

А. С. Кузнецов

**ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОБЪЕКТОВ, ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ: ПРИНЦИПЫ
ФОРМАЛИЗАЦИИ, КЛАССИФИКАЦИИ
И ВЕРИФИКАЦИИ**

Монография

Санкт-Петербург
Издательский дом «Scientia»
2026

А. С. Кузнецов

**ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОБЪЕКТОВ, ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ: ПРИНЦИПЫ
ФОРМАЛИЗАЦИИ, КЛАССИФИКАЦИИ
И ВЕРИФИКАЦИИ**

Монография

Санкт-Петербург
Издательский дом «Scientia»
2026

УДК 004.94
ББК 16.23
К89

Рецензенты:

Потехина Елена Витальевна — доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры Информационных технологий, искусственного интеллекта и общественно-социальных технологий цифрового общества, Российский государственный социальный университет (РГСУ);

Красников Степан Альбертович — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, МИРЭА — Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).

Кузнецов, Андрей Сергеевич

К89 Информационное моделирование объектов, процессов и систем: принципы формализации, классификации и верификации: монография / А. С. Кузнецов. — [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург: Сциентиа, 2026. — 106 с.; 2,23 Мб. — Режим доступа: <https://scientia-pub.org/index.php/Sci/catalog/book/145> — Загл. с экрана. ISBN 978-5-907902-76-3. — doi:10.32415/scientia_978-5-907902-76-3.

В монографии подробно изложены основные подходы к созданию формализованного описания различных объектов, процессов и систем на основе инструментов визуального моделирования. Рассмотрена эволюция визуальных моделей на основе графовых представлений. Приведена классификация визуальных средств информационного моделирования. Приводятся сведения о принципах применения методов моделирования предметной области на основе формальных языков визуального моделирования. Монография может быть полезна широкому кругу читателей, в том числе опытным специалистам в области информационного моделирования различных процессов, систем и технологий.

**УДК 004.94
ББК 16.23**

Оглавление

Предисловие	4
Введение	6
Глава 1. Системологические основы и принципы создания формализованного описания объектов, процессов и систем.....	9
Глава 2. Информационное моделирование как инструмент структурного системного анализа.....	17
2.1 Основы информационного анализа и моделирования процессов и систем	17
2.2 Теоретико-информационный подход к анализу объектов, процессов и систем	20
Теоретико-множественный подход к созданию формализованного системного описания информационных объектов, процессов и систем.	25
2.3. Методология моделирования процессов и систем на основе описательных средств – информационных моделей уровневой формализации.....	29
2.4. Основы подходы и системные принципы моделирования процессов и систем	33
Глава 3. Эволюция средств визуального моделирования сложных систем на основе графовых представлений.....	39
3.1. Графовые структуры и их применение	39
3.2. Информационная репрезентация.....	47
Глава 4. Визуальные модели состояния процессов и систем 4.1. Классификация средств визуального моделирования.....	49
4.2. Формализация информационных моделей процессов и систем на основе языков визуального моделирования	51
4.3. Компьютерное моделирование процессов и систем. Краткая характеристика программных средств информационного моделирования	58
4.4 Виды компьютерных моделей объектов, процессов и систем	62
Глава 5. Верификация информационных моделей, объектов, процессов и программных систем.....	66
5.1 Основные подходы и процедуры процессов верификации.....	66
5.2. Средства и инструменты верификации программных систем.....	72
Заключение.....	79
Список источников	83

Предисловие

При проведении системных исследований различных объектов, процессов или систем необходимым является создание неких информационных образов - виртуальных “слепков” изучаемых объектов. Для создания образа необходимо знание и понимание основ технологии моделирования объектов, процессов и систем, в том числе методов информационного и визуального моделирования. Информационное моделирование различных объектов, процессов и систем базируется на ряде определенных принципиальных особенностей, касающихся решения задачи уровневой иерархической формализации и интерпретации знаний о выбранных предметных областях. Данный подход по сути является одним из научных методов создания информационного обеспечения процессов и систем на основе модельных представлений.

При создании формализованного описания предметных областей исследуемых процессов и систем необходимо четкое представление о технологии процессов информационного моделирования, его целях и задачах, а также о разнообразии графических визуальных средств интерпретации информации на основе различных моделей. В данной научной монографии поставлена и последовательно решена задача системного анализа и формирования основных подходов к информационному моделированию объектов, процессов и систем, выполнена систематизация принципов формализации и классификации группы методов и инструментов процессов информационного моделирования как составляющей технологии и процесса информационной репрезентации на основе визуальных моделей, выполненных по различным методологиям и построенных в рамках определенных нотаций, продиктованных формальными языками информационного моделирования.

Данный подход является базовым универсальным методом, позволяющим создавать цифровые информационные модели самых разных объектов, процессов и систем. Также подобный подход отражает взгляд автора

на идею формированию цифровых прототипов объектов, процессов и систем в виде комплексов, использующих различные модели на основе формальных языков, методов и представлений.

Введение

На сегодняшний день одним из глобальных трендов развития общества и экономики является всеобщая цифровизация. Процессы всеобщей цифровизации и постепенный переход к цифровой трансформации сегодня существуют во всех сферах жизнедеятельности человека. Процессы цифровизации различных объектов, процессов и систем связаны с построением комплекса в виде цифровых моделей или цифровых двойников. В общем виде цифровой двойник представляет собой комплекс различных моделей, цифровой информационный образ, некий «слепок» части реального окружающего мира. При этом, информационный образ является мощным инструментом в понимании сложных процессов и систем.

При проведении системных исследований поведения и изучении свойств различных систем широко применяются различные методы моделирования. Моделирование решает целый ряд задач, связанных с формализацией поведения и описанием свойств реальных объектов, процессов и систем. Моделирование представляет собой научный метод познания, заключающийся в создании и исследовании различных моделей процессов и систем. Моделирование - универсальный инструмент работы исследователя, значительно облегчающий процесс познания элементов, процессов и систем окружающего мира. Основная идея моделирования систем представляется в качестве общепринятого научного подхода, связанного с заменой реальной системы на некоторую абстракцию, называемую формальной моделью системы. Теоретическую основу моделирования составляет принцип подобия, определяемого в качестве некоторого сходства при замене объекта моделирования - оригинала, на модель, причем данная замена не является эквивалентной. Модель и моделирование являются универсальными понятиями, составляющими довольно мощного инструмента познания объектов и явлений в окружающем мире. Моделирование является общепризнанным средством познания окружающей действительности путем

последовательных этапов анализа и синтеза при изучении свойств не исходной системы, а лишь ее формализованного представления – модели.

При создании формализованного описания процессов и систем широко используются различные информационные модели. Информационная модель представляет собой определенный набор параметров состояния исследуемого объекта, а также отражает связи между ними в виде структуры системы. Процессы информационного моделирования, заключающиеся в построении комплекса информационных моделей, необходимы для повышения общей эффективности управления различными процессами, системами и объектами. Визуальное представление процессов моделирования объектов и систем позволяет системно исследовать и описать их на основе формализованных представлений разного уровня абстракции и детализации. Визуальные модели позволяют специалистам получать актуальную информацию о текущем состоянии, способствуя построению прогнозов, а также являются мощным инструментом информационной поддержки процесса принятия управленческих решений разного уровня сложности и оперативности. Понятие «информационная модель» является достаточно многогранным – в него входят формульные зависимости, компьютерные универсальные моделирующие программы, а также различные формы и виды цифровой информации. Многообразие видов, форм представления и методологических подходов к построению информационных моделей объектов, процессов и систем диктует необходимость создания систематизированного описания, направленного на установление и обобщение основных принципов создания формализованного описания объектов, процессов и систем, а также подходов к классификации модельных информационных структур и представлений с позиций системного подхода.

В данной научной монографии будут последовательно рассмотрены и подробно изложены вопросы эволюции визуальных информационных моделей, а также основные подходы к их системной классификации, уровневой формализации и детализации на основе формальных языков

визуального моделирования. Также рассмотрены методы, инструменты и подходы к верификации информационных моделей объектов, процессов и систем. Данная монография рекомендуется к изучению для магистрантов и аспирантов, а также преподавателей и научных работников, интересующихся современными подходами к информационному моделированию сложных объектов, процессов и систем.

Глава 1. Системологические основы и принципы создания формализованного описания объектов, процессов и систем

Системология как область научной мысли охватывает ряд вопросов, связанных с теоретическими представлениями о функционировании и развитии сложных систем. Она относится к инженерным наукам и представляет собой специфическое самостоятельное отдельное направление из общей теории систем. Также системология направлена на автоматизацию решения различных системных задач. Термин «система» в первом приближении обозначает некое целое, состоящее из частей, или подразумевает множество элементов, а также порядок организации их взаимодействия в данном множестве. Системология как наука занимается актуальными проблемами поиска решения междисциплинарных задач [1].

Идея изоморфизма на уровне системных понятий, законов и моделирования в различных предметных областях привела к рассмотрению науки системологии как ряду дисциплин: системного анализа, теории общих систем, общей теории систем а также системотехники, являющейся аналогом системной инженерии, сочетающей идеи междисциплинарного подхода в научных исследованиях и ряд средств создания успешных систем наряду с интеграцией средств робототехники, программного обеспечения и инновационных разработок в области компьютерных чипов (рисунок 1) [1, 2].



Рисунок 1. Основные составляющие системологии как научного познания [2].

Системологию, несмотря на принадлежность к отдельному научному направлению, тем не менее, необходимо рассматривать как часть общей теории управления [1, 3], это один из подходов к описанию системологических принципов. Второй подход представляет собой отдельное самостоятельное направление, и основан на учете специфики структурных характеристик исследуемых систем. Такой подход называется кибернетическим или структуралистским [4]. Подобное рассмотрение предполагает оригинальный, целостный и конструктивный подход к системологии, достижимый за счет идеи формализации семантики и логики общесистемных понятий, что позволяет выполнить уровневую иерархическую классификацию систем, системных категорий и понятий [5].

Появление целого ряда родственных пересекающихся научных направлений: кибернетика, общие системные исследования, теория информации, теория управления в различных системах, математическая теория систем, теория принятия решений, исследования операций и искусственный интеллект, связано с развитием компьютерной техники и технологий. Перечисленные выше области научного знания связывает характерная особенность – рассматриваются системные принципы и задачи, причем главная роль отводится информационным, реляционным и структурным аспектам при нивелировании типа системообразующих сущностей (рисунок 2). Представленные выше интеллектуальные разработки целесообразно объединить и использовать в качестве единого общего поля научных исследований, именуемого системологией [2, 6].



Рисунок 2. Важнейшие системологические аспекты научного исследования

Системология, как наука о системах, содержит три основных компонента: область исследования; совокупность знаний и специальную методологию – совокупность согласованных методов накопления новых знаний об этой области, а также практических рекомендаций по использованию данных знаний в процессе решения задач (рисунок 3).



Рисунок 3. Основные категории системологии как науки

Предметом любой научной деятельности является изучение определенного класса систем. Термин «система» достаточно неоднозначен, и определяется разными исследователями по-разному. В общем и целом, систему можно определить, как совокупность взаимодействующих взаимопроникающих связанных структурных единиц – элементов системы, образующих некое единство цели или функции. Данные категории как составляющие науки о системах описываются в литературе по общей теории систем и системному анализу. При этом, наука о системах не сравнивается непосредственно с другими системами, а рассматривается как принципиально новое направление научной мысли.

Системология рассматривает данные научные категории (Рисунок 3). Данные исследования свойств систем, а также связанные с ними научные задачи, именуются общим названием «науки о системах». Такой подход подразумевает организацию научной деятельности главным образом

теоретического плана, дополняющую экспериментальные исследования классической науки.

Область науки о системах включает в себя все типы свойств (атрибутов) и отношений, которые являются существенными для отдельных обособленных классов множества систем, или, реже, существенные для любых систем.

