изменяются во времени и в пространстве и описываются различными условиями во времени, например, графиками по времени и др. Таким образом, задачи, связанные с представлением, отображением систем (пониманием ее функционирования), могут быть "покрыты" системой моделей.

Адекватные модели должны позволять измерять или вычислять количественные и качественные параметры состояния системы и ее объектов.

Если на основании вышеприведенных положений поставить задачу моделирования (описания) реальной системы в какой-либо предметной области, то схема ее решения будет иметь следующий вид [5,6].

Существует открытая с точки зрения познания предметная область А. Из которой путем применения «семантической меры» в виде "Цели моделирования" можно провести границу 1, которая выделит из предметной области А подобласть В.

Аналогично можно сформировать «семантическую меру», например, в виде "точки зрения исследователя" и выделить подобласть С.

Далее можно ввести меры для выделения функций, информационного описания и представления динамики.

Данную схему можно проиллюстрировать рис. 2.

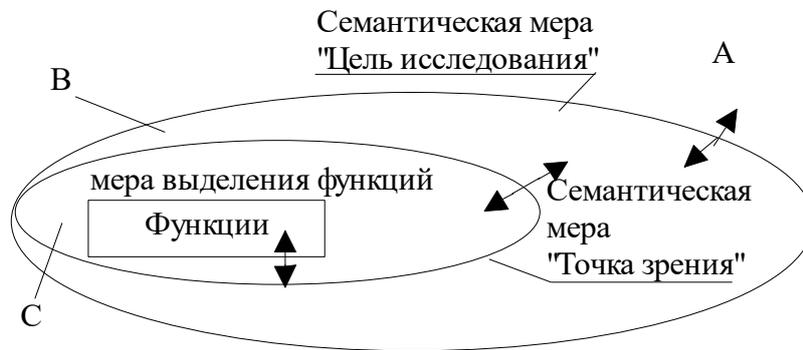


Рис. 2. Организационно-функциональная схема первого уровня основных понятий

Различные меры материальной природы (длина, вес, объем, экономические показатели и др.), как правило, вводят с помощью систем эталонов. Меры суждений могут формироваться на основе экспертных оценок, например, как в методе анализа иерархий.

Таким образом, на основании рассмотренных теоретических положений можно сформировать алгоритм первого этапа проектирования системной модели, исследуемой ПО в соответствии с логикой причинно-следственной категории диалектики и общей теории систем.

1. Анализ предметной области с целью выявления множества объектов, явлений и причинно-следственных связей в форме категории множеств.
2. Классификация явлений в объектах и формирование подмножества причинно-следственных связей, определяющих внешнее взаимодействие объектов через их внутреннее состояние.
3. Формирование категорий объектов на основе анализа однотипности классов причин и следствий.
4. Формализованное представление системной модели ПО в форме категориальной модели в графо-аналитическом виде на естественном языке в различных аспектах.

#### ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМНОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Широкое применение информационных технологий определяет необходимость математической (логической и количественной) формализации диалектических категорий до инженерных категорий цифровых двойников множества объектов конкретных предметно-ориентированных областей. Инструментом построения системных моделей ЦД ПОО как категорий знаний для различных предметно-ориентированных областей являются формализованные предметно-ориентированные метаязыки [8, 13], которые, по сути, являются также диалектической категорией с объективными адекватными причинно-следственными связями и подчиняющимся общим законам формальной логики. В таких метаязыках синтаксические правила адекватно отражают свойства структуры исследуемых предметных областей. Законы диалектики представляются как системы аксиом, определяющие истинность знаний об идентифицируемых объектах и их причинно-следственных связях в исследуемой и предметной области, то есть семантику. При этом должна определяться также цепочка причинно-следственных связей между метаязыками, их синтаксисом, семантикой и знаниями о предметной области. Например, для информационной деятельности это может быть: Естественный метаязык (ЕЯ); Графический метаязык (ГЯ); Графоаналитический метаязык (ГАЯ); Математический метаязык (МЯ); метаязык программирования (ПЯ) и т.д. Определим соответствие между ЕЯ представления причинно-следственной категории, ее подкатегорий и формализованным графоаналитическим языком (ФГАЯ) в рамках математической теории категорий. В качестве примера

определим соответствие между ЕЯ представления причинно - следственной категории (ее под-категорий) и формализованным графоаналитическим языком (ФГАЯ) в аспекте формального языка математической теории категорий. Для исследования решаемой проблемы определим две категории: предметно-ориентированный формальный метаязык (ПОФМЯ); исследуемую предметную область (ИПО), как область (множество) причинно-следственных связей между реальными объектами. Очевидно, что свойства идентифицируемых объектов и их причинно - следственных связей в ПОФМЯ и в реальной ПО должны быть тождественны.

Формальный язык в [10] определяется как множество символов (также называемого алфавитом) и множества правил вывода (также называемого формальной грамматикой), которые определяют, какие строки символов являются правильно построенными формулами (схемами). При добавлении правил преобразования и принятии некоторых предложений за аксиомы (что вместе называется дедуктивной системой), формируется логическая система – интерпретации, то есть задание смысла ее символам и значений истинности ее предложениям.

В примере на основе семантического (логического) анализа исследуемой предметной области определим его словарный базис (как терминальный алфавит) категории формального языка для описания причинно-следственной категории:

$Am = \{\text{объект; явление, причина; следствие; система; функция; утверждение; метод; случайность; субстанция; внутреннее; внешнее...}\}$ .

Определим словарь для нетерминальной части алфавита, определяемый понятиями ПОО:  $Wm = \{\text{категория; среда, предметная область...}\}$ . Далее можно составить правила синтаксиса и семантики, соответствующие исследуемой ПОО [11].

