

# МЕТОД ФОРМАЛЬНОГО ОНТОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДОСТАТОЧНОГО РАЗНООБРАЗИЯ СТРУКТУРНЫХ СВЯЗЕЙ

**В.В. Антонов<sup>1</sup>, А.П. Бельтюков<sup>2</sup>, Г.Г. Куликов<sup>3</sup>, Л.Е. Родионова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия,

<sup>2</sup> Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Россия,

<sup>3</sup> АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа, Россия

Рассмотрен прикладной подход к решению проблем информатики в рамках декартово замкнутых категорий для обеспечения достаточного разнообразия структурных связей при проектировании программного аналитического комплекса.

Показывается, что применение методов конструктивных онтологий (формальных семантических моделей) для описания предметной области как исследуемого объекта позволяет производить автоматическое или автоматизированное (человеко-машинное) построение решения и самой задачи исследования. В теории онтология строится таким образом, что она решает эти задачи из условия непротиворечивости.

В теоретико-категориальном подходе в качестве предметных областей рассматриваются абстрактные объекты, внутренняя структура которых изначально не указана. С точки зрения программирования, такая категория объектов рассматривается не как набор возможных значений в теоретико-множественном подходе, а как интерфейс между программами, позволяющий выполнять их композицию. Связь с теоретико-множественной моделью заключается в том, что упомянутые интерфейсы используются для передачи данных, идентифицирующих (кодирующих) элементы наборов, соответствующих объектам.

Доступные и создаваемые на таких языках программы являются морфизмами, связывающими некоторые объекты. Действие морфизма не ограничивается отображением значений из исходного объекта в конечный, как в функциональном программировании. Это может быть сложное взаимодействие с передачей сигналов, данных и программ в противоположных направлениях. Например, программа может сделать несколько попыток получить результат, обрабатывая сигналы об ошибках, возникших в результате предыдущих попыток.

Рассмотренный подход предлагается использовать для стандартизации автоматического и автоматизированного решения конструктивных задач.

*Ключевые слова:* декартово замкнутая категория, формальная модель, иерархия Хомского, программный аналитический комплекс, формальная онтологическая модель, системная инженерия.

## Введение

В настоящее время в соответствии с концепцией Индустрия 4.0 современные предприятия стремятся строить цифровое производство, применяя «умные» технологии. Управление происходит на основе комплексных знаний, держателями которых, например, являются университеты и предприятия, соединение таких знаний в итоге приводит к созданию интеллектуальной образовательно-производственной конструктивной логической структуры.

Концепция «Индустрия 4.0» может быть разделена на три составляющие: цифровизацию производственных объектов и виртуальных цепочек оценки стоимости, цифровизацию продуктов и услуг, цифровые бизнес-модели и доступ клиентов. Проводя дальнейшее обобщение, приходим к понятиям: большие данные (Big Data); технологии искусственного интеллекта; а также системы распределенного реестра; современные производственные технологии; квантовые вычисления; промышленный интернет; элементы робототехники и сенсорики; технологии беспроводной связи; технологии дополненной и виртуальной реальности. Так, проблема Big Data для промышленных предприятий обусловлена накоплением достаточно большого объема разнородных, слабо формализованных данных, их идентификацией (кодированием) и дальнейшим их использованием. При этом совокупность отношений между ними может быть рассмотрена в виде дополнительных объектов Big Data.

Рассматривая отношения между информационными объектами, дополняя модель предметной области виртуальными объектами, приходим к возможности построения символьной (терминальной) модели хранилища данных. Получаем отношения между виртуальными объектами и реальными объектами, которые выражаются символьной моделью хранилища данных, определяющие структуру и отношения в терминах теории категорий [1].

Приходим к построению символьного (терминального) пространства. Для этого может быть применен метод семантического дифференциала [2], который является комбинацией метода контролируемых (направленных) ассоциаций и процедур шкалирования. В зависимости от предметной области отношения между объектами могут быть оценены по ряду биполярных, а в некоторых случаях – униполярных шкал. При этом применение биполярных шкал позволяет точнее зафиксировать смысл понятий, а использование униполярных шкал – выделить требуемые субъективные варианты смысловых оттенков. Очевидно, что получаемые оценки понятий коррелирует друг с другом. Это открывает возможность объединения групп связанных друг с другом шкал в факторы-категории. Таким образом, построение семантического пространства является переходом от базиса большей размерности к базису меньшей размерности. При геометрическом представлении семантического пространства категории-факторы будут выступать координатными осями  $n$ -мерного пространства (где мерность определяется числом независимых факторов), а значения объектов задаются как координатные точки внутри него. То есть можем утверждать, что семантические связи между различными шкалами остаются неизменными. Приходим к порождающим грамматикам Хомского, которые представляют собой своего рода программу, предназначенную для генерации цепочек формального языка, задаваемого этой грамматикой. Нас устраивает грамматика, в которой все возможности комбинаций классов слов следуют из исходной разбивки их на категории – категориальная грамматика.

Представление знаний об исследуемой предметной области позволяет применять формальные логические правила, графоаналитические метаязыки и правила для разработки и проектирования программных аналитических комплексов. Кроме того, метод построения иерархий Хомского на базе категориального подхода с применением математических теоретико-множественных моделей с использованием требований системной инженерии позволяет сформировать границы между семантическими и синтаксическими описаниями процессов исследуемой предметной области и функциональными модулями программного аналитического комплекса.

Открывается также возможность использования аналитики больших данных, категории информационных объектов – программных модулей обеспечивающих соединение реальных и виртуальных объектов с информационными процессами с учетом их взаимных отношений в программном аналитическом комплексе (ПАК).

Расширяется возможность обеспечения «электронной» прозрачности и в управленческих, и технологических, и других аспектах, т. е. такие структуры организации приобретают свойства открытых или полукоткрытых систем.

Технически это обеспечивается прежде всего разработкой и применением программных аналитических комплексов (ПАК), создаваемых на основе унифицированных математических и программных средств. Таким образом, в структуру создаваемого ПАК включена информация, которая в дальнейшем обеспечивает возможность проведения реинжиниринга, например, посредством замены виртуальных объектов реальными с сохранением действующих отношений.

Исследована проблема формализации и идентификации информационных объектов и поддержания их соответствия реальным объектам исследуемой предметной области, а также соответствие прослеживаемости информационных и реальных объектов параметрам для базы знаний ПАК. Для определения реальных объектов, соответствия их информационным объектам и прослеживаемости на абстрактном уровне исследуемых образовательных производственных систем применяются понятия и правила стандарта ISO/IEC/IEEE 15288 [1].