Среди критериальных параметров оценки различия систем как основы выбора способа классификации выделяют два фундаментальных критерия различимости (рисунок 4):

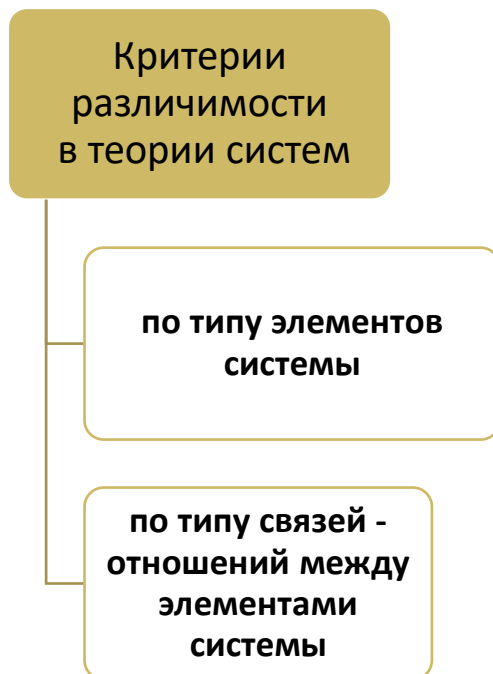


Рисунок 4. Критерии различимости в задачах классификации систем

Основные системологические принципы создания формализованного описания процессов и систем представлены на рисунке 5. Данные системные категории признаков (свойств, атрибутов) целесообразно рассматривать только в комплексе, а не в отдельности. Свойство целостности предполагает позиционирование системы в виде единого целого одновременно с рассмотрением данной системы как нижестоящей для вышестоящих уровней.

Иерархичность предполагает уровневое построение, причем низшие уровни подчиняются высшим. Принцип структуризации подразумевает наличие определенной структуры, обусловленной различными связями между элементами системы и подсистемами. Принцип множественности предполагает реализацию концепции построения различных моделей изучаемой системы, например, при использовании такого подхода, данное множество могут составлять физические, математические и прочие модели.

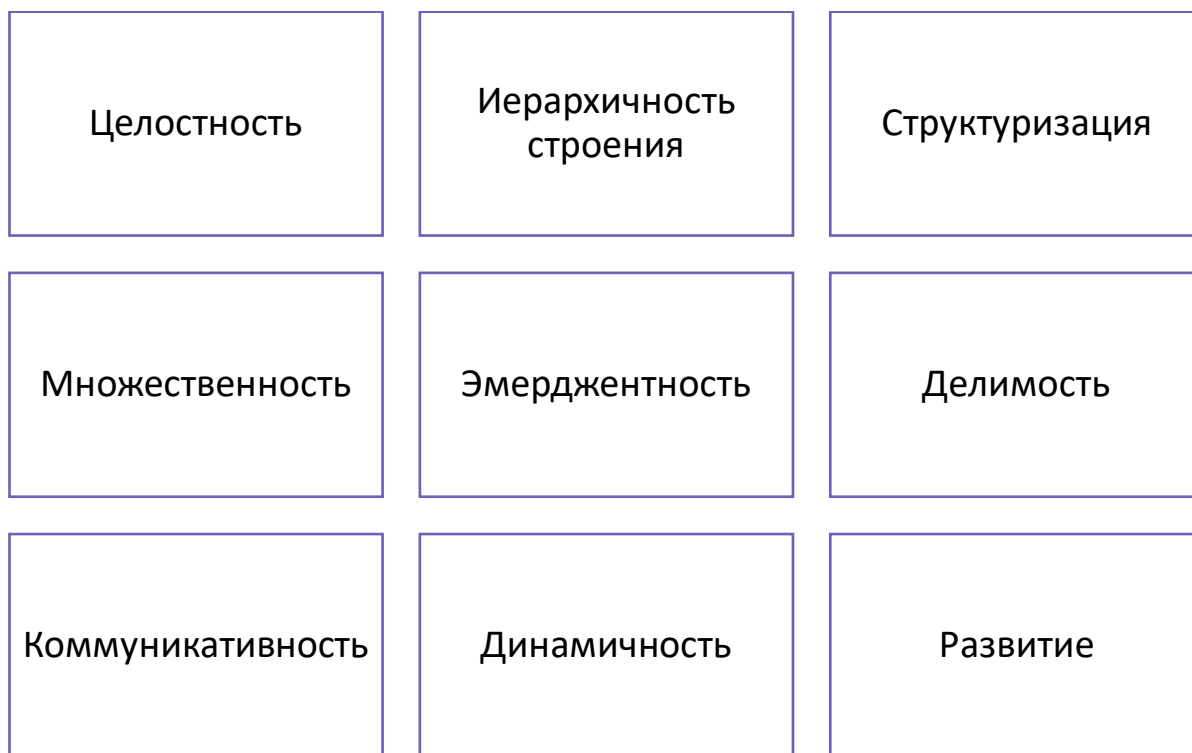


Рисунок 5. Основные системологические принципы описания процессов и систем

Свойство (признак) эмерджентности системы предполагает, что система построена таким образом, что она обладает некими специфическими признаками, не свойственными отдельным элементам, на базе которых она построена. Таким образом, поведение исследуемой системы отличается от поведения элементов, составляющих ее, рассматриваемых в отдельности.

Использование принципа делимости предполагает структуризацию составляющих систему подсистем и реализацию идеи декомпозиции в теории

систем. Данный принцип позволяет реализовать представление системы как области, состоящей из некоторых самостоятельных (условно) фрагментов в виде подсистем. При этом в теории систем и системном анализе различают понятия подсистемы и конечного элемента. Конечный элемент в данном случае представляет собой наименьшую часть систем, обладающую набором характерных для нее признаков. Подсистема является выделенной в ходе классификации по определенному признаку частью системой, содержащие конечные элементы, удовлетворяющие данным классификационным требованиям.

Свойство коммуникативности, являющееся одной из важных значимых характеристик систем, проявляется в способности взаимодействия исследуемой системы с чем-либо: с окружающей ее средой, с вышестоящей в иерархии надсистемой, а также с различными нижестоящими иерархически подчиненными системами. Характеристика коммуникативных свойств систем в первую очередь указывает на неизолированность систем, а также на наличие разного вида коммуникаций с окружающей средой. Также подобный подход можно трактовать как описание системы через ее неоднородность, разноплановость, и, в конечном итоге, способность образовывать сложное единство с окружающей средой.

Динамичность систем – отдельная категория, характеризующая описание систему через смену ее устойчивых состояний. Данный процесс происходит во времени, и реализуется также за счет разнопланового воздействия ряда внутренних и внешних факторов. Подробное детальное изучение процесса смены таких состояний – предмет исследования теории систем и системного анализа. Изучение динамики сложных систем – основополагающий фактор для моделирования, прогнозирования и управления различными системами.

Свойство развития в теории систем и системном анализе реализовано за счет целенаправленных воздействий на систему, приводящих к изменению (регулированию и оптимизации) ее структуры, функциональных

особенностей, приводящих к усложнению уровня организации системы, а также расширению коммуникативных возможностей. Функция развития характеризует процессы внутренней динамики систем, а также стремление к сохранению целостности в условиях постоянно меняющихся внешних и внутренних факторов. Виды развития систем представлены на рисунке 6.

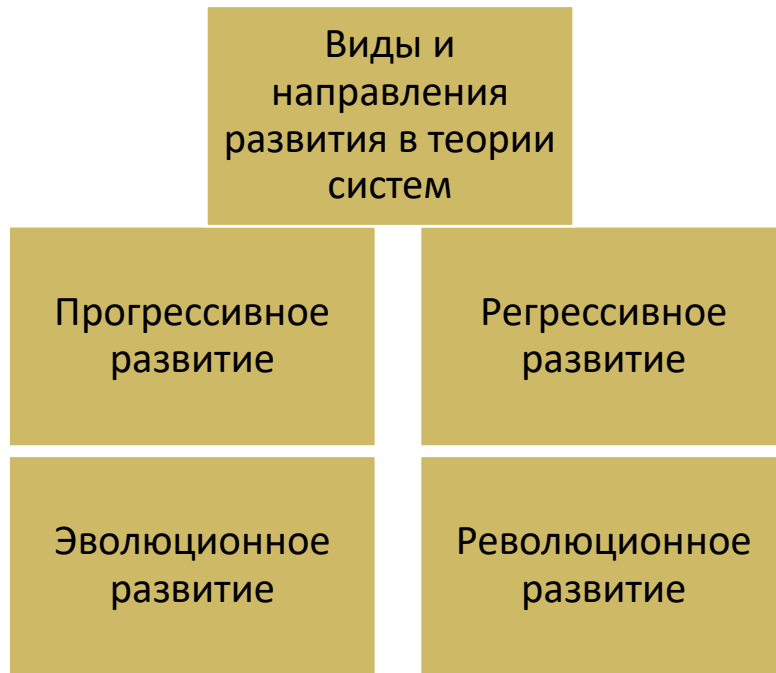


Рисунок 6. Виды развития систем

Отдельно следует выделять концепцию устойчивого развития систем. Идея устойчивого развития предполагает учет трех взаимосвязанных компонентов: экономического, социального и экологического (рисунок 7).

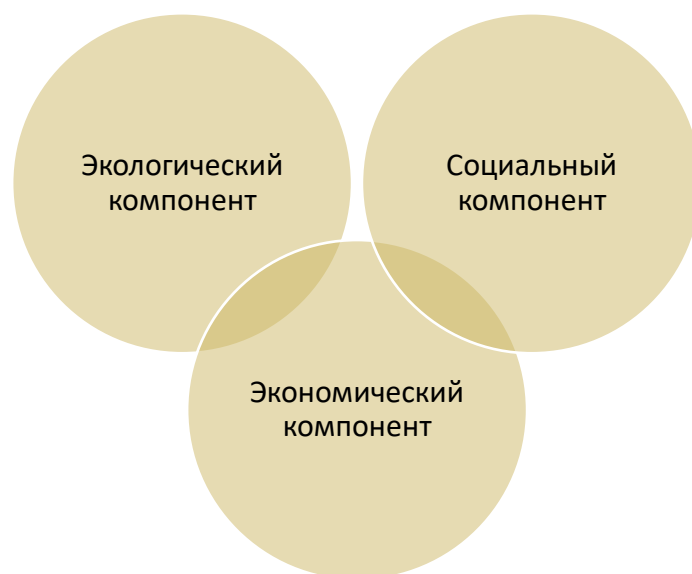


Рисунок 7. Триада в концепции устойчивого развития

Глава 2. Информационное моделирование как инструмент структурного системного анализа

2.1 Основы информационного анализа и моделирования процессов и систем

Моделирование в системном анализе представляет собой один из подходов, применяемых для анализа, предсказания, а также оптимизации различных аспектов исследуемых систем. Специфика системного анализа заключается в том, что проблематика принятия решений рассматривается в условиях анализа большого количества информации гетерогенной природы. Применение методов и инструментов системного анализа в информационных технологиях позволяет моделировать бизнес-процессы, проводить анализ требований и эффективно управлять изменениями [7, 8].

Информационное моделирование процессов и систем проводится с позиций системного подхода и структурного анализа. Структурный анализ представляет собой отдельный метод исследования систем, при котором изучение начинается с общего обзора – описания системы. Далее созданное общее описание системы последовательно детализируется, происходит его преобразование в развитую иерархическую структуру, в которой наращивается число уровней. Для методологии структурного анализа при проведении исследований систем характерно деление на несколько уровней абстрагирования; введение количественного ограничения на число элементов в каждом отдельном уровне формализованного описания, от 3 до 6-7 единиц; ограниченность семантического контекста, на уровне наиболее важных деталей; использование строго формализованных форм представления такой информации – записи, а также итеративное приближение к конечному результату (рисунок 8). Методология структурного системного анализа также опирается на два базовых принципа, непосредственно связанных с созданием формализованного описания процессов и систем: принцип «разделяй и властвуй», и принцип иерархического упорядочивания [9]. Первый подход к решению проблем подразумевает деление одной задачи на множество более

мелких самостоятельных задач, при этом они являются легкими на уровне понимания и разрешения.

Второй принцип является своеобразным дополнением первого принципа «дихотомии»: кроме составляющих частей проблемы, важным также является и системное понимание того, как устроена та или иная система. Понимание проблемы значительно облегчается при уровневой организации ее составляющих частей в древовидные иерархические структуры. Таким образом, систему можно описать и понимать по уровням, каждый из которых вносит дополнительную детализацию информации.



Рисунок 8. Основные принципы структурного анализа систем.

Среди ряда методологий структурного системного анализа, реализуемых с помощью информационного моделирования процессов и систем, выделяют две группы методов: методы и технологии диаграмм потоков данных DFD, и SADT – методология структурного анализа и проектирования систем (стандартизированное описание в виде методологии функционального моделирования IDEF0) [9, 10]. Группы методов структурного анализа систем представлены на рисунке 9.