#### ПРИМЕНЕНИЕ ФОРМАЛЬНОГО ЯЗЫКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ КАТЕГОРИИ МНОЖЕСТВ И ЕГО СООТВЕТСТВИЕ ЯЗЫКУ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ IDEF ПРИ СИСТЕМНОЙ МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Для обоснованного выбора формальных метаязыков из множества существующих, воспользуемся классификацией порождающих контекстных метаязыков Хомского. Выберем два языка: математический язык теории категорий множеств [12] и метаязык структурного анализа *SADT IDF*. Первый обладает семантикой, близкой к алгебраическим структурам, и позволяет представить и исследовать ПОО в форме логико-семантических моделей. Покажем это, для чего используем терминальные символы  $Obj_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) для обозначения объектов. Для обозначения связей между ними используем терминальный символ морфизма  $Hom_{i,j}$  ( $i, j = 1, \dots, n, m$ ). Для отображения линейных логико-структурных связей между объектами  $Obj_j$  и классификации их как элементов причинно-следственных связей используем следующие синтаксические правила. Для каждой пары объектов  $A, B$  задается множество морфизмов  $Hom(A, B)$ .

Примечание: предположим, что морфизмы классифицированы по признаку «аспект исследуемой предметной области».

Для пары морфизмов  $f \in Hom(A, B)$  и  $g \in Hom(B, C)$  определена композиция до  $f \circ g \in Hom(A, C)$ .

Примечание: действует для выбранного аспекта.

Для каждого объекта  $A$  задан тождественный морфизм  $id_A \in Hom(A, A)$ , для которых выполняются аксиомы. • Операция композиции ассоциативна:

$$h \circ (q \circ f) = (h \circ q) \circ f$$

Тождественный морфизм действует тривиально:  $f \circ id_A = id_B \circ f = f$  для  $f \in Hom(A, B)$ .

Покажем, что представление ИПО с применением данного формального языка позволяет сохранить свойства суперпозиции и ассоциативности всего многообразия причинно - следственных связей в объекте и во взаимодействии объектов в выбранном аспекте.

Нелинейность связей между объектами в рассматриваемом случае будет определяться функторами, связывающими различные аспекты  $As.1, As.2$ .

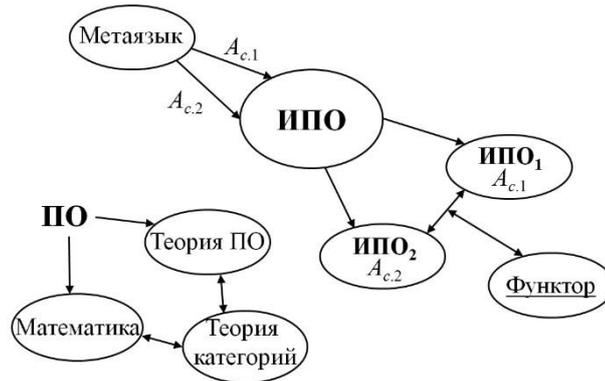


Рис. 3. Организационно-функциональная схема второго уровня на языке теории категорий.

Синтаксическими правилами построения «правильных» предложений (схем) на данном метаязыке являются правила построения коммутативных диаграмм.

Коммутативная диаграмма – это ориентированный граф, в вершинах которого находятся идентифицированные объекты, а стрелками являются идентифицированные морфизмы (наделенные определенными структурными свойствами причинно-следственных связей), причем результат композиции стрелок, то есть бинарная операция на множестве объектов. Аксиомы теории категорий определяют семантические правила метаязыка: ассоциативность композиции, тождественность морфизмов и др. То есть правила композиции объектов и их морфизмов сохраняются и в представлении диаграмм. Таким образом, метаязык является формальным графоаналитическим языком. На рис. 4 приведены синтаксические правила (аксиоматика) формализованного графоаналитического метаязыка.

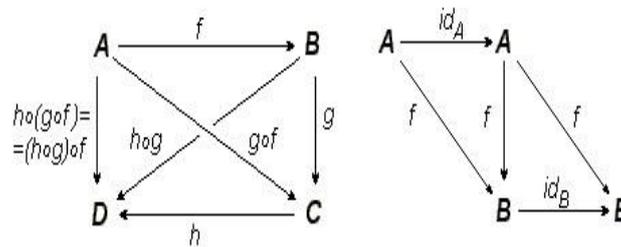


Рис. 4. Организационно-функциональная схема композиции объектов и их морфизмов.

Семантические правила, основанные на введенной аксиоматике, позволяют получать непротиворечивые графоаналитические модели ИПО в заданном аспекте, сохраняя принцип двойственности категорий (*Cor*), в которой объекты совпадают с объектами исходной категории (*C*), а морфизмы получают «обращением стрелок»:  $Hom_{Cor}(B, A) = Hom_C(A, B)$ .

Также будут сохраняться свойства изоморфизма, эндоморфизма, автоморфизма объектов ПО по следующим правилу: Морфизм  $f \in Hom(A, B)$  называется изоморфизмом, если существует такой морфизм  $g \in Hom(B, A)$ , что  $gof = id_A$  и  $fg = id_B$ .

В [13] показана тождественность синтаксиса, определенного выше, как метаязыка математической теории категорий множеств и процессного формального языка моделирования (высокоуровневого программирования) *IDEF*.

При реализации системной модели ПО на метаязыке структурного моделирования *IDEF* ее структура в функциональном аспекте может быть представлена в виде двудольного ориентированного графа, вершинами которого являются входные и выходные ресурсы, а ребрами – действия по их преобразованию. В этом случае каждая вершина имеет уникальный иерархический идентификатор, поиск вершины осуществляется путем прохождения пути от вершины графа к конкретной вершине. Также одновременно с графовой структурой системная модель

ПО описывается глоссарием – семантической сетью, описывающей семантический аспект вершин и ребер графа.