Основная задача проектирования ПАК при декомпозиции абстрактного уровня заключается в обеспечении замкнутости на нижних уровнях. Это соответствует законам, начиная с логики высказываний Аристотеля и формальной логики первого порядка. В этом случае исключаются логические противоречия при решении задач идентифицируемости и прослеживаемости информационных объектов.

Формализуем вышеизложенное семантическое представление на языке формальных систем и соответствующих им информационных технологий.

Введем некоторые пояснения. Под термином «формальная система» обычно представляют целую систему понятий. Часто для определения этих понятий используется чисто структурный подход. Он обычно заключается в том, что формальной системой называют некоторый математический объект, чаще всего – кортеж. В этом случае функционирование такого объекта становится чем-то внешним, не обязательным и вариативным. На самом деле это не так: с формальной системой связываются вполне определенные неотъемлемые функции. Приведем описание того, как строится система определений не чисто структурного, но структурно-функционального характера, используя лишь те элементы, которые требуются для проведения современного подхода к разработке информационных технологий производственно-экономического применения. Определения выстраиваются в иерархию, начиная от базовых и продвигаясь ко все более специализированным. Определения формальных систем могут быть представлены в виде приведенных ниже классов, наиболее важных с точки зрения информационных технологий.

### 1. Абстрактное понятие исчисления на основе правил логики конструктивной онтологии

Под исчислением понимается система, предназначенная для последовательного логического вывода в конструктивной онтологии одних объектов из других.

Конструктивная онтология описывает следующие сущности в соответствии с семантикой терминального языка предметной области:

- базовые объекты предметной области, в других подходах эти объекты соответствуют доменам, типам данных и т. д.,
- параметризованные семейства объектов, соответствующие реализации конструктивных свойств и отношений, при логическом подходе это соответствует предикатам, свойствам, атрибутам, отношениям между объектами,
- основные морфизмы, соответствующие программным модулям, уже доступным для решения задач в области,
- механизмы для построения новых морфизмов из доступных,
- машина логического вывода, определяющая порядок применения этих механизмов для решения конструктивных задач; в сложных случаях машина вывода может иметь физико-антропо-технический характер, то есть быть системой взаимодействующего технического оборудования, людей и природных объектов; на практике мы разделяем ее материальную часть и систему функционирования программ, с которыми мы обычно отождествляем машину логического вывода.

Предполагается, что категория замкнута относительно прямого произведения, прямой суммы и возведения в степень (экспоненцирования), что в теории логики высказываний соответствует количественному описанию понятий и их отношений. Экспоненцирование – это построение объекта, соответствующего морфизмам между двумя уже существующими объектами, то есть «обратное» преобразование существующих морфизмов в новый объект. Кроме того, требуется замкнутость относительно менее традиционных операций. Это операции параметризованного прямого суммирования и умножения. Эти операции добавлены, чтобы иметь возможность ставить и точно решать задачи, которые могут быть сформулированы с использованием языка логики предикатов.

Таким образом, чтобы использовать конструктивную онтологию, необходимо указать объекты и базовые морфизмы. Доказательство, построенное машиной вывода, автоматически переводится на обычные языки программирования. Для надежной работы система, определяющая объекты и морфизмы, требует механизма, проверяющего соответствие этих модулей и интерфейсов. Этот способ действия соответствует парадигме программирования без нижнего уровня с абстрактными типами обрабатываемых значений.

Полагаем, что для онтологического исчисления требуется область (пространство)  $S$  объектов, внутри которого осуществляется вывод. Исключениями являются базовые исчисления, например, исчисление, порождающее все слова в некотором конечном алфавите. Это исчисление само по себе порождает пространство для других исчислений.

Исчисление имеет две процедуры:

- а) процедуру  $A$ , определяющую исходные объекты («аксиомы»),
- б) процедуру  $R$ , определяющую правило, решающее, выводится ли данный объект из данного списка объектов непосредственно.

Последовательное применение процедуры  $R$  к исходным и выводимым объектам позволяет выводить все новые объекты, в чем и заключается основная функция исчисления. Аксиомы и правила по современной традиции будем объединять под термином «постулаты».

Приведем некоторые конкретизации понятия «исчисление».

Чаще всего, в силу современных традиций, принятых в области информационных технологий, под пространством  $S$  понимается множество конечных цепочек символов в некотором конечном алфавите (слов). Тем не менее это может оказаться не очень удобным, так как будет связано с излишними проблемами синтаксического анализа. Такой подход объясняется тем, что цепочки букв в линейной записи – один из основных старых традиционных способов записи информации. На современном уровне гораздо более практично в качестве пространства  $S$  выбрать что-то более структурированное: деревья, термы или правильные скобочные структуры.

Процедуры  $A$  и  $R$  в этом случае имеют обычно алгоритмический характер. Как правило, вычислительная сложность таких процедур сильно ограничена. Часто процедура  $A$  имеет вид явного списка элементов или их шаблонов. Процедура  $R$  также часто задается шаблоном вида:  $P \rightarrow C$ , где  $P$  – список шаблонов ранее полученных объектов – посылка правила, а  $C$  – шаблон непосредственно выводимого из них объекта – заключение правила. Считается, что шаблоны – это структуры, отличающиеся от объектов пространства  $S$  наличием в них особых элементов – метаварiable. Имеется специальная процедура подстановки вместо этих метаварiable объектов пространства  $S$  так, чтобы получались снова объекты пространства  $S$ . Полученные объекты и задают конкретное применение правила.

### *1.1. Двухуровневые исчисления. Синтаксический и формально-логический уровни*

Часто по традиции вместо пространства структурированных объектов рассматривается первоначально пространство слов в явно заданном алфавите. В этом пространстве предварительно выделяется подпространство «правильных» слов – «предложений» или «формул». Это делается с помощью специального предварительного «синтаксического» исчисления. По традиции такое исчисление – грамматика. Обычно эта грамматика берется из невысокого класса грамматик в иерархии Хомского. Часто достаточно бывает бесконтекстной грамматики. В более сложном случае дополнительные контекстные условия накладываются дополнительным промежуточным исчислением, которое работает подобно описанному ниже формально-логическому исчислению.

Далее считается, что грамматика задавала некоторую дополнительную структуру на правильных цепочках символов. Например, теперь можно считать, что в предложениях расставлены специальные скобки, ограничивающие синтаксические конструкции. Тогда работа постулатов существенно упрощается.

Обычно такой подход используется для задания формальных логических систем с последующей возможностью их содержательной интерпретации.

Иногда исчисление осложняется тем, что посылкой правила является не предложение, а цельный вспомогательный вывод (например, цепочка промежуточных предложений) одних предложений из других. Такой подход называется «естественным логическим выводом» на том основании, что так иногда рассуждает человек.

Интерпретация формальных логических систем также может иметь формальный характер: это формальная алгебра или формальная алгебраическая система, которые характеризуются наличием формального носителя – множества предметов и заданных на этих предметах функциях и отношениях.