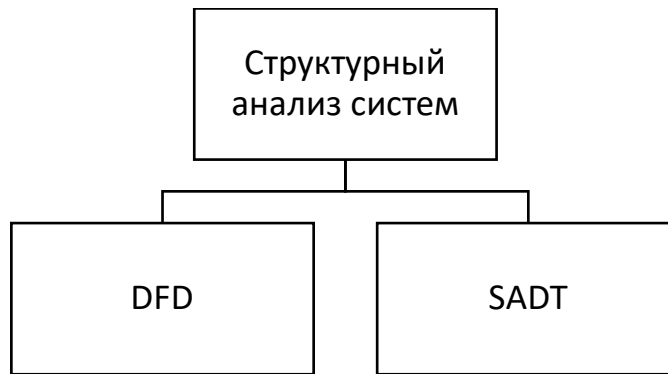


Рисунок 9. Группы методов структурного анализ систем.

Структурные методы исследования систем широко используют графические нотации, что значительно облегчает понимание сложных процессов и систем.

Применение методологии структурного анализа систем предполагает исследование систем, на основе создаваемых графических модельных представлений [10]. Среди процедур структурного системного анализа выделяют несколько этапов, которые представлены на рисунке 10.

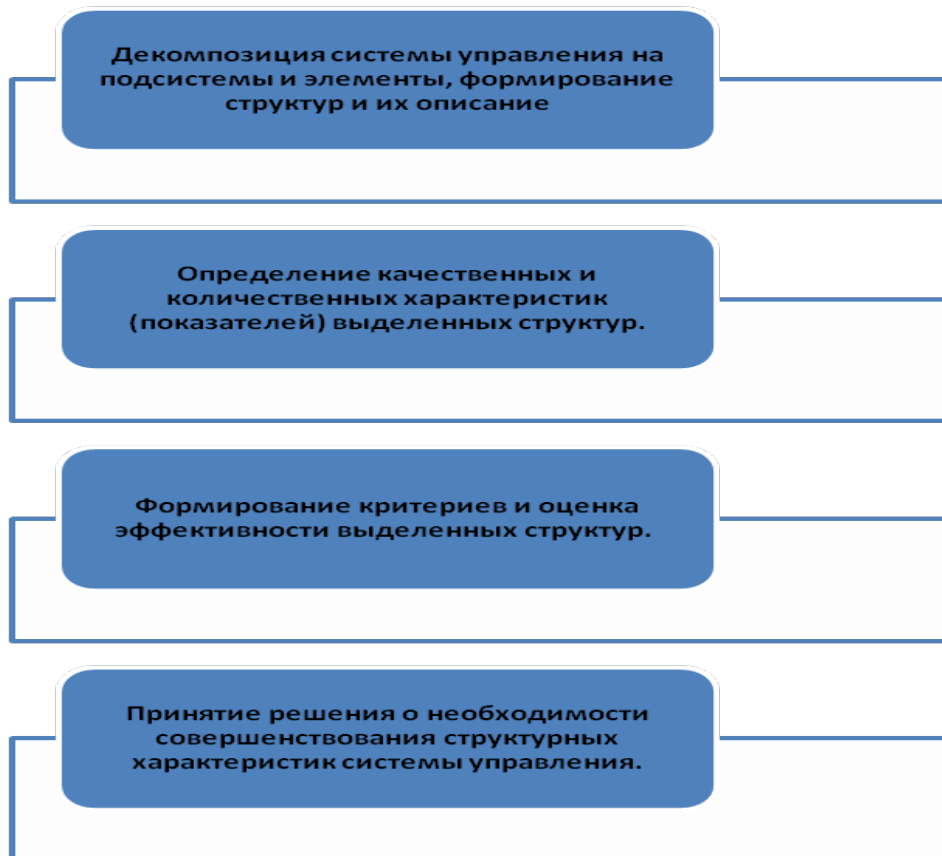


Рисунок 10. Основные этапы структурного анализа систем.

При выполнении структурного анализа процессов и систем вначале выполняется уровневая декомпозиция системы на составляющие подсистемы и конечные элементы - единицы системы, происходит формирование структур и создается их описание - данный процесс называется структурной идентификацией [11, 12, 13]. Далее для созданных структур проводится определение количественных и качественных признаков - характеристик, атрибутов, наиболее существенных свойств. После второго этапа выполняется формирование количественных параметрических критериев и проводится оценка эффективности созданных структурных решений. В результате проведения оценки для синтезированных структурных решений системы принимается решение о необходимости структурных характеристик системы - структурная оптимизация.

Целью проведения данных исследований является исследование статических характеристик изучаемых систем, что достигается путем вычленения функциональных подсистем и конечных элементов с установлением между ними отношений в виде связей различного типа.

2.2 Теоретико-информационный подход к анализу объектов, процессов и систем

Одним из набора принципов, применяемых при проведении системных исследований, является теоретико-информационный подход к анализу, проектированию и управлению различными процессами и системами. Теоретико-информационный анализ систем является универсальным научным подходом, основанным на организации и проведении исследований с позиций применения основных идеологических принципов, основанных на теории информации [13, 14].

Основу теории информации составляют математический аппарат, представленный теорией вероятности и математической статистикой. Теоретико-информационный подход к анализу процессов и систем

предполагается использовать для раскрытия комплекса информационных свойств связанных взаимодействующих систем, а также для определения их качественных и количественных характеристик [14].

Теоретико-информационный анализ процессов и систем обладает некоторым набором особенностей применения [15]. Основные особенности процессов теоретико-информационного анализа систем представлены на рисунке 11. Перечень выполняемых процедур включает четыре пункта, связанных с процессами выделения уровней иерархичности управления, формализованным представлением системы в виде направленного графа, процессами определения составляющих в виде информационных единиц – элементов, а также обнаружение алгоритмов, направленных на выполнение процессов преобразования информации в соответствующих структурных информационных элементах [16].

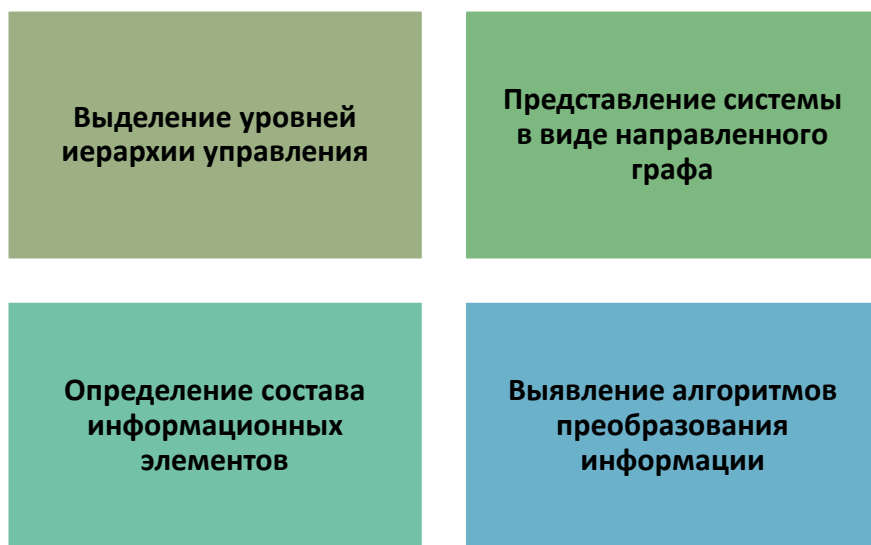


Рисунок 11. Особенности теоретико-информационного анализа систем.

Теоретико-информационный анализ объектов, процессов и систем представляет собой отдельный самостоятельный научно-обоснованный подход к организации и проведению научных исследований в различных

областях науки и техники с основных позиций и принципов теории информации [17, 18].

При создании формализованного описания различных объектов, процессов и систем применяются основные ключевые понятия теоретико-информационного анализа систем, краткий перечень приведен на рисунке 12:



Рисунок 12. Основные понятия теоретико-информационного анализа объектов, процессов и систем

Здесь под информацией понимается определенный набор сведений, представленных в виде данных, сообщений, сигналов о состоянии, которые подлежат передаче, приему, обработке и хранению – организации исполнения цепочки информационных процессов [19]. Теоретико-информационный подход позволяет решать ряд прикладных задач, среди которых:

- оценка пропускной способности реальных непрерывных каналов передачи. Также сравнение по пропускной способности различных телекоммуникационных и информационных систем, компьютерных сетей.
- поиск методов передачи и приёма сообщений, которые бы обеспечивали минимальную потерю информации при прохождении сообщений по каналу с помехами.
- разработка концептуальных моделей информационных объектов и взаимодействий, структур и систем, информационного пространства для поддержки процессов автоматизированного проектирования, принятия решений и управления.
- определение универсальных закономерностей управления и эволюционного развития сложных систем, информационных структур, сети Интернет.
- разработка комплексов программно-технических, информационных и научно-методических средств поддержки проектирования и управления в сложных открытых системах.

На основе применения принципов и подходов теоретико-информационного анализа становится возможным построение теоретико-информационных моделей различных объектов, процессов и систем [20, 21].

Теоретико-информационные модели – отдельный класс моделей, с помощью которых возможно создавать строгое формализованное описание функционирования различных объектов, процессов и систем с учетом анализа информации и информационных потоков [21, 22]. Данный подход также позволяет учитывать различные ограничения на набор возможных устойчивых состояний, природа которых однозначно определяется структурой и механизмами функционирования исследуемого объекта. Теоретико-информационное описание объектов, процессов и систем может быть построено на основе разных моделей: математических формульных соотношений, в виде структур информационных потоков, в виде концептуальных моделей (рисунок 13).

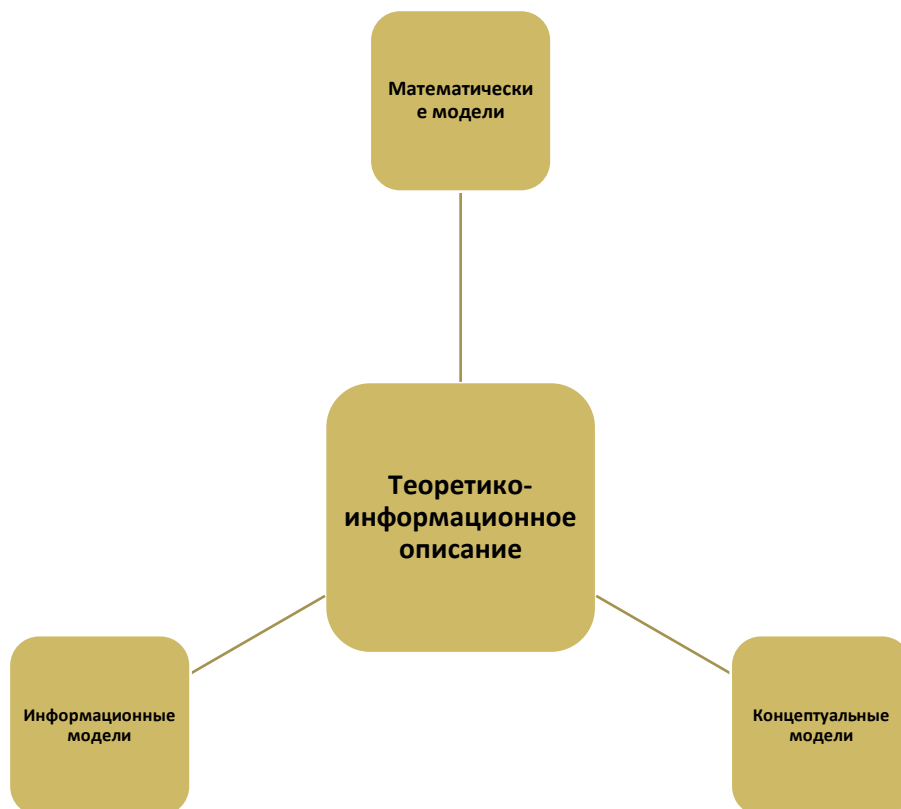


Рисунок 13. Некоторые виды теоретико-информационных моделей объектов, процессов и систем

Теоретико-множественный подход к созданию формализованного системного описания информационных объектов, процессов и систем

В качестве одного из основных подходов, применяемых при описании различных информационных объектов, процессов и систем, используется формализованное описание на основе теоретико-множественных представлений. Данный подход основан на применении теории множеств как описательного средства, и выполнении самого непосредственного исследования структуры системы, элементов и их взаимодействий.