Определение системы измерений для системной модели заключается в формировании многомерного классификатора на основе терминов глоссария и контента информационных ресурсов ПО. Термины глоссария объединяются в пять классов: термины, описывающие входные данные, выходные данные, управляющие воздействия, механизмы и исполнителей, а также термины, описывающие функции

### ПРИМЕР 1. ПОИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СТРУКТУРА КОТОРЫХ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СИСТЕМУ ФОРМАЛИЗОВАННЫХ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

Представление описания бизнес-процессов, структура которых представляет систему формализованных причинно-следственных связей, возможно с применением предметно-ориентированных терминальных метаязыков в соответствии с иерархией Хомского.

Иерархия Хомского – классификация формальных языков и формальных грамматик, согласно которой они делятся на 4 типа по их условной сложности [14, 15].

Формальную грамматику  $G$  по Хомскому можно представить в виде упорядоченной четверки:

$$G = \langle VT, VN, P, S \rangle,$$

где  $V_T$  – алфавит (множество) терминальных символов – терминалов;  $V_N$  – алфавит (множество) нетерминальных символов – нетерминалов;  $V V VT N$  – словарь  $G$ , причем  $V VT N, P$  – конечное множество продукций (правил) грамматики,  $P V V^*$ ,  $S$  – начальный символ (источник).

Здесь  $V^*$  – множество всех строк над алфавитом  $V$ , а  $V^+$  – множество непустых строк над алфавитом  $V$ .

Рассмотрим описание бизнес-процесса на примере диаграммы в нотации структурного моделирования *IDEF0*. *IDEF0* представляет собой методологию функционального моделирования и графическую нотацию, предназначенную для формализации и описания бизнес-процессов. В работе [15] показано, что грамматика метаязыка *IDEF0* и его графическая нотация соответствуют формальной грамматике математической теории категории множеств.

С точки зрения грамматики Хомского, синтаксис *IDEF* можно отнести ко второму типу грамматик. Диаграмма в нотации *IDEF0* представляет собой две структуры: ориентированный граф, представляющий формальную структуру модели ПО, и глоссарий, определяющий словарь и ее семантическое описание.

$IDEF = (Gr, GL)$ , (2) где  $Gr$  – ориентированный граф;  $GL$  – глоссарий модели бизнес-процесса.

$$(3) Gr = (V, A),$$

где  $V$  – непустое множество вершин – входов и выходов бизнес-процессов;  $A$  – множество различных ребер – функций преобразования входных ресурсов в выходные.

Исследуем свойство отношения «вход-выход» между элементами диаграмм (рис. 5).

В этом случае вершинами графа выступают ресурсы (входы и выходы функциональных блоков), а стрелками – функции преобразования входов в выходы [15].

Положим, что вершины графа являются объектами категории, а стрелки – морфизмами. Так как функциональное моделирование строится на принципе декомпозиции, представление будет обладать следующими свойствами.

Ассоциативность:  $(A11 \cdot A12) \cdot A13 \equiv A11 \cdot (A12 \cdot A13)$ , т.е. возможна вариативность при декомпозиции, но результат не зависит от того, какие именно функциональные блоки будут декомпозированы.

Не коммутативность:  $A1 \neq A12 \cdot A11$ , т.е. результат выполнения процесса зависит от последовательности дочерних процессов.

Ресурсы могут быть как входами, так и выходами функциональных блоков.

Вершина графа модели в нотации *IDEFO* имеет уникальный иерархический идентификатор, следовательно, элементы этой диаграммы являются идентифицируемыми, а связи прослеживаемыми. Представим процесс извлечения данных информационного пространства для интеллектуального анализа в соответствии с уровнями иерархии Хомского (рис. 6).

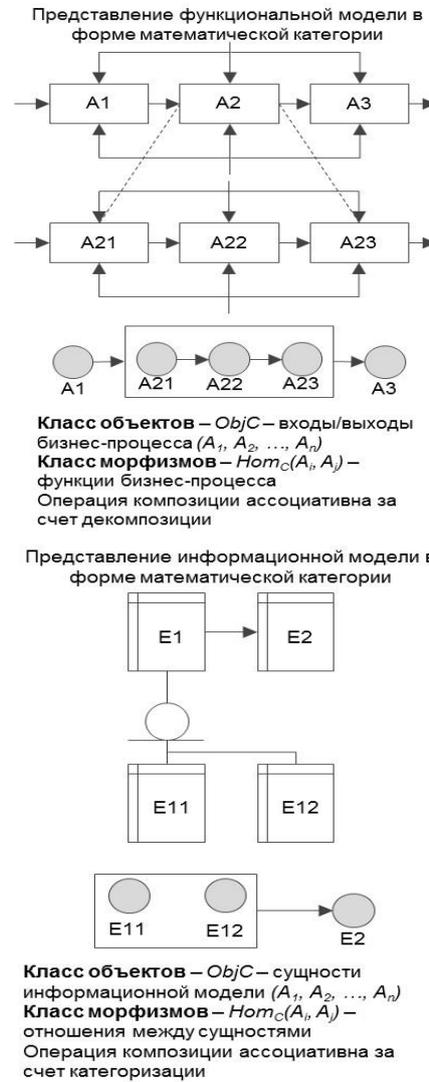


Рис. 5. Организационно-функциональная схема процессов и данных в форме категорий.



Рис. 6. Структурирование контента с уровнями иерархии Хомского.

Для формирования критериев структурирования контента [15] и извлечения данных из моделей бизнес-процессов необходимо выделить бизнес-правила, описать их в атрибутивной форме и представить в форме условий.

Описание бизнес-процесса на естественном языке, представляющее модель процесса, соотносится с нулевым уровнем иерархии Хомского. К первому уровню – контекстно-независимым языкам – можно отнести бизнес-правила, т.е. описание бизнес-процесса на языке конкретной предметной области, например, в форме чертежей или последовательности конструкторско-технологических операций.

Переход от нулевого уровня к первому выполняется за счет описания процесса в терминах конкретной предметной области, с применением конкретного «жаргона». Это позволяет сократить алфавит, упростить синтаксис, но в то же время и уточнить семантику языка.