### *1.2. Дополнительная оснастка формальных систем*

Формальная система может быть снабжена алгоритмическими процедурами вывода, которые позволяют определить, выводим ли заданный объект, и построить цепочку действий, приводящих к его выводу.

При некоторых интерпретациях, называемых конструктивными, с каждым предложением формальной системы связывается некоторая содержательная задача (чаще всего задача информационного характера), а цепочкам вывода соответствуют процедуры порождения алгоритмов, решающих эти задачи.

Таким образом, понятие «формальная система» является целым комплексом понятий, в котором следует определить адекватное место.

С учетом выше приведенного, применяя представленный класс 2, используем понятие формальная система как совокупность следующих компонентов [3, 4]:

$$ФС = \langle G, R, O \rangle,$$

где ФС – формальная система;  $G$  – множество базовых элементов;  $R$  – совокупность правил (предикаты на множестве базовых элементов);  $O$  – множество операций (синтаксические правила построения слов и формул – алгебра).

Формальная система отличается свойством автономности, при правильной организации формальной системы возможно самостоятельное формирование выводов, которые определяются на основании правил и множества операций, таким образом, если  $O$  – пустое множество, то формальная система вырождается в системную модель (СМ). Если  $R(G)$  является пустым множеством, то получаем формальную алгебру. Если предикатное множество определено логикой высказываний или формальной логикой первого порядка и оно декартово замкнуто, то данная модель непротиворечива по структуре относительно логики первого порядка, так как помимо формальной логики имеет место логика второго порядка, или логика Гегеля. Здесь идентификаторы первого порядка в течение времени не изменяются. А при логике второго порядка информационные объекты могут меняться.

Данную теорию рассмотрим на примере проектирования и разработки ПАК управления кадровым резервом машиностроительного предприятия, управления производственными и технологическими процессами нефтегазовой отрасли и управления учебным процессом университета.

На сегодняшний день существует большое количество как российских, так и зарубежных программных систем, реализующих автоматизированную обработку производственной информации [5], и в частности процессов по управлению кадровым резервом, например «1С: Зарплата и управление персоналом 8», «БОСС-Кадровик, Компас: Управление персоналом», «RB HR & Payroll – управление кадрами и зарплата» и другие.

Для автоматизации производственных и технологических процессов применяются программные средства, такие как ИС «ОКО», ПС «ЕСРФ», НПК «Альфа». Для управления учебным процессом вуза: web-портал кафедры АСУ, «1С: Университет ПРОФ», ИС «Orgflow-ВУЗ», «Галактика. Управление вузом», управление обучением система Moodle, LMS Blackboard Learn.

Таким образом, становится актуальным проектирование и разработка программных аналитических комплексов, которые могут быть использованы большими компаниями, решающими задачи управления, показатели которых, определяют в большей степени критерии эффективности. В результате проведенного анализа определяется проблемное поле исследования – модели и методы проектирования ПАК для организации интеграции программ и программных систем, а также инструментарию их представления (последовательности применения ряда метаязыков: естественного языка, метаязыка теории множеств и категорий множеств). Структура самих моделей – вербальных, математических с различными логическими ограничениями в виде формальных графоаналитических языков высокоуровневого программирования (программирование, моделирование), языков BPMN, а также структура программирования и реализации, отвечающих требованиям кроссплатформенного программирования в средах web-порталов, интранет, интернет и др.

Таким образом, применение теории множеств и категорий рассматривается как один из способов формализации этих подходов.

## 2. Построение формальной модели предметной области деятельности предприятия

Рассматривая отношения между информационными объектами, выделяя виртуальные и реальные объекты, приходим к нахождению возможности построения символьной модели хранилища данных. Получаем отношения между виртуальными объектами и реальными объектами, которые выражаются символьной моделью хранилища данных и определяют структуру; отношения представлены в терминах теории категорий.

Представление знаний об исследуемой предметной области позволяет применять формализованные формальные логические свойства, графо-аналитические метаязыки и правила для разработки и проектирования программных аналитических комплексов.

Метод построения иерархий Хомского на базе категорийного подхода с применением математических теоретико-множественных моделей, с использованием требований системной инже-

нерии позволяет сформировать границы между семантическими и синтаксическими описаниями процессов исследуемой предметной области и функциональными модулями программного аналитического комплекса [6–10]. При этом формирование семантической модели смещается в область формализации логических отношений. Применяя системный подход для определения границ исследуемой предметной области, определяем цель (семантическая мера), далее точку зрения. Очевидно, что происходит сужение предметной области. Далее определяем функциональное содержание предметной области (контекстная диаграмма), при этом взаимодействие с внешней средой происходит через вход, выход, управление (ограничения) и механизм (ресурсы) (рис. 1).

Согласно классификации формальных грамматик Н. Хомского приходим к возможности классификации систем на четыре уровня [11, 12]:

- 0 – общая система (неограниченная);
- 1 – описание системы на метаязыке (контекстно-зависимая);
- 2 – расширяет понятие семантики, показывая взаимодействие с внешней средой, система моделируется и создается с помощью case-средств и высокоуровневых языков программирования (контекстно-свободная);
- 3 – полностью формализованная система, которая применяется при создании компиляторов низкого уровня, прописан синтаксис, но семантика простая, описывается набором слов и отношением между этими словами (автоматная).