Исследуемая система представляется в виде моделей на основе математических множеств, с выполнением дальнейшей детализации путем исследования ее структурных аспектов, элементного состава и параметров, характеризующих взаимодействия данных элементов. Применение теоретико-множественного подхода, базирующегося на основе математики и логик, позволяет выполнить сразу несколько задач исследования системы: описать структурно, выполнить анализ взаимосвязей на основе установления отношений между элементами системы, а также прояснить неявные закономерности в процессе исследования функционирования элементов данной системы [22, 23].

Основные принципы применения теоретико-множественного подхода при исследовании свойств информационных объектов, процессов и систем представлены на рисунке 14.

С точки зрения задачи определения понятий статическая система представлена в виде отношений с помощью абстрактных множеств, а временные и динамические системы – в качестве систем на множествах абстрактных временных функций.

Введение вспомогательных объектов и функций бывает необходимо для более детального описания системы через определения [24]. В качестве таких понятий обычно выступают состояние, глобальное состояние, а также глобальная реакция системы. Множественный анализ позволяет строить предположения о характере функционирования объектов, процессов и систем.



Рисунок 14. Основные принципы теоретико-множественного анализа объектов, процессов и систем

Процессы преобразования множеств осуществляются путем установления соотношений между элементами изначально разных множеств. При применении данного подхода из двух или более множеств можно путем преобразований сформировать новое множество, состоящее из принципиально разных элементов и связей – отношений между ними [25].

При выполнении методов и процедур теоретико-множественного анализа объектов, процессов и систем, вводятся новые термины теории систем на теоретико-множественном уровне, а также устанавливаются связи между ними. При использовании подобного подхода систему можно определить, как некоторое отношение на абстрактных множествах.

Результаты выполненных исследований по теоретико-множественному анализу обычно представляют в виде схем, которые отражают структуру системы и ее взаимодействие с другими элементами. Также результаты теоретико-множественного анализа объектов, процессов и систем удобно представлять в виде таблиц. Табличные формы представления подробно отображают свойства элементов систем.

Теоретико-множественный анализ применяется в процессах исследования сложных систем. Данный подход позволяет выполнять структурный анализ различных систем, выявлять системные связи и закономерности в процессах развития и функционирования элементов систем и/или объектов [26, 27].

Применение теоретико-множественного подхода при анализе и изучении различных проектов позволяет осуществлять построение институциональных моделей управления проектами за счет построения математических символических (знаковых) моделей формального описания отдельных элементов – составляющих целого проекта: виды и этапы работ, требующиеся ресурсы, расчет издержки, анализ эффективности и учет возможных рисков.

Теоретико-множественное представление объектов, процессов и систем позволяет также проводить анализ функционирования сложной нелинейной системы — с помощью формального языка в виде описания строятся математические модели оценки функционирования системы в статических и динамических режимах работы при большом многообразии внешних воздействий и смене состояний [28, 29].

Описание различных объектов, процессов и систем на основе множеств – один из подходов в теории систем и системном анализе, позволяющий определить исследуемую систему с помощью абстрактных множеств [30, 31]. Подобный принцип позволяет не учитывать физическую природу составляющих систему элементов и формализовать определенный набор признаков, характеризующих ее сущностные свойства и состояния [32]. При этом целью является формирование нескольких определений системы и последующий выбор приоритетного описания. С помощью теории множеств создают описание систем в виде «черного ящика», в данном случае исследуемая система представлена набором элементов (компонентная модель состава) и отношений между ними (модель структуры системы) [33-35]. Некоторые области применения теоретико-множественного подхода приведены на рисунке 15.

Теоретико-множественный подход

Исследования сложных систем

Построение
институциональной
модели управления
проектом

Анализ
функционирования
сложной
нелинейной
системы

Применение в
математике

Применение в
информатике

Рисунок 15. Некоторые области применения теоретико-множественного подхода.

Визуально теоретико-множественное описание системы может быть представлено в виде диаграмм Эйлера или символически в виде конструкций перечисления множеств, например, в виде скобочной нотации В.А. Мелентьева. Подобное представление по сути является системной информационной моделью и записывается в виде иерархической структуры – системы объединения кортежей в скобочной форме [36, 37].

2.3. Методология моделирования процессов и систем на основе описательных средств – информационных моделей уровневой формализации

Создание информационного описания процессов и систем на основе модельных представлений реализуется на различных уровнях формализации и заключается в построении комплекса различных моделей [38]. Информационное моделирование процессов и систем располагает набором инструментов создания формализованного описания, реализуемого согласно алгоритму, предложенному на рисунке 16 [39]. Вначале четко формализуется постановка исходной задачи с учетом специфики предметной области - области информационного моделирования [40, 41]. Далее проводится построение вербальной модели проблемной области, которое обычно представлено в двух видах: словесная форма (текстовое описание) и табличная (матричная) вербально-семантическая модель процессов и систем [42, 43].

На основе созданного семантического описания процесса или системы проводятся процедуры структурного системного анализа, заключающиеся в исследовании системы на основе набора построенных информационных контекстных диаграмм - результата выполнения процесса функционального моделирования в нотации SADT/IDEF0 [44]. Данный этап начинается с построения обобщенной функциональной схемы процесса или системы, где действия и составляющие функциональные подпроцессы подробно не детализированы [45]. Далее полученная обобщенная контекстная диаграмма с целью более глубокой детализации, подвергается функциональной декомпозиции - основной процесс раскладывается на составляющие функциональные подпроцессы, представленные на диаграмме декомпозиции в виде набора блоков - функций системы. Уровень детализации, а соответственно, глубина процессно-функциональной декомпозиции, а также число уровней определяются исследователем, целями и задачами, которые он преследует [46, 47]. Каждый функциональный блок, представляющий собой конкретный подпроцесс, также может быть подвергнут процессу

декомпозиции. Таким образом, функциональное моделирование процессов и систем является уровневым, иерархическим формализованным описанием, реализуемым с помощью языка визуального моделирования. Функциональные диаграммы декомпозиции, полученные в ходе структурного информационного моделирования, должны быть подвергнуты процессу верификации [46-49]. Процесс верификации представляет собой проверку корректности построения пары функциональных моделей - обобщенной родительской диаграммы и соответствующей ей диаграммы декомпозиции, связанной отношением детализации, с учетом проверки корректности построения и соответствия стрелок данных диаграмм. Формализация правил такой проверки формулируется на основе теоретико-множественных представлений контекстных диаграмм в виде графовых моделей отображения. Выполнение процесса верификации является залогом корректности проведения процесса декомпозиции с учетом требуемого уровня детализации процесса или системы [50]. Алгоритм функциональной проверки представляет собой набор формальных правил, обязательных к исполнению. Программно данные действия реализуются с помощью языков логического программирования [51].

Построенный комплекс моделей, представляющий собой набор структурированных диаграмм, дает некое информационное описание объекта моделирования - оригинала, т. е. изучаемого процесса или системы.

Следующим этапом информационного моделирования процессов и систем является разработка математического обеспечения процесса или системы, представленного в виде математических моделей описания состояния. Математическое описание, как правило, представляется в виде аналитически заданных соотношений между переменными и функцией-откликом. Полученные модели описания систем на основе математических представлений, обязательно проходят проверку на адекватность - степень соответствия оригиналу [52, 53]. Процедура проверки математических моделей на адекватность является статистической, и реализуется с помощью

параметрических критериев. Построенное формализованное описание процессов и систем в дальнейшем используется для выполнения различных задач - прежде всего, это решения задачи управления, а также анализа, обучения и прогнозирования с учетом специфики предметной области знаний [54, 55].

Корректно выполненные вербальные, функциональные и математические модели процессов и систем составляют их информационное описание на основе формальных языков, и составляют конечную цель процессов моделирования предметной области с учетом выбранного уровня детализации [56, 57].

Предложенный комплекс моделей, характеризующих состояния процессов или систем, является основой для создания так называемого цифрового двойника, или цифровой модели, и может быть использован в целях обучения персонала, моделирования различных состояний объектов и систем, а также при проведении системных исследований, направленных на автоматизацию и оптимизацию процессов [58].

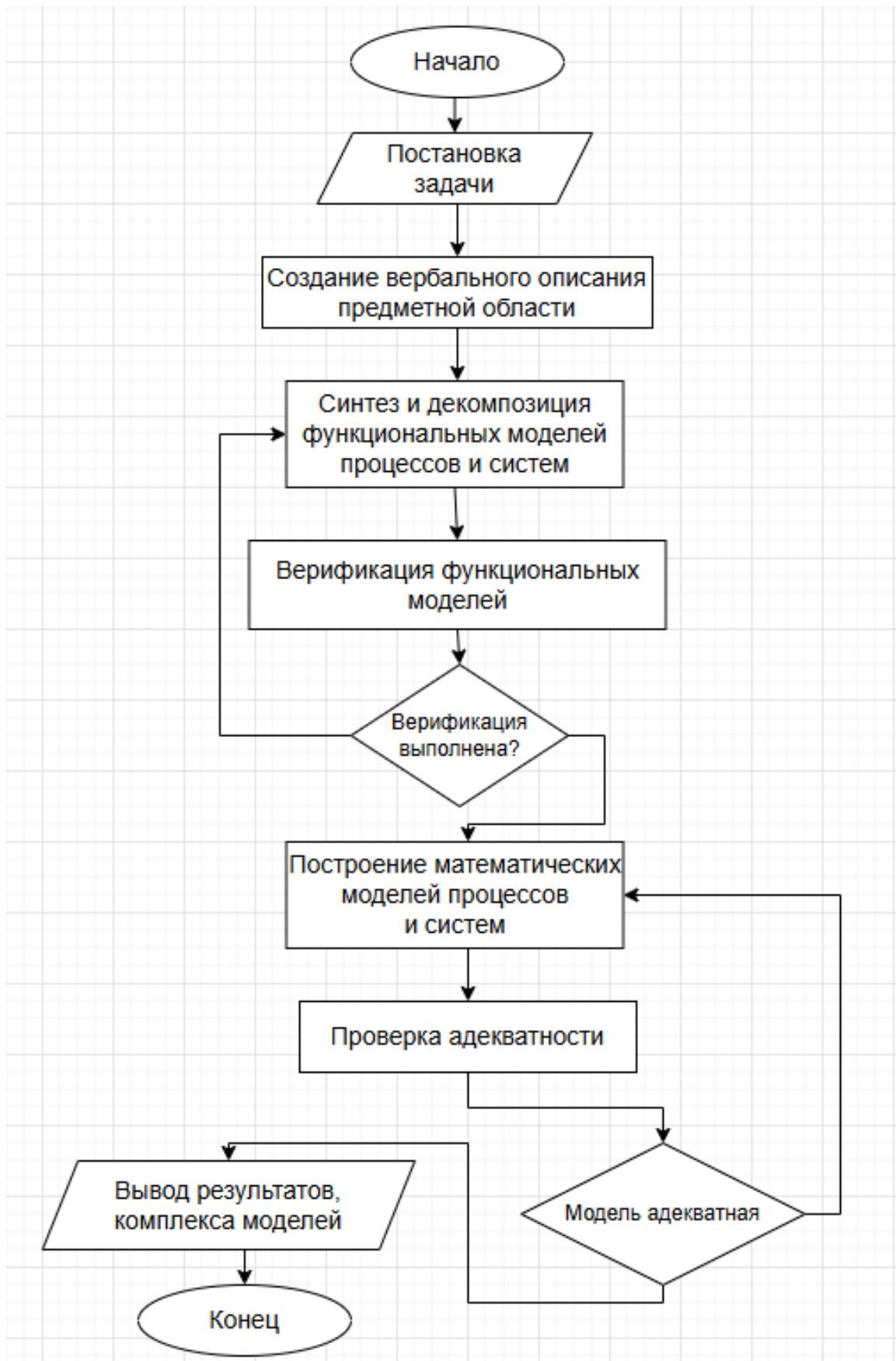


Рисунок 16. Блок-схема алгоритма создания формализованного описания на основе комплекса моделей процессов и систем

2.4. Основы подходы и системные принципы моделирования процессов и систем

При решении задачи создания формализованного описания процессов и систем исследователю необходимо руководствоваться набором основных подходов к созданию информационных моделей и систем. Среди основных подходов при проведении системных исследований в литературе обычно выделяют функциональный, структурный, системный, процессный и ситуационный подходы. (рисунок 17).



Рисунок 17. Основные подходы к моделированию процессов и систем

Функциональный подход основан на построении модели каждого элемента на основе анализа поведения без привязки к структуре исследуемой системы. Данный подход предполагает рассмотрение набора функций и алгоритмов поведения системы. Спецификой функционального подхода является тот факт, что каждая выбранная отдельная функция описывает поведение одного свойства- признака в процессе внешнего воздействия.