С уровнем контекстно-свободных языков соотносится атрибутивная модель процесса, определяющая описание моделируемого процесса в виде моделей бизнес-процессов.

Переход от контекстно-зависимых к контекстно-свободным языкам выполняется за счет моделирования бизнес-процесса с применением инструментов структурного или объектно-ориентированного подхода. Бизнес-процесс, представленный в форме структурной или объектной модели, использует алфавит и синтаксис конкретного языка моделирования, что описывает процесс независимо от предметной области.

Правила по структурированию контента можно соотнести с третьим уровнем иерархии – уровнем инструкций. По мере перехода на более низкий уровень иерархии происходит сокращение (конкретизация) синтаксиса языка – описание процесса становится более конкретным, смысл правил сужается до конкретных инструкций. Переход от контекстно-свободных языков к регулярным выполняется при программировании и реализации бизнес-процесса с использованием автоматизированных систем и высокоуровневых языков программирования.

Каждое из множеств языков является подмножеством предыдущего множества, что обеспечивает передачу семантики между уровнями иерархии. Однако за счет сокращения синтаксиса может быть потеряна некоторая информация и внесены неточности при реализации.

Причинно-следственные связи как внутри объектов, так и между объектами в исследуемой предметной области определяют объект как систему и среду, как множество его состояний, связываемых процессами во времени. Сохранение этих объективных свойств, является необходимым условием адекватности системного описания ИПО.

В процессе системного описания (извлечения знаний) ИПО и его интерпретации, основными инструментами являются предметно - ориентированные терминальные метаязыки (ПОТМЯ), формируемые на основе естественного языка в контексте предметной области в соответствии с классификацией Хомского.

Представление предметной области в форме категорий (метаданных, данных и знаний) дает возможность рассматривать и оперировать его объектами независимо от их внутренней структуры. Такое представление позволяет выявлять общие закономерности в поведении разнородных систем.

Возможна дальнейшая формализация данного описания до автоматизированного генерирования соответствующего программного обеспечения.

## ПРИМЕР 2. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ СИСТЕМНОЕ ОПИСАНИЕ ИПО ПОЛУНАТУРНОГО КОМПЛЕКСНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГТД И ЕГО СИСТЕМ

На этапе концептуального описания с применением Естественного метаязыка (ЕЯ); Графического метаязыка (ГЯ); Графоаналитического метаязыка (ГАЯ); Математического метаязыка (МЯ); метаязыков программирования (ПЯ) определяются главные задачи, требующие решения в плане данной проблемы:

обеспечение адекватности структуры комплексной модели ГТД и его систем реальной силовой установке;

технология комплексного моделирования системы «ГТД + *FADEC*» с учетом отказов в составе полунатурного моделирующего комплекса (ПМК);

методика полунатурного исследования ГТД при системных отказах.

Современная концепция системного моделирования основных этапов ЖЦ разработки ГТД и его систем класса *FADEC* [16-26] является инструментальным средством для создания полунатурных моделирующих стендов и комплексов (ПМК). Современная концепция полунатурного моделирующего комплекса (ПМК) предусматривает два уровня моделирования. Нижний уровень – это полунатурные модели «ГТД + *FADEC*» (ГТД и его системы – математическая модель реального времени, *FADEC* – натуральный блок). Верхний уровень составляют информационные модели самолетных систем, связанных с *FADEC* по каналам информационного обмена, при этом их линии связи – это физические модели реальных. Наличие в составе ПМК системы имитации отказов линий делает его наиболее целесообразным инструментальным средством для полунатурного исследования комплексной модели «двигатель + *FADEC*» при системных отказах. Структура ПМК показана на рис. 2.

Комплексное моделирование авиационной газотурбинной силовой установки при штатной и «нештатной» работе отдельных ее систем и подсистем предполагает обеспечение адекватности модели ГТД и его систем.

Обеспечение адекватности структуры полунатурной комплексной модели «ГТД + *FADEC*»

Основным условием адекватности структуры полунатурной комплексной модели «двигатель + *FADEC*» в первую очередь является ее «полнота» – соответствие реальной силовой установке по количеству моделируемых систем, функциональных взаимодействий систем и подсистем, а также информационных и энергетических связей. К традиционной модели ГТД необходимо добавить модели систем, обеспечивающих его функционирование, а именно следующие системы]: автоматического управления и контроля (в составе ПМК – это натуральный блок *FADEC*); топливные; диагностики; пусковые; воздушные; смазки и суфлирования; гидравлические; дренажные.

Модель каждой из указанных систем в ПМК должна представлять собой комбинацию физических моделей соответствующих датчиков и исполнительных механизмов *FADEC* и математической (линейной, кусочно-линейной) модели гидродневмомеханической исполнительской части в реальном времени. Для комплексной модели ГТД и его систем необходимо иметь набор моделей, соответствующих трем состояниям:

нормальному («штатному») функционированию;

отказным ситуациям;

реконфигурации системы и работе на безопасном режиме.

Для газоздушного тракта (ГВТ) ГТД к моделируемым отказным ситуациям относятся:

«помпаж» компрессора;

«нерозжиг» основной камеры сгорания;  
погасание основной камеры сгорания;  
«нерозжиг» форсажной камеры сгорания;  
погасание форсажной камеры сгорания;  
открытие (закрытие) сопла на безфорсажных и форсажных режимах;  
другие.

Перечисленные отказы могут сочетаться друг с другом в различных комбинациях и временной последовательности. Это может происходить на статических и переходных режимах работы двигателя.

Также должен быть определен перечень отказных ситуаций и для каждой из систем ГТД. Состав комплексной модели ГТД и его систем для реализации в ПМК приводится в таблице.

Технология построения адекватной структурной модели ГТД и его систем.