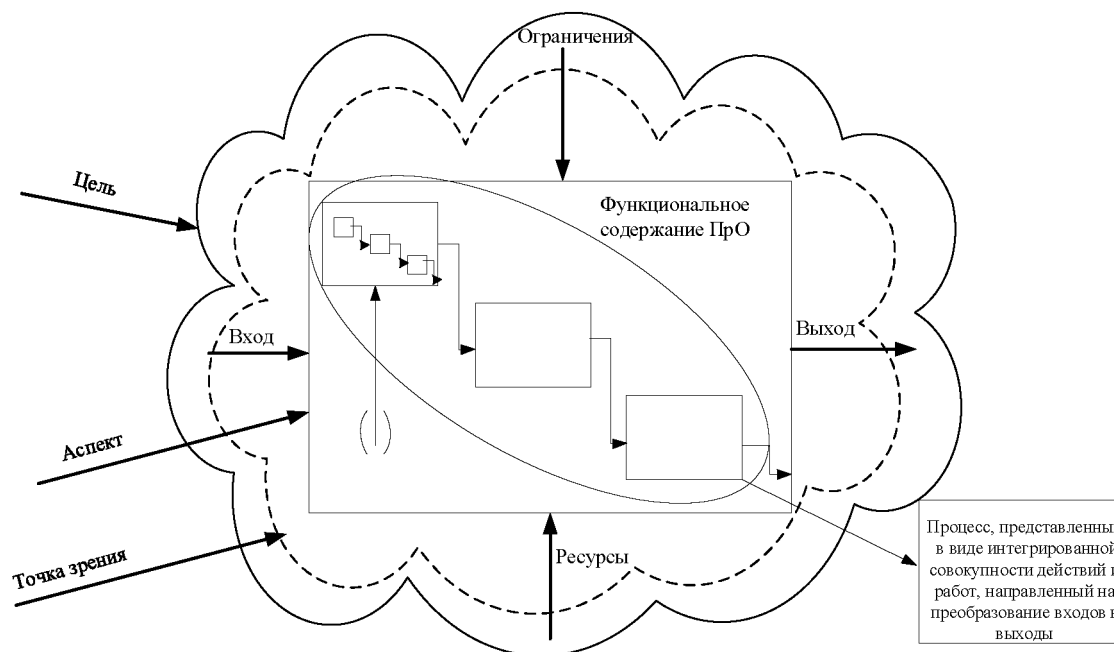


Рис. 1. Определение границ предметной области

Определим отношение как математическую структуру, которая формально определяет свойства различных объектов и их взаимосвязи (т. е. как подмножество декартова произведения). Используя метод «синтаксически ориентированной трансляции», базирующийся на разработках Н. Хомского [12], можем уйти от проблемы семантического анализа путем введения двухшаговой процедуры и переходом к синтаксическому анализу: сначала – распознать структуру, затем – построить выходные действия на ее основе. И в результате приходим к математическому методу анализа предметной области (он основывается на определении некоторого конечного перечня цепочек и их рассмотрении). В дальнейшем открывается возможность представления информационной системы в виде конечного множества функций и отношений между ними (т. е. можем рассматривать отношения в виде функций независимо от соответствующих объектов). В результате приходим к атрибутивно транслируемой грамматике [12].

Следовательно, для отображения знаний в рассматриваемой предметной области (системное моделирование) используются математически-формализованные правила и могут быть применены какие-либо графоаналитические языки, предназначенные для описания объектов (объект-

ные языки). При этом формальные логические свойства таких метаязыков соответствуют следующим положениям:

- 1) не противоречат положениям теории категорий и теории множеств;
- 2) требованиям, предъявляемым к грамматикам Н. Хомского (не выше второго уровня).

Для проведения количественной и качественной оценки отношений между информационными объектами применяется метод семантических дифференциалов Ч. Осгуда, который показывает, что отношения между реальными объектами связаны отношением отрицания (противоположность по Декарту), а виртуальные объекты являются частными определениями в терминологии квадрата Декарта.

Таким образом, можем говорить о том, что отношения двух объектов в ряде случаев могут быть представлены в виде нового объекта, который может быть либо реальным, либо виртуальным.

Виртуальный объект – это объект, полученный в результате отношений, достраиваемый до декартово замкнутой категории, который также не противоречит необходимому разнообразию У. Эшби.

При грамотном аналитическом извлечении этих данных появляется возможность строить стратегические планы развития предприятия, оперативно принимать управленческие решения. Принцип обеспечения «электронной» прозрачности в организационно-экономическом, правовом и многих других аспектах для образовательно-производственных систем во многом реализован. Расширяется возможность обеспечения «электронной» прозрачности и в управленческих, и технологических, и других аспектах, т. е. такие организации приобретают свойства открытых или полукоткрытых.

Технически это обеспечивается прежде всего разработкой и применением программных аналитических комплексов (ПАК), создаваемых на основе унифицированных математических и программных средств. Таким образом, в структуру создаваемого ПАК может быть включена информация, которая в дальнейшем обеспечит возможность проведения реинжиниринга, например, путем замены виртуальных объектов реальными с сохранением действующих отношений. Рассмотрение было произведено на примерах ПАК: управления кадровым резервом предприятия; управления технологическими и производственными процессами нефтегазовой отрасли, управления учебным процессом.

Сегодня особое внимание уделяется программным аналитическим комплексам с элементами интеллектуального управления, способных не только генерировать регламентные сведения и отчеты, но и предоставлять возможность глубокой аналитической работы лицам, принимающим решения (ЛПР).

Таким образом, становится актуальным проектирование и разработка программных аналитических комплексов (ПАК), которые могут быть использованы крупными компаниями, решающими задачи управления персоналом, кадровым резервом, показатели которых в большей степени определяют критерии эффективности.

Следующая проблема исследования – формализация и идентификация информационных объектов и поддержание их соответствия реальным объектам исследуемой предметной области, а также соответствие прослеживаемости информационных и реальных объектов параметров для базы знаний ПАК.

Идеи использования декартово замкнутых категорий для программирования рассматривались довольно давно. Эти идеи тесно связаны с изоморфизмом Карри – Ховарда [13, 14], развиваются в работах [15, 16] и тесно связаны с лямбда-исчислением с типами [17, 18]. Для реализации этих идей предлагалась концепция категориальной абстрактной машины [19]. Последние работы по применению этих идей включают, например, работу [20].

Возьмем за основу определение, что категория  $A$  называется декартово замкнутой, если она удовлетворяет трем условиям:

- в  $A$  имеется объект  $I$ , такой, что для любого объекта  $B$  в категории  $A$  существует единственный морфизм  $I \rightarrow B$ ;
- любые два объекта  $B, C$  в категории  $A$  имеют произведение  $B \otimes C$ ;
- любые два объекта  $C, D$  в категории  $A$  имеют декартово замкнутую категорию  $D^c$ .

Отсюда можем заключить, что положения стандарта ISO/IEC/IEEE 15288 полностью отвечают понятиям декартово замкнутой категории.

## Информатика и вычислительная техника

Процессы ЖЦ, принятые в стандарте ISO/IEC/IEEE 15288 (процессы предприятия, проекта и технические процессы), во многом определяют эффективность формирования и применения систем, предопределяя достижение целей предприятия. А процессы соглашения представлены рабочими взаимоотношениями, которые происходят посредством заключения соглашений, представляющих для нас наибольший интерес (между двумя объектами есть отношение соответствия – отношение есть процесс соглашения, которое характеризуется в стандарте ISO/IEC/IEEE 15288 отношением двух объектов процесса соглашения).

Проблема формирования ПАК для определенной предметной области и процесс создания перемещения семантики в синтаксис и в базу данных являются актуальными. Информацию целесообразно представить в виде многомерных кубов, размерностями которых являются значения атрибутов предметных областей. Принцип многомерных моделей основан на концепции OLAP. OLAP-технологии ориентированы на решение сложных аналитических задач (рис. 2).