Структурный подход реализуется в процессе моделирования структуры системы путем ее разбиения (членения) на подсистемы и выделения конечных элементов. Таким образом, в процессе структурного анализа и моделирования процессов и систем выявляется и формируется совокупность элементов и связей, дающая информацию о свойствах рассматриваемой части системы.

Системный подход представляет собой отдельное направление в методологии научного познания. Основу системного подхода составляет описание и исследование объектов как систем. Данный научный метод позволяет рассмотреть явления, объекты и процессы как составляющие элементы более сложной структуры – системы. Применение системного подхода направлено на исследование взаимосвязей между компонентами, и обнаружения скрытых, неявных закономерностей.

Системный подход использует ряд категорий, представленных на рисунке 18.



Рисунок 18. Основные категории в системном подходе

Исследование объектов, процессов и систем с позиций системного подхода предполагает, что любая система представлена совокупностью взаимосвязанных элементов, имеет выходную характеристику (цель), входную характеристику (ресурсы), связь с внешней средой, а также контур обратной связи. Данный подход реализует требования из общей теории систем, где каждый объект в процессе исследований рассматривается в качестве сложной системы и так же как элемент более общей системы [59-60].

Процессный подход представляет собой методологию управления, в рамках которой деятельность компании может быть представлена в виде

группы взаимозависимых и взаимодополняющих бизнес-процессов предприятия. Применение процессного подхода подразумевает такие действия как выделение, описание, оптимизацию и стандартизацию всех или наиболее важных бизнес-процессов компании и их взаимосвязей. Центральным понятием в процессном подходе является процесс, который можно определить, как набор взаимосвязанных действий [61].

Ситуационный подход представляет собой набор действий, направленных на управление объектами, процессами или системами в рамках конкретных переменных обстоятельств. Основное понятие ситуационного подхода в управлении – ситуация, определяемая как комплексная характеристика обстоятельств, влияющих на результаты деятельности. Концепция ситуационного подхода в управлении основана на отсутствии универсального инструмента в виде метода управления в системе организации. При этом, как правило, в процессах управления, реализуется именно тот метод. Который является эффективным в каждой конкретной ситуации.

Описанные выше подходы являются основополагающими в процессах моделирования процессов и систем. Также в процессах системных исследований существует определенный набор принципов. При проведении системных исследований нам необходимо опираться на перечень основополагающих принципов, представленных на рисунке 19.



Рисунок 19. Принципы системных исследований.

Принцип последовательной дедукции Данный подход предполагает рассмотрение особенностей описания системы при движении от общего к частному в процессе ее изучения. Система изначально рассматривается как единое и неделимое целое, а уже затем выполняется последовательный анализ составляющих ее частей с описанием связей между ними.

Принцип интеграционного рассмотрения Данный принцип предполагает необходимость детального изучения не только отдельные элементы системы, но также исследования особенностей их взаимодействия. Особое внимание уделяется эмерджентным свойствам системы — тем характеристикам, которые возникают только при объединении элементов в единое целое.

Принцип координации ресурсов Этот подход показывает целесообразность эффективного использования всех имеющихся средств для достижения поставленной цели исследования. Данный принцип особенно важен при проведении исследований свойств больших систем, потребляющих значительное количество времени и ресурсов.

Принцип конечной цели Данный принцип подразумевает приоритет конечной, четко поставленной цели, причем вся деятельность системы должна быть направлена на ее достижение.

Принцип единства Применение данного принципа показывает необходимость рассмотрения системы как единого целого, состоящее из отдельных, связанных между собой определёнными отношениями структурных единиц системы - конечных элементов.

Принцип связности В рамках данного подхода рассмотрение любой части совместно с её окружением подразумевает проведение процедуры выявления связей между элементами рассматриваемой системы и выявление связей с внешней средой.

Принцип модульного построения В данном подходе последовательно анализируются и вычленяются модули исследуемой системы и рассматривается их связанная совокупность.

Также при проведении системных исследований применяются такие принципы как *принцип иерархии, принцип функциональности, принцип развития, принцип децентрализации и принцип неопределенности.*

Принцип иерархии предполагает ранжирование составляющих функциональных подсистем, причем эти системы могут обладать разной степенью детализации.

Принцип функциональности применяется для рассмотрения совокупности структурных и функциональных особенностей системы. В данном подходе заявляется приоритет функций над структурой. Применение данного принципа предполагает, что структура исследуемой системы неразрывно связана с набором функций данной системы и/или ее составляющих частей – элементов [62].

Все возможные изменения в изучаемой системе должны учитываться при создании ее описания. Принцип развития учитывает возможность мониторинга таких изменений, адаптацию и расширение системы [63].

Принцип децентрализации используется для изучения возможности сочетания в сложных системах централизованного и локального (местного) управления в качестве двухуровневой иерархической модели управления [64].

Принцип неопределенности представляется как дополнительная возможность описания и организации управления системой с неявно заданными структурой, функционированием и внешними параметрами воздействия [65].

Рассмотренные принципы и подходы являются основополагающими при реализации процессов информационного анализа и моделирования процессов и систем [66-69]. Применение данных принципов необходимо для грамотного решения задач системного анализа, формализации и моделирования [70].

Глава 3. Эволюция средств визуального моделирования сложных систем на основе графовых представлений

3.1. Графовые структуры и их применение

Современные подходы к созданию визуальных информационных моделей объектов, процессов и систем базируются на теории графов и их представлений. Графы являются одним из наиболее удобных средств визуального отображения структурных особенностей систем. Графовый подход позволяет учитывать специфику структуры различных систем и эффективно отображать изменения, связанные со структурной динамикой. Также графовые представления широко применяются для анализа и построения взаимосвязей типа структура – свойство при описании различных систем. Основные типы графовых структур представлены на рисунке 20.

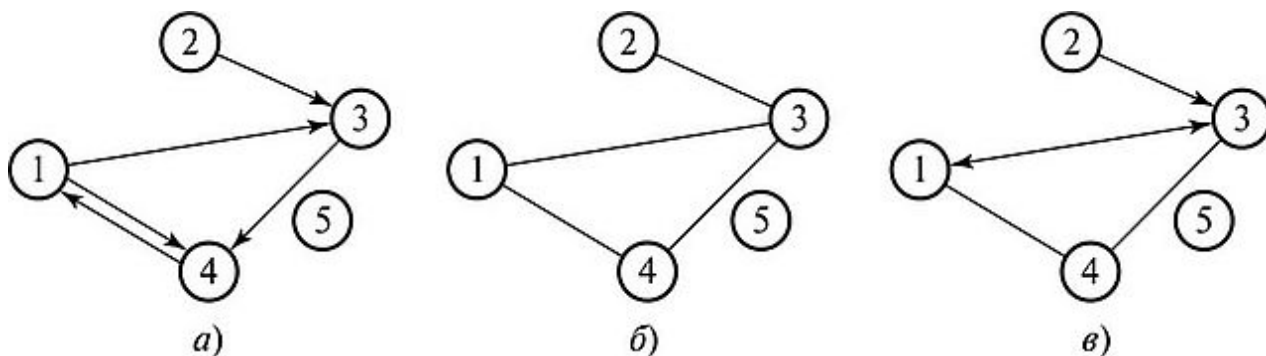


Рисунок 20. Основные виды графовых структур [68]:
а) - Ориентированный, (б) - неориентированный и (в) - смешанный граф

Теория графов и их представлений – отдельный раздел дискретной математики, который представляет собой системное описание графов и их свойств. Теория графов достаточно широко применяется в решении социальных и экономических задач [71, 72]. Подобные подходы также применяются в химии, конструировании, изучении процессов в электричестве и цепей, коммуникации, психологии, лингвистике и т.д. [73]. Графы также используются для визуального отображения и представления отношений на множествах. Графовые отношения на множествах представляют собой

формализованное описание свойств различных объектов, а также их взаимосвязи на основе математических структур [74].

Графовый подход также используется в системном анализе при построении моделей многоуровневой классификации объектов и их визуального представления. Одним из примеров использования теории графов и их представлений в системном анализе является создание визуальных иерархических моделей классификации в виде мультииерархий. Области применения графовых структур как инструментов визуализации и формализации задач достаточно разнообразны, и представлены на рисунке 21. В сетевом проектировании графовые структуры применяются для описания сетевой топологии, визуально отображающую сетевую инфраструктуру. В логистике описание на основе графовых моделей помогает строить различные транспортные сети, решать задачи распределения грузов, выбирать и синтезировать оптимальные логистические маршруты, решать практико-ориентированные задачи управления логистикой и управления цепями поставок предприятий промышленности.

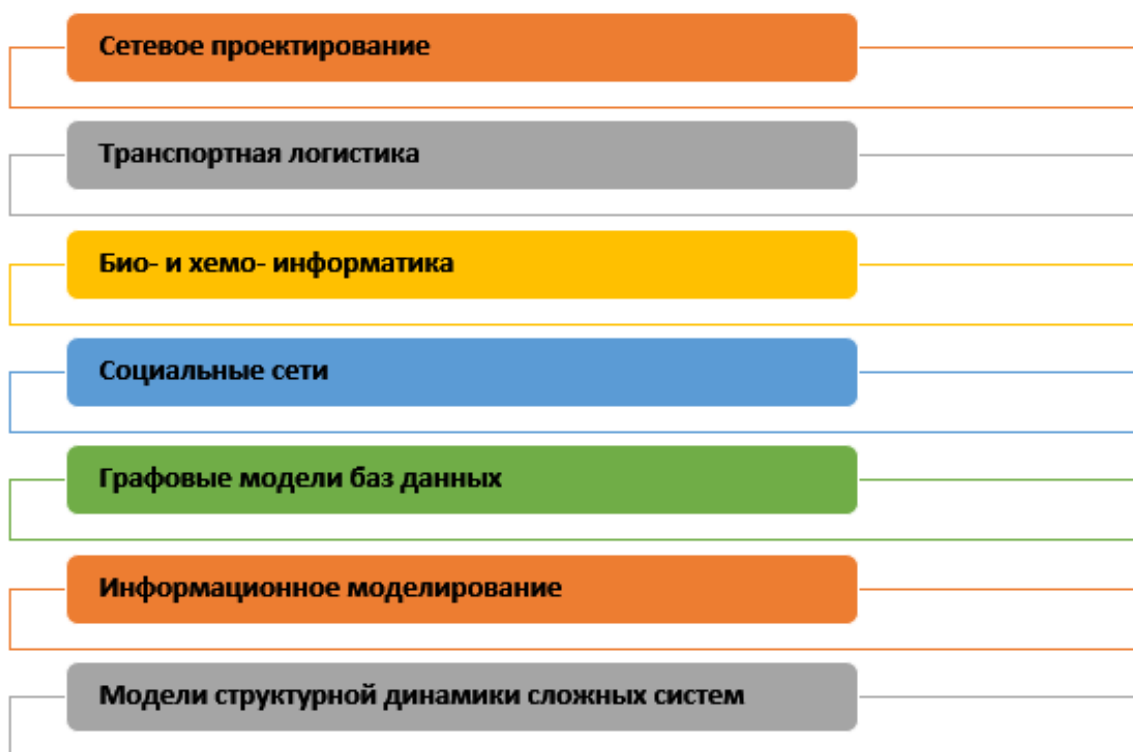


Рисунок 21. Многообразие областей применения графовых структур

Графовый подход в исследованиях различных объектов, процессов и систем предполагает также возможность построения графовых скобочных образов, данный подход впервые был предложен В.А. Мелентьевым, разработанная им скобочная нотация реализуется на основе теоретико-множественного представления исследуемых объектов, процессов и систем.

В химической и био- информатике графы и средства их представлений помогают проводить анализ биологических сетей и их взаимодействий, а также моделировать зависимости по типу взаимосвязи структура – свойство (QSAR – моделирование) [75, 76]. В социальных сетях представления на основе графов позволяют формализовать связи и взаимодействия между пользователями [77].

Теория графов и их представлений хорошо подходит для решения практических задач визуального представления различных сложных взаимодействий. Теория графов служит универсальным инструментом графического представления задач, процессов и алгоритмов в информатике и программировании. Также теория графов позволяет исследовать связи между различными сущностями. Такой подход получил название графового анализа, методологии, позволяющей исследовать структуру графа (структурный анализ), что позволяет распознать неочевидные, неявные зависимости [78].