1. Структурную модель и технологию построения ГТД и его систем в рамках функционального моделирования целесообразно представить на трех уровнях:

1 уровень: схемы агрегатирования, спецификации (в графических средах *3D*, *2D*, *1D*- представления);

2 уровень: модели взаимодействия подсистем (в графических средах *2D*, *1D*-представления);

3 уровень: схемы отдельных подсистем (в средах *2D*, *1D*-представления).

2. С другой стороны, методы системной инженерии [8], которые реализуются *CALS*-технологиями и стандартами качества менеджмента, в том числе и в производственных системах с полным циклом (проектирование + производство) предполагают переход от функционального моделирования и управления к процессному. Это накладывает соответствующие требования к определению структур процессов моделирования, проектирования, испытания и других производственных процессов. Построение таких процессных моделей моделирования и исследования функционирования систем контроля и диагностики для ГТД требует новых методологических разработок. В таких системах должны соблюдаться иерархия организации системы, состоящей из подсистем. Это позволит создавать метамоделли с сетевой структурой, где будут объединены различные структуры.

Для этого предполагается разработать 2 класса моделей:

модели отдельных подсистем (*3D*, *2D*, *1D*-представлений);

модели объединенных подсистем управления, контроля и реконфигурации (*3D*, *2D*, *1D*-представлений).

Для *3D* графики и моделирования могут быть использованы программы *AutoCAD*, *LMS Virtual.Lab* и др.

Пример *3D*-представления схемы агрегатирования ГТД представлен на рис. 7.

3. Анализ известных организационных систем эксплуатации и ремонта показывает, что объективно существуют процессы контроля и диагностики отдельных подсистем ГТД, в которых реализуются процессы «сверху вниз», то есть от анализа дефекта, зафиксированного на верхнем уровне, до обнаружения и локализации в конкретном конструктивно сменном блоке (КСБ) и обнаружении отказов и локализации КСБ (локальной системой встроенного контроля) и анализа их воздействий на уровень системы. Отметим, что эти процессы обеспечиваются функциональной организацией системы и в явной форме не контролируются.

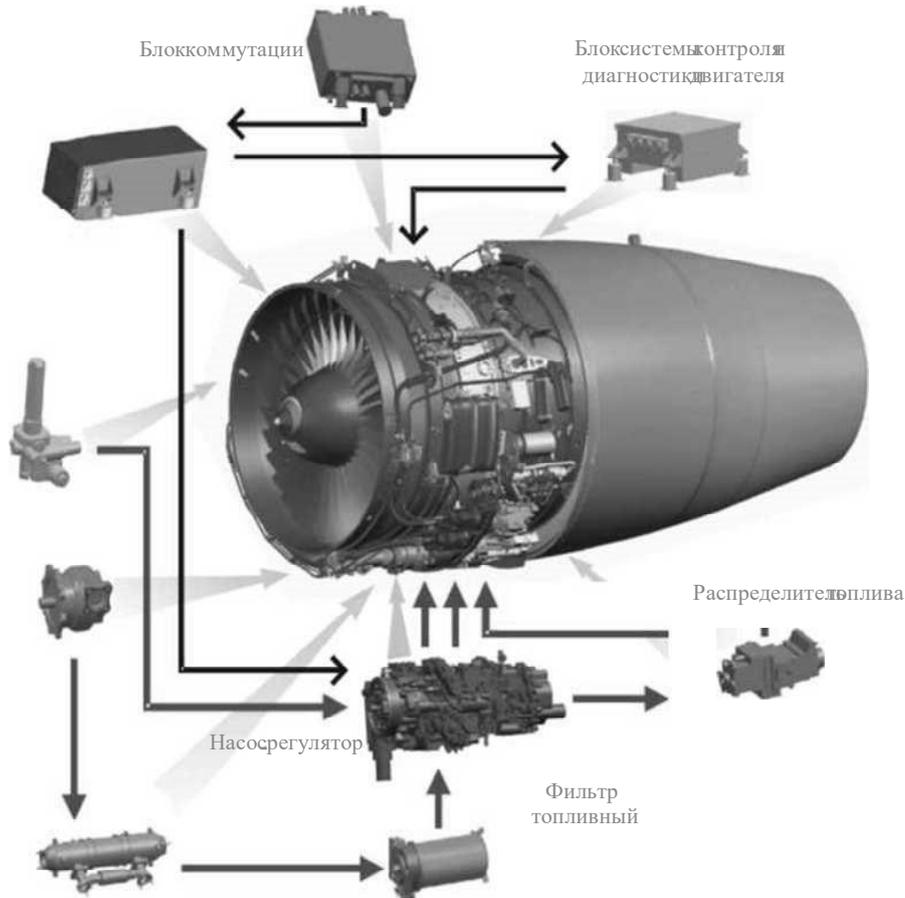


Рис. 7. FADEC ГТД.

Высокая степень информатизации и компьютеризации систем контроля и диагностики позволяют часть задач, которые решались наземными станциями обслуживания перенести на уровень борта самолета [18-26]. В этом случае требуется построение двух классов процессов:

- процессы создания систем управления и диагностики двигателя и его систем;
- процессы реализации контроля и диагностики в бортовых информационных и диагностических комплексах с оптимальным распределением между наземными и бортовыми системами.

Рассмотренный подход позволяет строить модели процессов, отвечающих условиям «прослеживаемости» (определение причин и следствий состояний отдельных систем и подсистем) и соответствия требованиям стандартов ИСО 9000, что позволяет решать обратную задачу при контроле и диагностике: имея факт отказа проследить влияние его на системы и подсистемы.

2. Пример реализации комплексной модели ГТД (ТРДДФ) и его систем как объектов управления, контроля и диагностики на ПМК.

Комплекс математических моделей ГТД как объекта управления, реализуемые в форме ЦД в программных комплексах типа УКП, Двиг, ГазТурбо, Град, *GTE*, *LabView* и др.