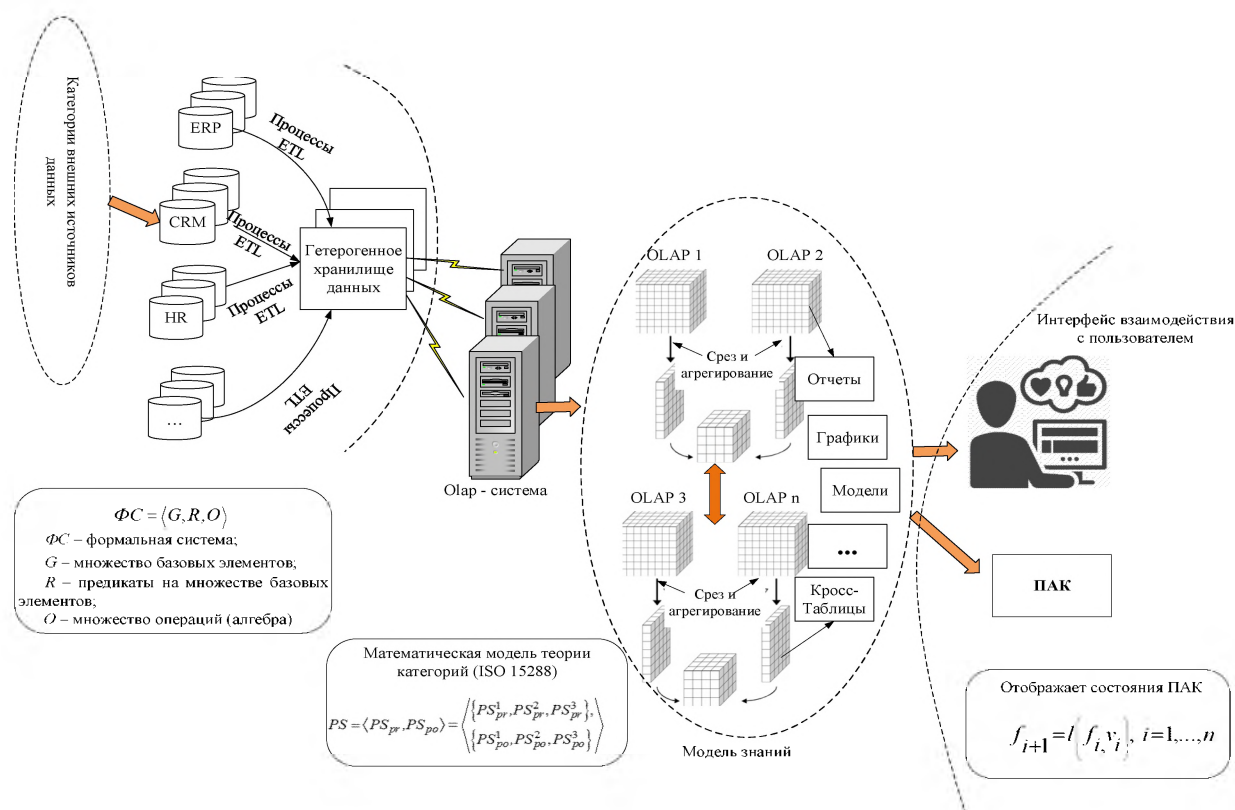


Рис. 2. Графо-аналитическое представление преобразования информации в ПАК

Предметная область представляется множеством информационных объектов. Количество объектов увеличивается до определенного момента (например, отчеты с кросс-таблицами, графики и т. д.) (см. рис. 2).

На каждом этапе происходит взаимодействие двух объектов (в рамках стандарта системной инженерии ISO/IEC/IEEE 15288 процесса соглашения). Математическая модель процесса соглашения представлена в терминах теории категорий. Символьным базисом выступает декартово произведение, оно равнозначно OLAP-кубу.

Представляется возможность определять качественную составляющую по наличию некоторых количественных атрибутов и на основе полученных данных принимать управленческие решения, т. е. перейти от формальной к семантической модели.

Появляется возможность проектирования ПАК в виде совокупности объектов (которые являются категориями) для организации взаимодействия функциональных программ, обеспечивая интеграцию системы анализа объектов предметной области с учетом изменений предметной области.



### 2.1. Теоретико-множественный метод процесса соглашения на примере в соответствии с требованиями стандарта ISO/IEC/IEEE 15288

Для моделирования данного процесса применяются базовые положения теории категорий. Используются следующие обозначения: процессы соглашения  $PS$ , процессы приобретения  $PS_{pr}$ , процессы поставки  $PS_{po}$  (рис. 3).

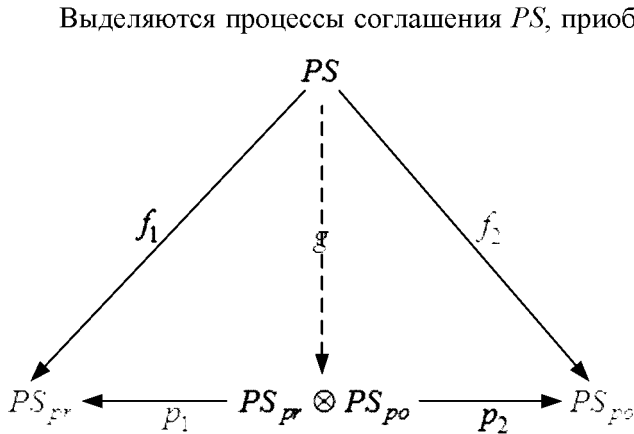


Рис. 3. Фрагмент категориальной модели ПАК

Выделяются процессы соглашения  $PS$ , приобретения  $PS_{pr}$  и поставки  $PS_{po}$  в отдельные категорию и подкатегории, которые состоят из целей процесса  $PS_{pr}^1 = \{pr_1^1\}$ , деятельности процесса  $PS_{pr}^2 = \{pr_1^2, \dots, pr_8^2\}$  и результата  $PS_{pr}^3 = \{pr_1^3, \dots, pr_7^3\}$ , аналогично для процесса поставки: целей процесса  $PS_{po}^1 = \{po_1^1\}$ , деятельности процесса  $PS_{po}^2 = \{po_1^2, \dots, po_9^2\}$  и результата  $PS_{po}^3 = \{po_1^3, \dots, po_7^3\}$ . В результате отношения представимы в виде упорядоченного множества:

$$PS = \langle PS_{pr}, PS_{po} \rangle = \left\langle \left\{ PS_{pr}^1, PS_{pr}^2, PS_{pr}^3 \right\}, \left\{ PS_{po}^1, PS_{po}^2, PS_{po}^3 \right\} \right\rangle$$

Применен информационный подход А.А. Денисова, при формализации предметной области категории объектов и отношения между ними являются первичными. Показано, что разработанная модель процесса соглашения представлена категориями объектов данной предметной области и множеством отношений между ними.