В решении задач графового анализа помогает применение так называемых графовых сетевых алгоритмов. По решению задач их можно условно классифицировать на несколько подтипов [79]. На рисунке 22 представлена классификация подтипов сетевых графовых алгоритмов.



Рисунок 22. Основные подтипы графовых сетевых алгоритмов

Обнаружение сообществ (community detection) - это выявление тесно взаимосвязанных между собой отдельных групп людей. Это семейство алгоритмов является своего рода аналогом процесса кластеризации.

Алгоритмы центральности (centrality algorithms) помогают определять лидеров мнений и влиятельных людей в различных сообществах. Под центральностью имеется в виду некая мера значимости вершины или ребра. Алгоритмы центральности и сообществ можно применять для создания новых предикторов в ML-pipeline.

Предсказание связей (link prediction) оценивает на основе вероятностных представлений и подходов возможность наличия связи между двумя отдельными людьми в том случае, если её не существует на графе. Связи, подобранные таким образом, могут помочь в рекомендации друзей.

Алгоритмы сходства (similarity algorithms) пригодятся, чтобы найти похожие группы людей, например, по интересам. Это может быть полезно, чтобы собрать аудиторию для рекламы по принципу lookalike или выявить поддельные учетные записи, основываясь на свойствах их окружения.

Поиск путей (path detection) позволяет найти кратчайшую цепочку знакомств между различными людьми. В качестве меры расстояния (весов ребер) можно использовать характеристики взаимодействия пользователей - например, частоту их общения.

Графовый анализ позволяет нам организовать новые средства и инструменты визуального взаимодействия с привычными данными [79, 80]. Подобный подход позволяет решить сразу несколько задач при работе с данными: эффективная визуализация статических и динамических наборов данных; генерация новых подходов к машинному обучению на основе создания новых признаков; анализ объектов с учетом их окружения по типу сущность – связь [81]. Для работы с графами существует несколько программных решений – это графовые системы управления базами данных, программные средства и инструменты эффективной визуализации, программные библиотеки – модули для языков программирования высокого уровня. При этом графовые представления, и алгоритмы являются дополнительным визуальным инструментом решения практических задач в различных отраслях науки, техники и технологий.

Для реализации идей визуального моделирования на практике используется графовая метафора визуализации. Данный подход основан на представлении моделей в естественной и понятной для человека форме. В основе графовой метафоры представления информации лежит граф, вершины которого соответствуют основным элементам рассматриваемого объекта, системы или ситуации, а рёбра между вершинами — отношениям между соответствующими элементами. Данный подход является общепринятым, на сегодняшний день именно графовая метафора является основным системным базисом в визуальном моделировании процессов и систем. Метафора визуализации графовых моделей представляет собой связанную совокупность в виде набора принципов переноса элементов и атрибутов исходного объекта в некоторое пространство визуальной модели [82].

Метафора визуализации представляет собой набор из двух составляющих частей, которые применяются последовательно: пространственная метафора и метафора представления (Рисунок 23).

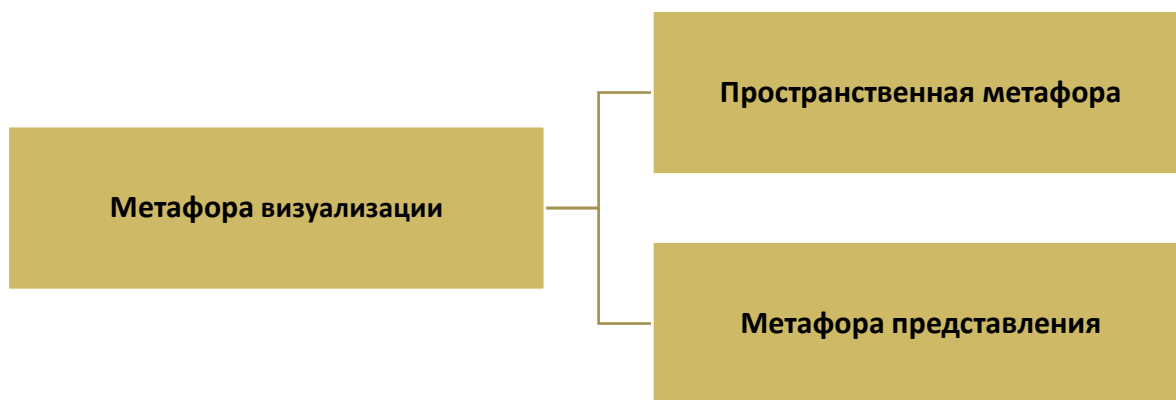


Рисунок 23. Составляющие метафоры визуализации

Пространственная метафора рассматривается как характеристика общих принципов и особенностей построения информационной модели на основе визуализации, и задает вид и описание размерности пространства отображения модели, а также взаимное расположение элементов модели. Метафора представления представляет собой уточненную характеристику самого визуального образа, и применяется с целью графической интерпретации как описания определенных свойств изучаемого объекта, причем данные свойства являются наиболее значимыми на текущей стадии анализа [83, 84]. Обе данные составляющие способствуют значительному повышению когнитивной ясности графического представления – визуальной модели [85-87] (Рисунок 24).

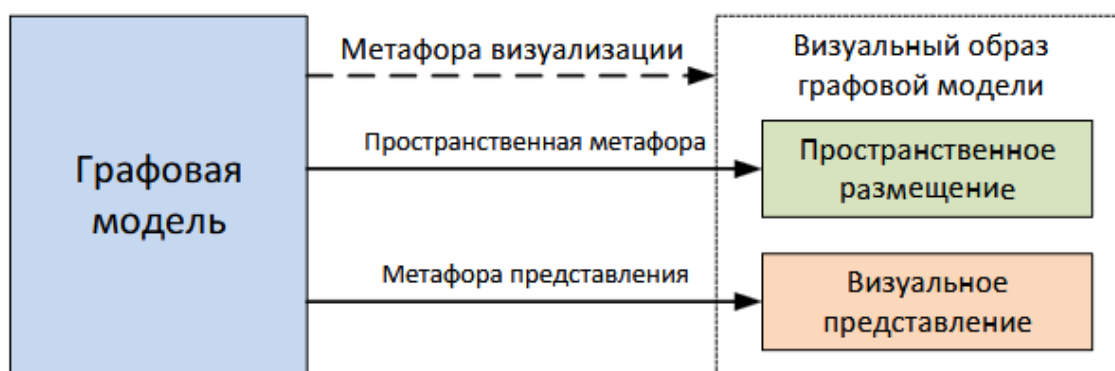


Рисунок 24. Визуализация графической модели на основе метафоры

Метафора визуализации является одним из способов сопоставления абстрактных моделей и окружающей действительности. При создании визуальных моделей описания процессов и систем изображается их видение на основе стандартизированных представлений – набора инструкций, принципов построения и формализованных правил отображения и представления различных объектов. Данный подход приводит к пониманию понятия формальных языков – языков визуального моделирования объектов, процессов и систем. Визуализация формальных моделей процессов и систем использует разнообразные формы наглядного представления и анимации при создании информационных моделей (рисунок 25). По мере развития графических средств визуализации происходило усложнение визуальных информационных моделей [88].



Рисунок 25. Различные формы наглядного представления процессов и систем средствами информационного моделирования

Процесс построения информационных моделей на основе формальных языков визуального моделирования называется формализацией. Визуальные модели служат инструментом формализованного описания бизнес-процессов предприятий, используются для проектирования и разработки программных систем. Основные виды графовых моделей представлены на рисунке 26.

Все эти средства предоставляют формализованные варианты решения задачи *информационной репрезентации*. Специфика решения задач с помощью средств информатики и вычислительной техники заключается в создании так называемого *цифрового представления* объекта в виде *информационного образа* исследуемой системы.

Каждый конкретный вид графовых моделей имеет определенную структуру, на основе которой достаточно легко можно создать формальное описание. При этом элементам модели соответствуют конкретные атрибуты, которые могут содержать в себе более простые атрибуты, включая области допустимых значений и интерпретацию. Такие атрибуты отражают некоторое параметрическое пространство графовой модели, и являются либо входными, либо выходными переменными для рассматриваемой системы.



Рисунок 26. Примеры графовых моделей

3.2. Информационная репрезентация

Информационная репрезентация представляет собой графическое описание исследуемого объекта, процесса или системы. Данное схематическое описание может хранить и передавать данные в визуальной форме. На рисунке 27 представлены базовые системные категории, являющиеся компонентами информационной репрезентации. Представленная на рисунке 27 базовая компонентная структура информационной репрезентации включает в себя: характеристику источников исходных данных; средства и способы визуального представления данных; методы и инструменты обработки и интеллектуального анализа данных, а также средства и механизмы передачи данных, реализующие функцию трансляции информации. Структурный блок способов представления данных выделен отдельно с учетом специфики и разнообразия графических средств и языков визуального моделирования процессов, объектов и систем.



Рисунок 27. Системные компоненты информационной репрезентации

Визуализация элементов и атрибутов различных типов с помощью различных выразительных средств является достаточно явным и интуитивно

понятным способом представления. Графовая модель описания системы в целом визуализируется путем создания визуального представления, т.е., совокупности визуальных образов элементов модели, визуальные признаки которых отражают атрибуты этих элементов. Данный способ визуализации можно более формально понимать, как установление соответствия между конкретным типом элемента (атрибута) и конкретным типом визуального образа (визуального признака), а метафору представления в целом – как необходимую совокупность таких способов визуализации.

Таким образом, модели визуализируются с помощью создания визуального образа исследуемой системы. Модельные визуальные описания служат для сжатия представляемой информации, моделирования динамических процессов и явлений, являются важным инструментом деловой коммуникации и передачи знаний. Основное назначение визуальных моделей – оптимальное представление исходной информации для визуального анализа и оперативного принятия управленческих решений. При этом визуальное моделирование, рассматриваемое как один из методов формализованного описания систем, представляет собой упрощенное описание предметной области.

Эволюция графических средств образного описания процессов и систем привела к появлению формальных языков визуального моделирования. Единого функционального визуального описания на сегодняшний день не существует, поэтому существует сразу несколько формализованных языков. Отличающихся способами представления предметной области в рамках установленной методологии и нотаций. Нотация представляет собой стандартизированное визуальное представление элементов информационной модели – систему обозначений. Методологии визуального моделирования, представляющие собой стандартизированные описания правил визуализации моделей процессов и систем, будут рассмотрены в следующей главе.

Глава 4. Визуальные модели состояния процессов и систем

4.1. Классификация средств визуального моделирования

Визуальное моделирование – универсальный инструмент исследования процессов, систем, и одновременно – виртуальная среда разработки программного обеспечения. Визуальные модели процессов и систем отличаются разнообразием графического представления. Необходимо отметить, что визуальные языки возможно применять без какой-либо инструментальной поддержки, если целью является только разработка визуальной модели передачи информации. Тогда для решения этой задачи достаточно лишь описания легенды – пояснений, определяющих значение применяемых символов. Подобный подход очень часто используется на первом этапе создания графических описаний процессов, объектов и систем, и является визуальным представлением модели на основе «неформальных» языков. Необходимость в стандартизированном формальном описании визуального языка обнаруживается вместе с потребностью в его инструментальной поддержке – когда уже для создания модели требуется программный продукт, поддерживающий нотации методологий визуального моделирования [89, 90]. Функционал визуального моделирования обеспечивается при помощи методов, формализованных языков и программных инструментов. Семейство языков визуального моделирования содержит несколько нотаций и представлено на рисунке 28. Языки визуального моделирования, представленные на рисунке 28, входят в группы методов моделирования RUP/USDP, Use Case, SADT, которые, в свою очередь, реализуются с помощью программных решений стандартного или предметно-ориентированного типов [91, 92].



Рисунок 28. Семейство языков визуального моделирования

Визуальное моделирование применяется для решения практических прикладных задач с помощью специальных методов, формальных языков и соответствующих программных инструментов [93].

Языки визуального моделирования, также упоминаемые в литературе как визуальные языки, представляют собой строго формализованные наборы графических символов и инструкции по построению из них визуальных моделей. Сейчас известны и активно используются на практике такие языки визуального моделирования, как UML и BPMN. Однако существуют и более старые языки: SDL и MSC для моделирования телекоммуникационных систем, SADT/IDEF0 для моделирования бизнес-процессов, IDEF1x для моделирования баз данных и некоторые другие [94]. Кроме того, в исследовательской среде создано множество других визуальных языков, например, язык WebML для моделирования web-приложений [95].