Базовая модель – поэлементная нелинейная термогазодинамическая [18, 20-24], – моделирующая работу ГТД на штатных режимах в диапазоне применения, например, в виде

$$\begin{aligned}\bar{X} &= f(\bar{X}, \bar{V}, \bar{U}); \\ \bar{V} &= \phi(\bar{X}, \bar{V}, \bar{U});\end{aligned}$$

где  $\bar{X} = [n_i \dots]^T$  – вектор переменных состояния;

$\bar{V} = [M, H, N_{ny}, Nom\bar{b}]^T$  – вектор внешних воздействий;

$\bar{U} = [G_T, \alpha_{на}, G_{отб}, F_{рс}, \dots]^T$  – вектор управления;

$\bar{f}, \bar{\phi}$  – нелинейные операторы;

$\bar{Y}$  – вектор выходных координат.

1) кусочно-линейная всережимная модель ГТД – получают из базовой модели по известной методике [23];

2) специальные кусочно-линейные модели ГТД:

- запуска двигателя, в том числе модель процесса зажигания;
- запуска форсажной камеры, в том числе модель процесса воспламенения;

3) кусочно-линейные модели ГТД для отказных ситуаций:

- «помпаж» компрессора;
  - «нерозжиг» основной камеры сгорания;
  - погасание основной камеры сгорания;
  - «нерозжиг» форсажной камеры сгорания; • погасание форсажной камеры сгорания;
  - несанкционированное открытие (закрытие) створок реактивного сопла на безфорсажных и форсажных режимах.
- 4) модели систем:

• ММ топливной системы основного и форсажного контуров: насосы и дозаторы, приводы механизации турбокомпрессора, реактивного сопла, коллекторы форсунок, топливные фильтры и др.;

• пусковая система: стартер, система подачи топлива в камеру сгорания, система зажигания, система механизации турбокомпрессора, система электропитания агрегатов;

- системы смазки и суфлирования;
- воздушной системы;
- гидравлической системы реактивного сопла;
- дренажной системы.

Комплекс моделей ГТД и его систем как объектов контроля и диагностики.

Модели ГТД и его систем как объектов контроля и диагностики в составе ПМК предназначены для формирования условий и значений параметров, обеспечивающих включение и выключение проверяемых алгоритмов контроля и диагностики с целью проверки реакции FADEC, то есть выдачи соответствующих сообщений в информационную модель самолетных систем и (или) в модели переключения для реконфигурации. В частности, это модели и алгоритмы:

- непрерывного контроля в полете параметров и сигналов;
- контроля предельно-допустимых значений параметров по фиксированным и изменяемым, в зависимости от режимов работы двигателя, границам;
- идентификации режимов работы двигателя для учета выработки ресурса двигателя;
- подготовки данных в обеспечение наземного контроля и прогнозирования технического состояния проточной части двигателя по трендам основных параметров;
- контроля наработки двигателя на режимах ограничения и общей наработки в часах и полетных циклах;

• обработки диагностической информации для обеспечения наземного контроля выработки ресурса деталей двигателя, лимитирующих его ресурс по малоцикловой усталости и длительной прочности;

- контроля процесса запуска, останова двигателя
- контроля процесса включения, работы и выключения форсажной камеры;
- контроля параметров двигателя на соответствие нормам на взлетных режимах;
- формирования и выдачи в бортовые системы самолета обобщенных сигналов о выявленных неисправностях по двигателю и его системам.
- другие.

Состав комплексной модели ГТД и его систем приведен в таблице. Концепция аппаратного, алгоритмического и программного обеспечения автоматизированного комплекса информационного и полунатурного моделирования систем FADEC на всех этапах жизненного цикла

рассмотрены в [2]. Аппаратная часть ПМК (процессоры, память, преобразователи, коммутационные панели, имитаторы датчиков, исполнительных механизмов, отказов линий связи и др.) собрана из стандартного промышленного компьютерного оборудования, ориентированного на работу в реальном времени. Модели двигателя и его систем в исправном состоянии и модели отказов создаются средствами визуального моделирования типа *LabView* и *VisSim*. Данная система обеспечивает дополнительные возможности:

- обработку алгоритмов контроля и диагностики силовой установки совместно с моделями имитации отказов двигателя и его систем – элементов ГТД, механизации турбокомпрессора, топливных, масляных и других систем и агрегатов;
- получение данных для оптимизации технических и алгоритмических решений контроля, диагностики и реконфигурации *FADEC*.

На рис. 8 приведена структурная схема ПМК, позволяющая реализовать комплексную модель ГТД и его систем в составе многодвигательной силовой установки самолета.

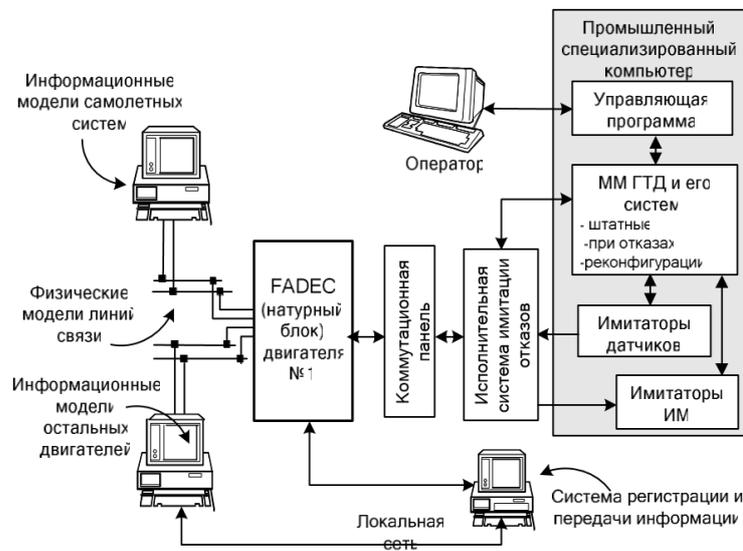


Рис. 8. Структурная схема ПМК, реализующего комплексную модель ГТД и его систем в составе многодвигательной силовой установки самолета.