Применение теории категорий позволяет описывать отношения внутри объектов, в условиях неопределенности, а также изучить предметную область с различных сторон и разработать компактную и универсальную программную систему.

Приведенные объекты описаны взаимодействием функторов. В данном случае использован квадрат Декарта, где композиция двух процессов (процесса приобретения и процесса поставки) является прямым отображением приведенного процесса соглашения на результат. Результат процесса рассматривается и как композиция произведения целей и деятельности посредством получения еще одного «треугольника», где независимо от порядка выполнения последовательности операций и отображений результат становится одинаковым.

На основании математического теоретико-множественного метода появляется возможность перейти к формальной модели процессов взаимодействия компонентов программного аналитического комплекса с декартово замкнутой категорией.

### 2.2. Модель процессов взаимодействия компонентов ПАК по декартово замкнутой категории

Представленная модель процессов взаимодействия компонентов ПАК по декартово замкнутой категории, которая позволяет не полностью менять структуру программы, а только отдельную ее часть, добавляя новый модуль, преобразовывая матрицу отношений.

Описана возможность масштабированности системы, где правилами масштабирования являются отношения, которые находятся в объекте учета и отождествляются с коэффициентом самоподобия. В соответствии с этим правилом появляется возможность прогнозирования или выстраивания поведения системы в зависимости от условий и от логических правил (рис. 4).

Взаимодействие данных объектов открывает возможность их дальнейшей композиции в виде достраивания. Новые отношения позволяют достраивать объекты до квадрата Декарта. В резуль-

# Информатика и вычислительная техника

тате получается множество объектов, идентифицируемых и прослеживаемых по пространству и времени.

Определены минимальные требования к структуре ПАК с декартово замкнутой категорией:

1. Отношения соответствуют логике функторов.
2. Вершина имеет минимум два объекта.
3. Цепочка отношений образует маршрут, который становится новым объектом. Вывод: согласно данным требованиям в каждом объекте, в котором имеется хотя бы два отношения, происходит достраивание до квадрата Декарта, позволяющее дальнейшее построение ПАК (тем самым обеспечивается открытость системы).

Таким образом, ПАК определен как комплекс программ, связанных между собой какими-то отношениями (многомерными векторами связи), которые и есть предмет настоящего рассмотрения.

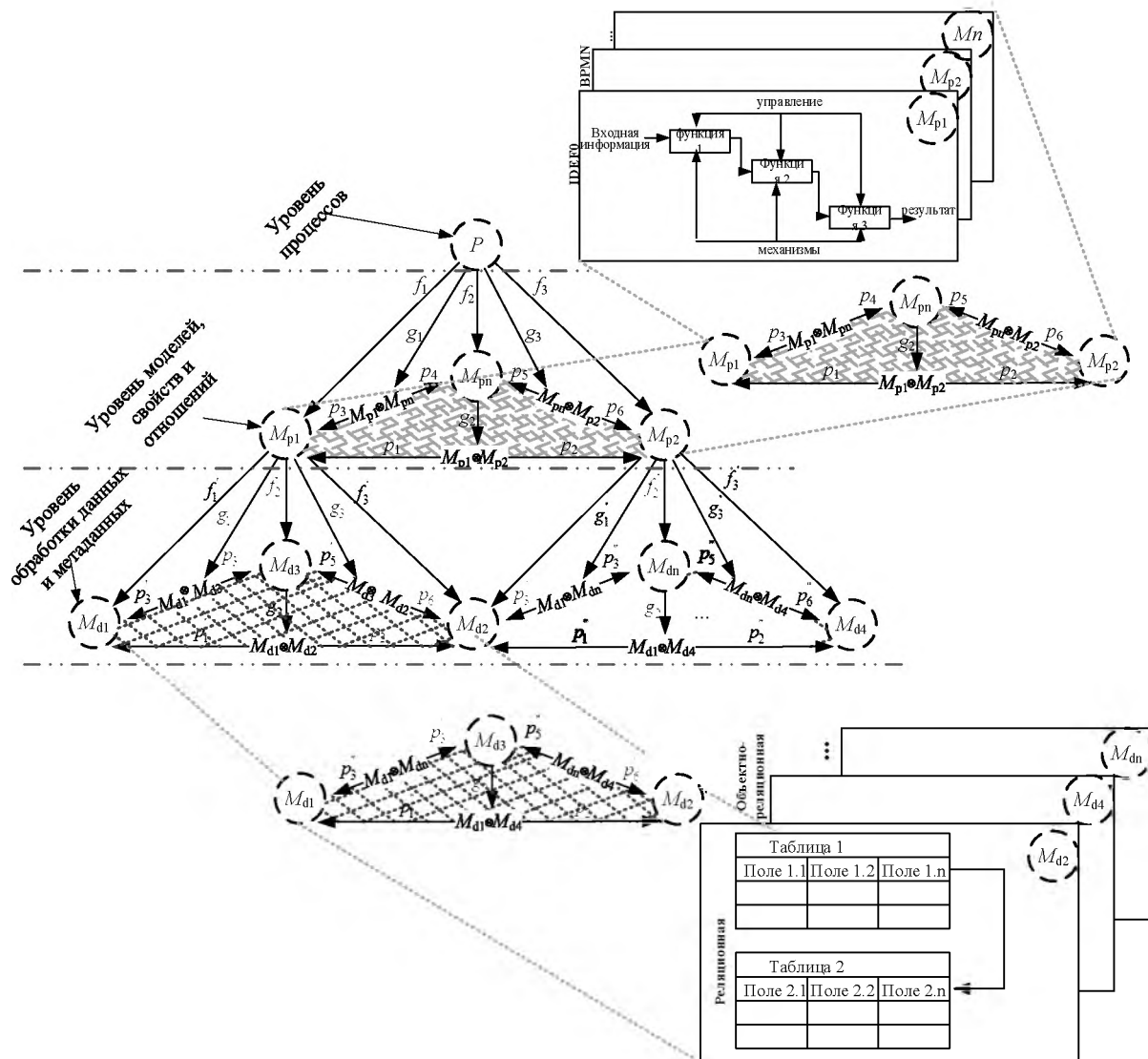


Рис. 4. Правила определения информационных маршрутов в виде функциональной последовательности

Предлагается следующий метод: выстраивание отношений для дальнейшей разработки и проектирования ПАК, т. е. отношений между модулями.

Проектирование программного аналитического комплекса представлено в виде разделения его на категории объектов, с учетом установления между ними категориальных отношений; показано, что полученное множество функторов выделено в отдельную категорию.

В данном случае каждый объект – это программный модуль; чем длиннее цепочка, тем больше количество отношений. Независимо от цепочки свойство модуля не меняется.