Методы использования средств визуального моделирования представляют собой методологическую основу в виде набора формальных правил применения визуальных языков для решения прикладных задач [96].

Среди современных методов визуального моделирования, пожалуй, самым широко распространенным является RUP/USDP - промышленный метод создания ПО, использующий UML практически на всех стадиях и во всех видах деятельности разработки. RUP/USDP является достаточно тяжеловесным методом применения UML: он содержит множество

предписаний, непростую последовательность шагов, определяет разные роли участников, охватывает все стадии разработки ПО. Его внедрение в процесс компании требует значительных затрат и существенной перестройки принципов ее работы.

Существуют и легковесные методы применения языка UML, которые не имеют жестко формализованных предписаний и допускают гибкость и вариативность при практическом применении. Примером может служить метод случаев использования, применяемый для выявления и первичной формализации требований к программной системе. Это метод будет описан далее, в разделе, посвященном языку UML.

Наконец, специализированные программные инструменты позволяют удобно работать с визуальными языками и пользоваться тем или иным методом их применения. Это прежде всего графические редакторы, а также средства валидации моделей, генераторы конечного кода по визуальным диаграммам и т.д. [97-99]. Применение специального программного обеспечения призвано облегчить процессы создания и редактирования графических моделей, минимизировать ошибки при их проектировании, способствовать более глубокому пониманию особенностей конкретных методологических подходов к созданию визуальных моделей путем применения формальных конструкций – языков моделирования.

4.2. Формализация информационных моделей процессов и систем на основе языков визуального моделирования

В общем представлении технологии информационного моделирования рассматриваются как набор инструментальных средств процессов познания, прогнозирования и управления информацией. В первом представлении, не касаясь конкретных особенностей конкретных языков визуального моделирования, методологий и нотаций, можно рассмотреть информационное описание объекта моделирования – оригинала в качестве некой цифровой модели, создаваемой при помощи кода с применением персонального

компьютера [100, 101]. Простейший набор для такой модели включает себя набор следующих категорий (рисунок 29): элементы изучаемого объекта; набор структурных характеристик модельной системы - связи между ее элементами, совокупность входных и выходных параметров; протекающие внутри данной модели процессы (так, например, реализуется моделирование бизнес-процессов предприятий).



Рисунок 29. Составляющие цифровой информационной модели

Представленные на рисунке 29 базовые компоненты информационной модели представляют собой так называемые системные составляющие, получаемые в ходе структурных исследований и функциональной процессной декомпозиции изучаемой системы. Данный подход является основополагающим, базовым при разработке модельных представлений в виде формализованных описаний с применением формальных языков визуального моделирования процессов и систем.

При создании модельных описаний необходимо, конечно же, придерживаться базовых принципов формализации и моделирования процессов и систем: принципа абстрагирования; принципа формализации; принципа непротиворечивости; принципа структурирования данных; принципа параметрической таксономической классификации (рисунок 30).

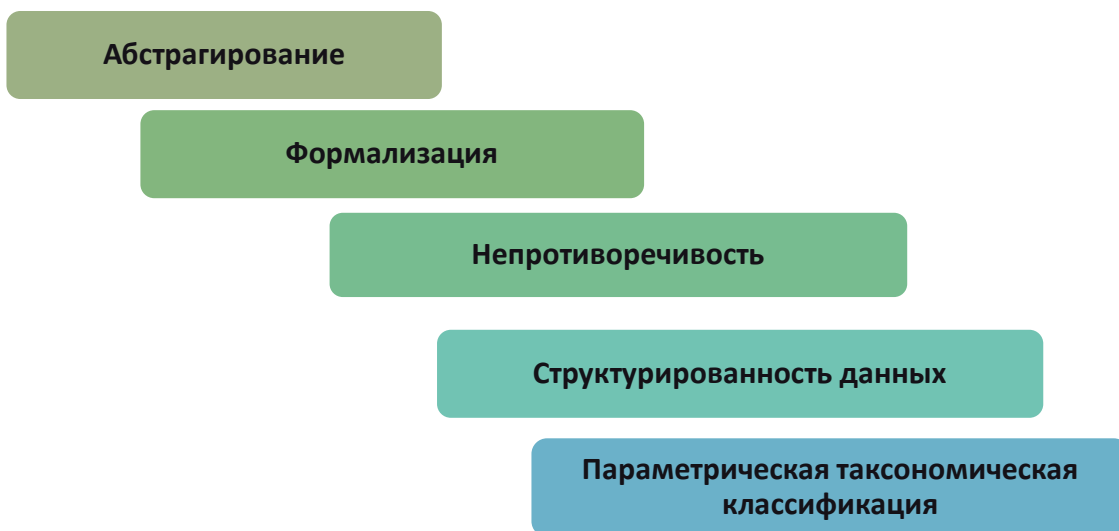


Рисунок 30. Системные принципы формализации и моделирования

Принцип абстрагирования при создании формализованных описаний объектов и систем, реализуется за счет выделения лишь только наиболее существенных аспектов системы, соответствующих целям и задачам моделирования и отбрасывания несущественных переменных. Принцип формализации продиктован необходимостью создания строгого научно-методического подхода к решению проблемы. Принцип непротиворечивости в данном подходе реализуется за счет обоснованности и согласованности элементов – компонентного состава системы. Принцип структурирования данных требует от исследователя того, чтобы данные были четко структурированы и иерархически организованы. Принцип параметрической таксономической классификации предполагает, что свойства элементов и связей, используемых для создания объектной модели системы, определяются категориальной иерархией классов, учитывающей эти свойства. Данный подход является одним из форм систематизации знаний. Формализация выполняется за счет системы количественно исчисляемых понятий, объекты идентифицируют на основе измеряемых или исчисляемых величин [102].

Формализация процессов и систем сводится к выполнению задачи замены реального исследуемого объекта его информационной моделью. Важной характеристикой информационной модели является возможность ее

практической реализации с помощью персонального компьютера [103]. При этом последовательно выполняется вначале описательная информационная модель на естественном языке, а потом происходит процесс ее формализации – представление с помощью формальных языков математики, логики и т.д. [104].

Формализация в информатике подразумевает представление информации, связанной с выбранным набором свойств (атрибутов) в определенной форме (рисунок 31).

Постановка исследователем любой научной задачи заключается в том, чтобы трансформировать словесное вербальное описание в формализованное. При этом системное изучение любого объекта или явления невозможно без выполнения процесса моделирования. Для исследования процессов и систем в науке заложена достаточно прочная методологическая основа, представленная в виде набора разнообразных методов моделирования (рисунок 32). При этом, как видно из рисунка 32, графические методы моделирования систем выделены в отдельный класс [105-107].

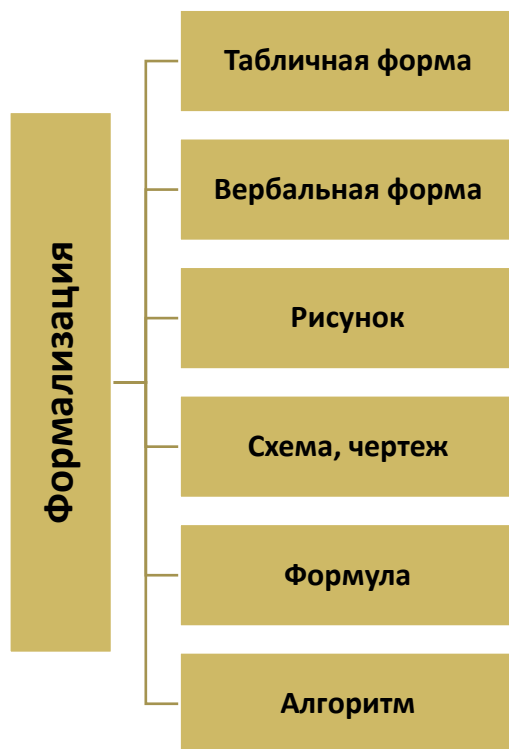


Рисунок 31. Средства формализации знаний в информатике



Рисунок 32. Методологическая основа процессов моделирования систем

[108]

Применение технологий визуального моделирования, естественно, сопряжено с некоторыми ограничениями, о которых необходимо упомянуть. Это, прежде всего, *метафора визуализации* – визуальная форма представления процесса, объекта или системы, естественно, всегда упрощенное его модельное представление, существенно отличающееся от оригинала [109-110]. Метафора визуализации есть результат некоторого компромиссного решения по графическому отображению, договорённость, касающаяся представления сущностей, объектов, связей, ключей, взаимодействий – для всего нужно обозначить границы формального представления в виде нотаций – системы обозначений в рамках методологии [111]. Методология визуального моделирования представляет собой некоторый стандарт. Таким образом, зная

систему обозначений, действующую в рамках стандарты, а также основные принципы формализации, всегда можно будет однозначно интерпретировать функциональную диаграмму, ту смысловую нагрузку, которую она несет в себе [112].

Все сказанное выше в предыдущем абзаце справедливо при соблюдении некоторого дополнительного условия – второго ограничения, которое в литературе принято называть «*точка зрения моделирования*» [113]. Точка зрения представляет собой рассмотрение системы с учетом специфики используемого формального языка моделирования. В данный термин также входят все соображения о назначении визуальной диаграммы. С учетом данной специфики, когда каждая диаграмма изображается для решения конкретной прикладной задачи, и происходит выбор типа диаграммы или формального языка.

Третье ограничение, вводимое нами в задачах визуального моделирования, получило название *семантического разрыва*. Так как модель всегда есть некое упрощенное представление реального объекта – системы, она не способна вместить в себя набор всех ее характеристик – свойств (атрибутов). Данное условие в задачах моделирования носит принципиальный характер, и обуславливает семантический разрыв между семантикой исследуемой системы и семантикой создаваемой модели [114].

При построении визуальных информационных моделей процессов и систем, естественно, необходимо учитывать данные ограничения.

На рисунке 33 представлена совокупность методов, применяемых в процессах информационного моделирования систем.



Рисунок 33. Некоторые методы информационного моделирования процессов и систем

Воображаемое или интуитивное моделирование является мысленным представлением об объекте. Данного рода модели формируются в воображении человека, и, по сути, являются исходной отправной точкой, предшествуя созданию материального объекта, а также его материальной и информационной модели [115].

Вербальное моделирование заключается в представлении информационной модели средствами естественного разговорного языка (фонемами). Форма представления такой модели — устное или письменное сообщение.

Структурное моделирование - процесс, который выполняется для создания наглядного изображения составных частей и связей объектов. Наиболее простые и распространённые информационные структуры — это таблицы, схемы, графы, блок-схемы, деревья.

Знаковое моделирование использует алфавиты формальных языков: условные знаки, специальные символы, буквы, цифры. Примеры: специальные языковые системы, физические или химические формулы, математические выражения и формулы, нотная запись и т.д.

Математическое моделирование представляет собой один из формализованных средств представления информационной модели, отображающий связь различных параметров объекта через математические формулы и понятия.

Компьютерное моделирование представляет собой процесс реализации информационной модели с помощью специализированного программного обеспечения с применением вычислительных средств.

4.3. Компьютерное моделирование процессов и систем.

Краткая характеристика программных средств информационного моделирования

Компьютерное моделирование - достаточно распространенный научный метод, который предлагает и предполагает решение прикладных задач анализа или синтеза сложной системы на основе исследования ее компьютерной программной модели. Процессы компьютерного моделирования сводятся к построению и вычислению компьютерных моделей систем.

Информационные модели процессов и систем реализуются при помощи персонального компьютера и создаются при помощи специального программного обеспечения - визуальных редакторов структурированных диаграмм.

Компьютерное моделирование позволяет изучать свойства различных систем. Компьютерные модели проще и удобнее исследовать. Стройность, логичность и достаточно высокая формализованность компьютерных моделей обуславливает достаточно высокую эффективность данного метода. Компьютерное и информационное моделирование является методологической основой проектирования и практического использования цифровых моделей объектов, процессов и систем [115, 116].

При исследовании процессов и систем с помощью метода компьютерного моделирования необходимо придерживаться основных принципов, представленных на рисунке 34.