#### Полунатурное моделирование отказов ГТД и его систем.

Задачей системы полунатурного моделирование отказов ГТД и его систем в составе КПМ является моделирование как одиночных, так и «следственных» отказов, то есть автоматического включения отказов двигателя, его систем, датчиков и исполнительных механизмов в заданной последовательности. Динамика ГТД и его систем в случае имитации  $i$ -го отказа моделируется с помощью дифференциального уравнения:  $x = (A + \Delta_i A)x(t) + (B + \Delta_i B)u(t)$ . Выходной сигнал определяется в следующем виде

$$x(t) = \int_0^t [(A + \Delta_i A)x(t) + (B + \Delta_i B)u(t)] dt.$$

То есть отказы двигателя и его систем моделируются путем изменения коэффициентов динамических моделей. Для внезапных отказов – это скачкообразное изменение коэффициента  $A$  на величины  $\Delta_i A$ ,  $B$  на  $\Delta_i B$ . Величина этих скачков определяется заранее по модели двигателя и его систем для каждого отказа. Например, в случае обрыва лопатки компрессора снижается КПД компрессора, что выражается в соответствующем изменении коэффициентов  $\Delta_i A$  и  $\Delta_i B$  в динамической модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны подход и методология полунатурного исследования ГТД и его систем при отказах, основанные на построении комплекса моделей, соответствующих нормальному функционированию, наличию отказов и режимам реконфигурации системы управления, контроля и диагностики (FADEC).

Рассмотренный подход позволяет обеспечить выполнение условий «прослеживаемости» (определение причин и следствий состояний отдельных систем и подсистем ГТД), что позволяет решать обратную задачу при контроле и диагностике: имея факт отказа проследить влияние его на системы и подсистемы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Системная** модель [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ngpedia.ru/id159641p1.html> (дата обращения: 09.08.2023). [ (2017, Gen. 23). System model [Online]. Available: <http://www.ngpedia.ru/id159641p1.html> ]
2. **Фролов И. Т.** Введение в философию. М.: Республика, 2003. 623 с. [ I. T. Frolov, Introduction to Philosophy, (in Russian). M.: Respublika, 2003.]
3. **Аскин Я. Ф.** Философский детерминизм и научное познание. М.: Мысль, 1977. 188 с. [ Ia. F. Askin, The philosophical determinism and scientific knowledge, (in Russian). M.: Mysl', 1977.]
4. **Куликов Г. Г., Набатов А. Н., Речкалов А. В.** Проектирование экспертных систем на основе системного моделирования. Уфа: УГАТУ, 1999. 223 с. [ G. G. Kulikov, A. N. Nabatov, A. V. Rechkalov, Design of expert systems based on system modeling, (in Russian). Ufa: UGATU, 1999.]
5. **Куликов Г. Г., Набатов А. Н., Речкалов А. В.** Автоматизированное проектирование информационноуправляющих систем. Системное моделирование предметной области. Уфа: УГАТУ, 2003. 103 с. [G. G. Kulikov, A. N. Nabatov, A. V. Rechkalov, Computeraided design of management information systems. System modeling domain, (in Russian). Ufa: UGATU, 2003.]
6. **Куликов Г. Г., Конев К. А., Суворова В. А.** Теория систем и системный анализ. Уфа: УГАТУ, 2012. 185 с. [G. G. Kulikov, K. A. Konev, V. A. Suvorova. Systems theory and system analysis, (in Russian). Ufa: UGATU, 2012.]
7. **Общая** теория систем [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Общая\\_теория\\_систем](https://ru.wikipedia.org/wiki/Общая_теория_систем) (дата обращения: 09.08.2023). [ (2017, Gen. 23). Subject-oriented language [Online]. Available: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>]
8. **Предметно-ориентированный** язык [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Предметноориентированный\\_язык](https://ru.wikipedia.org/wiki/Предметноориентированный_язык) (дата обращения: 09.08.2023). [ (2017, Gen. 23). Subject-oriented language [Online]. Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Предметноориентированный\\_язык.](https://ru.wikipedia.org/wiki/Предметноориентированный_язык)]
9. **Теория** категорий [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Теория\\_категорий](https://ru.wikipedia.org/wiki/Теория_категорий) (дата обращения: 23.01.2017). [ (2017, Gen. 23). Theory of categories [Online]. Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Теория\\_категорий](https://ru.wikipedia.org/wiki/Теория_категорий)]
10. **Формальная** семантика [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Формальная\\_семантика](https://ru.wikipedia.org/wiki/Формальная_семантика) (дата обращения: 09.08.2023). [ (2017, Gen. 23). Subjectoriented language [Online]. Available: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Формальная\\_семантика.](https://ru.wikipedia.org/wiki/Формальная_семантика)]
11. **Волкова И. А., Вылиток А. А., Руденко Т. В.** Формальные грамматики и языки. Элементы теории трансляции. М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М. В. Ломоносова, 2009. 115 с. [I. A. Volkova, A. A. Vylitok, T. V. Rudenko, Formal grammars and languages. Elements of the theory of translation, (in Russian). M.: Izdatel'skij otdel fakul'teta VMiK MGU im. M. V. Lomonosova, 2009.]
12. **Bartosz Milewski.** Category Theory [Электронный ресурс]. URL: <https://bartozsmilewski.com/category/category-theory/> (дата обращения: 23.01.2017). [ (2017, Gen. 23). Category Theory [Online]. Available: [https://bartozsmilewski.com/category/category-theory/.](https://bartozsmilewski.com/category/category-theory/)]
13. **Хопкрофт Д., Мотвани Р., Ульман Д.** Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Вильямс, 2002. 528 с. [ D. Khopkroft, R. Motvani, D. Ul'man, Introduction to Automata Theory, Languages and Computation, (in Russian). M.: Vil'iams, 2002.]
14. **Куликов Г. Г., Шилина М. А., Старцев Г. В., Бармин А. А.** Структурирование контента информационного пространства технического университета с использованием процессного подхода и семантической идентификации / Куликов Г. Г. и др. // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 4 (65). С. 115–124. [ G. G. Kulikov, M. A. Shilina, G. V. Startsev, A. A. Barmin, "Structuring content Technical University information space using a process approach and semantic identification" (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 18, no. 4 (65), pp. 115-124, 2014.]
15. **Куликов Г. Г., Бармин А. А., Шилина М. А., Шамиданов Д. Г.** Описание бизнес-процессов в соответствии с иерархией Хомского / Куликов Г. Г. и др. // Информационные технологии и системы: тр. Пятой Междунар. науч. конф., (Банное. Россия, 24–28 февр. 2016). Челябинск: Издво Челяб. гос. ун-та, 2016. С. 249–254. [ G. G. Kulikov, A. A. Barmin, M. A. Shilina, D. G. Shamidanov, "Description of business processes in accordance with the Chomsky hierarchy", in Informatsionnye tekhnologii i sistemy (ITIS' 2016), vol. 1, pp. 249-254, 2016.]
16. **Логиновский О.В., Ризванов К.А., Куликов Г.Г.** Применение ВІ-принципов в гейтовой системе управления проектом создания цифрового двойника ГТД // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, No 1. С. 16–26. DOI: 10.14529/ctcr200102. [ O.V.Loginovskiy, K.A.Rizvanov, G.G.Kulikov, "Application of VI-principles in