Предложен метод выстраивания отношений для дальнейшей разработки и проектирования ПАК, т. е. отношения между модулями определяемы на основе аналитической обработки. Построена схема взаимосвязей между различными категориями объектов. ПАК работает на уровне синтаксических данных. Разработана формальная модель процессов взаимодействия компонентов ПАК, с декартово замкнутой логикой.

### Выводы

1. Показано, что для эффективной структурной интеграции онтологии исследуемой предметной области и онтологии информационной среды необходимо, чтобы структура ПАК отвечала принципу достаточного разнообразия структурных связей

2. На основе построения формальных онтологических моделей исследуемой предметной области, информационной среды и ПАК в рамках теории категорий множеств разработан метод двухуровневого исчисления: синтаксический и формально-логический уровни.

3. Приведены демонстрирующие реализуемость и эффективность метода двухуровневого исчисления примеры построения формальной теоретико-множественной модели процесса соглашения производственной деятельности предприятия, определяемые требованиями стандарта ISO/IEC/IEEE 15288 и построения модели, процессов взаимодействия компонентов ПАК по декартово замкнутой категории.

### Литература

1. *Method of dynamic programming on the basis of dekartovo zamknuty category with the qualifier of subobjects* / G.G. Kulikov, V.V. Antonov, A.R. Fakhrollina et al. // *Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2018): труды VI Всерос. конф. (с приглашением зарубежных ученых), Уфа – Ставрополь. – Уфа: УГАТУ, 2018. – С. 111–115.*

2. *Osgood C.E. The nature and measurement of meaning* / C.E. Osgood // *Psychological Bulletin. – 1952. – No. 49. – P. 197–237.*

3. *Коротенков, Ю.Г. Система как предмет математики и информатики. Формальная система в качестве представления открытой системы* / Ю.Г. Коротенков // *Вестник Тамбов. ун-та. Серия «Естественные и технические науки». – 2005. – № 3. – С. 260–266.*

4. *Фридман, А.Я. Интерпретация концептуальной модели пространственного динамического объекта в классе формальных систем* / А.Я. Фридман // *Вестник Кольского науч. центра РАН. – 2015. – № 4 (23). – С. 100–112.*

5. *Системный подход к построению информационно-управляющих систем.* – <http://www.stud.files.ru/preview/6369038/> (дата обращения: 01.08.2019).

6. *Антонов, В.В. Метод проектирования адаптивного программного комплекса на основе методологии категорийной формальной модели открытой предметной области* / В.В. Антонов // *Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, № 1. – С. 258–263.*

7. *Антонов, В.В. Теоретико-множественная модель ИС для многомерного аналитического анализа отвечающая требованиям хранилищ данных* / Куликов Г.Г., Антонов Д.В. // *Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 6 (51). – С. 189–201.*

8. *Антонов, В.В. Формальная модель информационной системы в аспекте требований хранилищ, данных* / В.В. Антонов, Г.Г. Куликов, Д.В. Антонов // *Научное обозрение. – 2012. – № 5. – С. 711–719.*

9. *Антонов, В.В. Формальная модель предметной области на основе нечетких отношений* / В.В. Антонов, Г.Г. Куликов // *Программные продукты и системы: междунар. журнал. – Тверь, 2011. – № 2 (94). – С. 48–51.*

10. *Антонов, В.В. Формализация предметной области с применением инструментов, поддерживающих стандарты* / В.В. Антонов, Г.Г. Куликов, Д.В. Антонов // *Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16. – № 3 (48). – С. 42–52.*

11. *Куликов, Г.Г. Теоретические и прикладные аспекты построения моделей информационных систем* / Г.Г. Куликов, В.В. Антонов, Д.В. Антонов. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, Germany, 2011. – 134 с.

12. *Хомский, Н. Язык и проблема знания* / Н. Хомский // *Вестник МГУ: сб. науч. тр. – М., 1996. – Вып. 6. – С. 157–185.*

13. Curry, H.B. *Combinatory Logic* / H.B. Curry, R. Feys. – North-Holland, Amsterdam, 1958. – Vol. I.
14. Howard, W.A. *The formulae-as-types notion of constructio*” / W.A. Howard // Curry H.B. *Essays on Combinatory Logic, Lambda Calculus and Formalism*. – Boston: Academic Press, 1980. – P. 479–490.
15. Crole, R.L. *Categories for Types* / R.L. Crole. – Cambridge University Press, 1994. DOI: 10.1017/CBO9781139172707
16. Curien, P.L. *Categorical combinatory logic* / P.L. Curien // LNCS. – 1985. – Vol. 194. – P. 139–151.
17. Barendregt, H. *Lambda Calculi with Types* / H. Barendregt // *Handbook of Logic in Computer Science*. – Oxford University Press, 1993. – Vol. II. – 822 p.
18. Friedman, H. *Equality between functionals* / H. Friedman // *Logic Colloquium. Lecture Notes in Mathematics*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 1975. – Vol. 453. – P. 22–37. DOI: 10.1007/BFb0064870
19. Cousineau, G. *The categorical abstract machine* / G. Cousineau, P.L. Curien, M. Mauny // LNCS, *Functional programming languages computer architecture*. – 1985. – Vol. 201. – P. 50–64. DOI: 10.1007/3-540-15975-4 29
20. *Method of structuring the self-organized intellectual system on the basis of requirements of the ISO/IEC 15288 standard in the form of the Cartesian closed category. (On the example of design of information and analytical system)* / G.G. Kulikov, V.V. Antonov, A.R. Fakhruullina, L.E. Rodionova // *Proc of THE 20th International workshop on computer science and information technologies (CSIT'2018)*. September 24–27, 2018. – Bulgaria, Varna, 2018. – P. 135–139.

**Антонов Вячеслав Викторович**, д-р техн. наук, профессор, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; Antonov.V@bashkortostan.ru.

**Бельтюков Анатолий Петрович**, д-р физ.-мат. наук, Удмуртский государственный университет, г. Ижевск; belt.udsu@gmail.com.

**Куликов Григорий Геннадьевич**, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа; qkqufa@rambler.ru.

**Родионова Людмила Евгеньевна**, старший преподаватель, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; lurik@mail.ru.

*Поступила в редакцию 14 августа 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr190402

## FORMAL REPRESENTATION OF THE MODEL OF REALIZATION OF THE FUNCTIONS OF SYSTEM ENGINEERING BASED ON THE PRINCIPLE OF THE ENOUGH DIVERSITY OF STRUCTURAL CONNECTIONS

V.V. Antonov<sup>1</sup>, Antonov.V@bashkortostan.ru,

A.P. Belyukov<sup>2</sup>, belt.udsu@gmail.com,

G.G. Kulikov<sup>3</sup>, qkqufa@rambler.ru,

L.E. Rodionova<sup>1</sup>, Lurik@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,

<sup>2</sup> Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation,

<sup>3</sup> JSC “Ufa Scientific and Production Enterprise “Lightning”, Ufa, Russian Federation

The paper considers an applied approach to solving computer science problems in the framework of Cartesian closed categories to ensure a sufficient variety of structural relationships in the design of a software analytical complex.

It is shown that the use of constructive ontology methods (formal semantic models) to describe the subject area as an object under study allows automatic or automated (human-machine) construction of the solution and the research task itself. In theory, the ontology is constructed in such a way that it solves these problems from the condition of consistency.

In the categorical approach, abstract objects are considered as subject areas, the internal structure of which was not initially indicated. From the programming point of view, such a category of objects is considered not as a set of possible values in a set-theoretic approach, but as an interface between programs that allows their composition to be performed. The connection with the set-theoretic model is that the interfaces are used to transmit data identifying (encoding) elements of sets corresponding to objects.

Programs available and created in such languages are morphisms that connect some objects. The action of morphism is not limited to the mapping of values from the source object to the final one, as in functional programming. This can be a complex interaction with the transmission of signals, data and programs in opposite directions. For example, a program may make several attempts to obtain a result by processing error signals that have arisen as a result of previous attempts.

The proposed approach is proposed to be used to standardize automatic and automated solutions to structural problems.

*Keywords: cartesian closed category, formal model, chomsky hierarchy, software analytical complex, formal ontological model, system engineering.*

### References

1. Kulikov G.G., Antonov V.V., Fakhrullina A.R., Shilina M.A., Popkova E.E., Rodionova L.E. Method of Dynamic Programming on the Basis of Dekart Closed Category with the Qualifier of Subobjects. *Trudy VI vserossiyskoy konferentsii: Informatsionnye tekhnologii intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy (ITIDS'2018)* [Works of the VI All-Russian Conference: Information Technologies of Intellectual Support of Decision-Making (ITIDS'2018)], 2018, pp. 111–115.
2. Osgood C.E. The Nature and Measurement of Meaning. *Psychological Bulletin*, 1952, no. 49, pp. 197–237.
3. Korotkov Yu.G. [System as an Object of Mathematics and Computer Science. The Formal System as a Representation of the Open System]. *Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*, 2005, no. 3, pp. 260–266. (in Russ.)
4. Fridman A.I. [Interpretation of the Conceptual Model of a Spatial Dynamic Object in the Class of Formal Systems]. *Bulletin of the Kola Science Centre of RAS*, 2015, no. 4 (23), pp. 100–112. (in Russ.)
5. *Sistemnyy podkhod k postroeniyu informatsionno-upravlyayushchikh sistem* [System Approach to the Construction of Information and Control Systems]. Available at: <http://www.stud.files.ru/preview/6369038/> (accessed 01.08.2019).
6. Antonov V.V. [Method of Designing an Adaptive Software Complex Based on the Methodology of a Categorical Formal Model of an Open Domain]. *Bulletin of the USATU*, 2015, vol. 19, no. 1, pp. 258–263. (in Russ.)
7. Antonov V.V., Kulikov G.G., Antonov D.V. [Theoretic-Set Model of Information System for Multidimensional Analytical Analysis Meeting the Requirements of Data Warehouses]. *Bulletin of USATU*, 2012, vol. 16, no. 6 (51), pp. 189–201. (in Russ.)
8. Antonov V.V., Kulikov G.G., Antonov D.V. [Formal Model of Information System in the Aspect of Data Storage Requirements]. *Scientific Review*, 2012, no. 5, pp. 711–719. (in Russ.)
9. Antonov V.V., Kulikov G.G. [Formal Model of the Subject Area on the Basis of Fuzzy Relations]. *Software Products and Systems: International Journal*, 2011, no. 2 (94), pp. 48–51. (in Russ.)
10. Antonov V.V., Kulikov G.G., Antonov D.V. [Formalization of the Subject Area with the Use of Tools that Support Standards]. *Bulletin of USATU*, 2012, vol. 16, no. 3 (48), pp. 42–52. (in Russ.)
11. Kulikov G.G., Antonov V.V., Antonov D.V. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty postroeniya modelej informacionnykh sistem.* – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, Germany, 2011. – 134 p.
12. Khomskiy N. [Language and Problem of Knowledge]. *Bulletin of Moscow State University: Collection of Scientific Works*, 1996, vol. 6, pp. 157–185. (in Russ.)
13. Curry H.B., Feys R. *Combinatory Logic*. Vol. I. North-Holland, Amsterdam, 1958.

14. Howard W. A. “The formulae-as-types notion of construction”. In: *To H.B. Curry: Essays on Combinatory Logic, Lambda Calculus and Formalism*. Academic Press, Boston, 1980, pp. 479–490.
15. Crole R.L. Categories for Type, *Cambridge University Press*, 1994. 335 p. DOI: 10.1017/CBO9781139172707
16. Curien P.L. Categorical Combinatory Logic. In: *Brauer W. (eds.) Automata, Languages and Programming. ICALP 1985. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1985, vol. 194, pp. 139–151.
17. Barendregt H. Lambda Calculi with Types. *Handbook of Logic in Computer Science*. Vol. II, Oxford University Press, 1993. 822 p.
18. Friedman H. Equality between Functionals. In: *Parikh R. (eds.) Logic Colloquium. Lecture Notes in Mathematics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1975, vol. 453, pp. 22–37. DOI: 10.1007/BFb0064870
19. Cousineau G., Curien P.L., Mauny M. The Categorical Abstract Machine. In: *Jouannaud J.P. (eds.) Functional Programming Languages and Computer Architecture. FPCA. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1985, vol. 201, pp. 50–64. DOI: 10.1007/3-540-15975-4\_29
20. Kulikov G.G., Antonov V.V., Fakhrullina A.R., Rodionova L.E. Method of Structuring the Self-organized Intellectual System on the Basis of Requirements of the ISO/IEC 15288 Standard in the Form of the Cartesian Closed Category. (On the Example of Design of Information and Analytical System). In: *Proc of THE 20th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2018). September 24–27, 2018, Bulgaria, Varna, 2018*, pp. 135–139.

*Received 14 August 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Метод формального онтологического моделирования и реализации функций системной инженерии на основе принципа достаточного разнообразия структурных связей / В.В. Антонов, А.П. Бельтюков, Г.Г. Куликов, Л.Е. Родионова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 13–26. DOI: 10.14529/ctcr190402

### FOR CITATION

Antonov V.V., Beltyukov A.P., Kulikov G.G., Rodionova L.E. Formal Representation of the Model of Realization of the Functions of System Engineering Based on the Principle of the Enough Diversity of Structural Connections. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 13–26. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190402