the gate project management system to create a digital twin of the GTE”, (in Russian), in Vestnik YuUrGU. Seriya “Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika”, vol. 20, no. 1, pp. 16-26, 2020. DOI: 10.14529/ctcr200102.]

17. **Baklacioglu T., Turan O., Aydin H.** Dynamic modeling of exergy efficiency of turboprop engine components using hybrid genetic algorithm-artificial neural networks // Energy. 2015. Vol. 86. Pp. 709-721. [T. Baklacioglu, O. Turan, H. Aydin, “Dynamic modeling of exergy efficiency of turboprop engine components using hybrid genetic algorithm-artificial neural networks”, in Energy, vol. 86, pp. 709-721, 2015.]

18. **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.

19. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. М.: Машиностроение, 2008. Т. 5. 187 с.

20. **Комплекс** информационного и полунатурного моделирования для исследования систем автоматического управления и контроля многодвигательных силовых установок при их эксплуатации по состоянию / В.С. Фа-тиков [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. № 2. С. 155–160.

21. **Интеллектуальная система** запуска для нового поколения авиационных ГТД / Е. В. Распопов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 2(20). С. 153–157.

22. **Полунатурное** моделирование отказов ГТД для испытаний систем контроля и диагностики двигателей / В. Ю. Арьков [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. № 7(15). С. 167–173.

23. **Dynamic Modeling Of Gas Turbines** / G. Kulikov [et al]. Springer-Verlag, New York, 2004, 309 p.

24. **Intelligent** information technologies for control and diagnostics of gas turbine engines and their systems at all stages of their life cycle / G. Kulikov [et al]. // Proc. AMETMAS-NOE Int. Workshop on Problems of Technology Transfer, Ufa, 1999. P. 121–124.

25. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005** Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.

26. **Способ** полунатурных испытаний систем автоматического управления и контроля газотурбинных двигателей и стенд для его реализации / Г. Г. Куликов [и др.]. Пат. 2340883 Российская Федерация, МПК G01M 15/14. №2007118610/06, заявл. 18.05.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. №34; Приор. 18.05.2007, №2007118610 (Российская Федерация). Введ. с 10.12.2008 по 18.05.2027

#### ОБ АВТОРАХ

**КУЛИКОВ Геннадий Григорьевич**, д-р технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления УУНИТ.

**РИЗВАНОВ Константин Анварович**, канд. технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления УУНИТ.

**ИВАНОВ Артем Викторович**, канд. технических наук, АО «НПП «Аэросила».

**ШУКАЛЮК Вадим Андреевич**, аспирант кафедры АСУ УУНИТ, инженер-конструктор АО «НПП «Аэросила».

#### METADATA

**Title:** Designing semantic formal models of objects of the subject area under study based on the categories of dialectics and set-theoretic methods.

**Authors:** G.G. Kulikov<sup>1</sup>, K.A. Rizvanov<sup>2</sup>, A.V. Ivanov<sup>3</sup>, V.A. Shukaluk<sup>4</sup>

#### Affiliation:

<sup>1,2,4</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Ufa, Russia.

<sup>3,4</sup> JSC "NPP "Aerosila", Russia.

**Email:** <sup>1</sup> gennadyg\_98@yahoo.com

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 3 (101), pp. 82-98, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** A system-linguistic approach to the design of formal models of the subject area under study (IPO) based on the categories of dialectics and set-theoretic methods is considered. It is shown that this approach makes it possible to provide the required level of formalization of digital counterparts of real and virtual objects with the storage of their cause-and-effect relationships. The logic of the representation of the IPO CD in the Minkowski space-time basis is considered. It is shown that the correspondence of the applied subject-oriented formal languages for the construction of the IPO CD is carried out in the basis of the levels of the hierarchy of Chomsky generators. An example of the application of this approach to the construction of the semantic metastructure of the CD GTE (IPO) in the cybernetic aspect is given.

**Key words:** system approach, category theory, category of dialectics, causality principle, terminal metalanguages

#### About authors:

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

**RIZVANOV, Konstantin Anvarovich**, Associate Prof., Candidate of technical sciences.

**IVANOV Artem Viktorovich**, Candidate of Technical Sciences, JSC "NPP "Aerosila".

**SHUKALUK Vadim Andreevich**, Postgraduate student, Department of Automated Control Systems (UUST), design engineer, JSC "NPP "Aerosila".