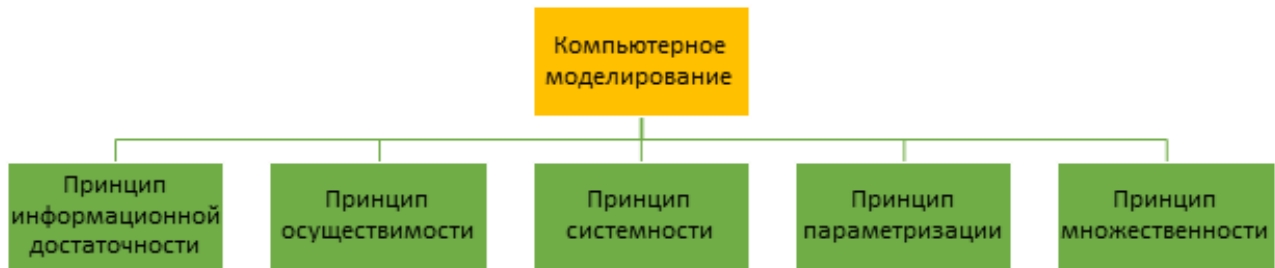


Рисунок 34. Базовые принципы компьютерного моделирования процессов и систем

Представленные на рисунке 34 составляющие отражают базовый набор принципиальных подходов к организации процесса компьютерного моделирования объектов, процессов и систем.

Принцип информационной достаточности призван отобразить определенный минимально необходимый уровень информационной обеспеченности, ниже которого построить модель не представляется возможным. При этом, в случае наличия полной информации об изучаемом объекте построение модели уже не имеет смысла, а при полном отсутствии информации построить ее невозможно. Минимально необходимый уровень информационного обеспечения, таким образом, является примером решения компромиссной задачи между двумя граничными состояниями информационного описания процесса или системы, для которых необходимо выполнить компьютерное моделирование.

Принцип осуществимости в процессах компьютерного моделирования вводится для того, чтобы обеспечить решение поставленной задачи исследования за конечное время.

Принцип множественности моделей при проведении компьютерного моделирования процессов и систем используется для повышения уровня детализации для создаваемых формализованных описаний. Различные модели строятся в рамках определенных подходов, заложенных методологией в виде нотаций - наборов формализованных правил и инструкций по представлению

предметной области. Применение разных моделей позволяет с разных точек зрения посмотреть на изучаемый объект, разные подходы необходимы для корректного отображения многообразия свойств - атрибутов реальной изучаемой системы или процесса. Множественность подходов в данном случае является весомым преимуществом применения процессов компьютерного моделирования систем.

Принцип системности предполагает последовательное применение системного подхода при исследовании и моделировании процессов и систем. Результатом применения системного подхода является представление исследуемой системы в виде связанной совокупности подсистем с учетом параметров из взаимодействия друг с другом. При этом, как правило, каждая отдельная конкретная подсистема может быть описана с помощью математических соотношений на основе математических методов. Исследуемая реальная систем (объект компьютерного моделирования и анализа), при этом не представляется в виде суммы свойств составляющих ее элементов, т.е. обладает свойств сверх аддитивности.

Принцип параметризации, как один из базовых системных факторов процесса компьютерного моделирования систем, дает возможность осуществлять замену некоторых относительно изолированных подсистем, охарактеризованных определенным параметром, на числовые величины в форме коэффициентов модели, опуская описание процесса их функционирования. Параметрически данные элементы могут задаваться в разном виде: в форме табличных описаний, графиков или аналитических выражений.

Применение принципа параметризации при решении задач компьютерного моделирования процессов и систем позволяет ускорить процесс разработки модели, повысить гибкость процесса моделирования и проектирования, снизить стоимость разработки компьютерной модели, автоматизировать процессы компьютерного моделирования и проектирования.

Компьютерное моделирование различных объектов, процессов и систем применяется в самых различных областях, прежде всего, это процессы автоматизированного проектирования систем, организация и моделирование работы компьютерных сетей, организация и цифровое моделирование работы транспортных систем, компьютерное моделирование в задачах охраны окружающей среды – цифровая экология, а также для решения экономических задач, например, управления ресурсами предприятия, автоматизация управления технологическими и другими процессами [117]. При решении задач компьютерного моделирования осуществляется замещение объекта моделирования – оригинала его компьютерной моделью (рисунок 35).

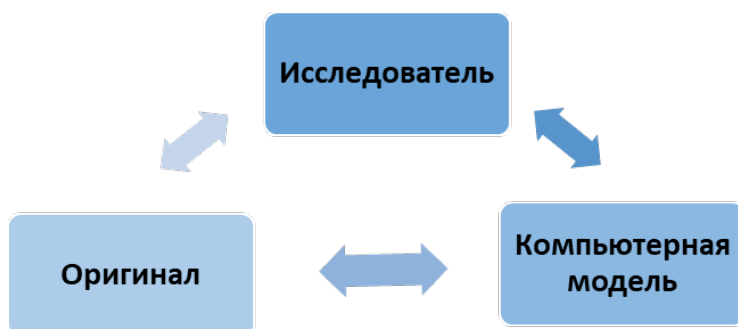


Рисунок 35. Основная идея компьютерного моделирования процессов и систем

При этом создаваемая компьютерная модель является одновременно и средством изучения, и объектом экспериментального исследования. Компьютерная модель заменяет оригинал, с учетом некоторых допущений и упрощений. Так создается компьютерная математическая модель – это программа, с помощью которой реализуются расчетные работы по описанию состояний системы на основе ее математической модели.

Компьютерная модель должна удовлетворять основным требованиям:

1) быть адекватной, то есть отражать наиболее существенные стороны исследуемого объекта с требуемой точностью;

- 2) способствовать решению определенного класса исследовательских задач;
- 3) быть простой и понятной, основываться на минимальном количестве предположений и допущений;
- 4) позволять модифицировать и дополнять себя, переходить к другим данным;
- 5) быть удобной в использовании.

4.4 Виды компьютерных моделей объектов, процессов и систем

Под компьютерным моделированием в самом широком смысле будем понимать процесс создания и исследования разнообразных моделей с помощью компьютера и программного обеспечения. Выделяют следующие виды моделирования: физическое, динамическое (численное), имитационное, статистическое, информационное моделирование, а также моделирование знаний.

Физическое моделирование

Данный подход предполагает, что персональный компьютер выступает как составная часть экспериментальной установки или симулятора - тренажера, он воспринимает внешние сигналы, выполняет задачи и соответствующие расчеты, а также выдает сигналы, управляющие различными манипуляторами. Например, учебная компьютерная модель самолета, представляющая собой кабину, установленную на соответствующих манипуляторах, соединенных с компьютером, который реагирует на действия пилота и изменяет наклон кабины, показания приборов, вид из иллюминатора и т.д., имитируя полет реального самолета по заданной программе.

Динамическое или численное моделирование

Метод динамического численного моделирования, предполагающий поиск численного решения системы алгебраических и дифференциальных уравнений методами вычислительной математики и выполнение вычислительного эксперимента при различных параметрах исследуемой системы, различных начальных условиях и внешних воздействиях – возмущающих факторов. Данный подход компьютерного моделирования используется для моделирования различных физических, биологических, социальных и других явлений: колебания физического маятника, распространение волны, изменение численности населения, популяции данного вида животных и т.д.

Имитационное моделирование

Основная идея имитационного моделирования объектов, процессов и систем состоит в создании компьютерной моделирующей программы (или пакета программ), имитирующей поведение сложной технической, экономической или иной системы на ЭВМ с требуемым уровнем точности. Технология формализации на основе имитационного моделирования предусматривает описание логики функционирования исследуемого процесса или системы во времени, которое учитывает существенные специфические особенности взаимодействия составляющих ее компонентов, а также обеспечивает проведение статистических экспериментальных исследований. Объектно ориентированные компьютерные программные симуляции используются для исследования поведения экономических, биологических, социальных и иных систем, для создания компьютерных игр, так называемого “виртуального мира”, обучающих программ и анимаций. Например, модель технологического процесса, аэродрома, некоторой отрасли производства и т.д.

Статистическое моделирование

Метод статистического моделирования используется при исследовании стохастических систем и выполняется в виде многократного повтора испытаний с последующей математической обработкой получающихся результатов в виде набора основных статистик – точечных и интервальных оценок.

Подобные модели, полученные на основании статистического подхода, позволяют исследовать поведение всевозможных систем массового обслуживания, мультипроцессорных систем, информационно-вычислительных сетей и комплексов, различных динамических систем, на которые воздействует совокупность в виде набора случайных факторов. Статистические модели применяются при решении вероятностных задач, а также при обработке больших массивов данных (методы интерполяции, экстраполяции, регрессии, корреляция, расчет параметров и функций распределения и т.д.). Они отличаются от детерминированных моделей, использование которых предполагает численное решение систем алгебраических или дифференциальных уравнений, либо замену изучаемого объекта детерминированным автоматом.

Информационное моделирование

Метод информационного моделирования заключается в создании формализованного описания объектов, процессов или систем в виде информационной модели, **то есть** совокупности специальным образом организованных данных (знаков, сигналов), отражающих наиболее существенные стороны исследуемого объекта. Различают наглядные, графические, анимационные, текстовые, табличные информационные модели. К ним относятся всевозможные схемы, графы, графики, таблицы, диаграммы, рисунки, анимации, выполненные на ЭВМ, в том числе цифровая карта звездного неба, компьютерная модель земной поверхности и т.д. Выполняемые в виде графических представлений информационные модели

объектов, процессов и систем учитывают и описывают движение только информационных потоков, отражающих уровень свойств – атрибутов входных и выходных характеристик.

Моделирование знаний

Моделирование знаний рассматривается как важный инструмент их формализации с использованием определённых средств, или моделей представления знаний.

Процессы моделирования знаний предполагают построение экспертной информационно-аналитической системы на основе искусственного интеллекта, в основе управления которой лежит база знаний некоторой предметной области (части реального мира). Базы знаний состоят из фактов (данных) и специально сформулированных правил. К данному виду моделей относят такие конструкции как семантические сети, логические и логико-информационные модели знаний, экспертные системы на основе правил, логические игры и т.д. Логические модели используются для представления знаний в экспертных системах, для создания систем искусственного интеллекта, осуществления логического вывода, доказательства теорем, математических преобразований, построения роботов, использования естественного языка для общения с ЭВМ, создания эффекта виртуальной реальности в компьютерных играх и т.д.

Глава 5. Верификация информационных моделей, объектов, процессов и программных систем

5.1 Основные подходы и процедуры процессов верификации

Процессы верификации информационных моделей направлены на проверку соответствия между собой созданной модели и исходным требованиям к ее проектированию, построению и программной реализации. При этом, информационные модели и формальные алгоритмы их реализации применяются достаточно широко.

Разработка информационных моделей различных объектов, процессов и систем – сложный процесс. Сложность разработки данного информационного обеспечения предполагает включение этапа верификации данных конструкций с первичной целью реализации формальной проверки правильности построения, а также для решения задач обеспечения требуемых уровней качества и надежности информационного продукта [118].

Идея функциональной верификации методологически связана с процессами верификации программного обеспечения. Процессы верификации программного обеспечения выступают в качестве методологической основы функциональной проверки создаваемых информационных моделей.

Функциональная верификация информационных моделей объектов, процессов и систем предполагает набор формальных и неформальных процедур – исследований – проверок, направленных на установление адекватности – уровня соответствия алгоритма функционирования функциональной модели идее моделирования и назначения. Процесс функциональной верификации направлен именно на проверку верности логической структуры информационной модели и правильности реализации информационного моделирующего алгоритма при разработке формализованного описания объектов, процессов и сложных систем.

Верификация информационных моделей объектов, процессов и сложных систем предполагает выполнение ряда формальных и неформальных проверок, которые в первую очередь, призваны подтвердить

непротиворечивость построенных моделей и правильность выполнения процессов функциональной декомпозиции с учетом требуемой глубины – уровня детализации, заданного при проектировании комплекса моделей [119].

На рисунке 36 приведен подход к классификации средств верификации информационных моделей объектов, процессов и систем.



Рисунок 36. Подходы к процессу верификации информационных моделей

Средства верификации, согласно рисунку, подразделяются на инструменты формальной верификации, методы динамической и статической верификации. Модель формальной верификации базируется на создании и построении формального доказательства или опровержения некоторой гипотезы. Гипотеза при данном подходе направлена на соответствие или несоответствие реализации модели согласно спецификации.

Системная верификация представляет собой процессы проверки корректности работы различных сложных устройств, построенных по блочно-модульному принципу и состоящих из большого числа компонентов. Таким образом, при выполнении системной верификации основная задача заключается в выполнении проверок взаимодействий между компонентами

исследуемой системы, и, в конечном итоге, процесс сводится в проверке работоспособности системы в целом.

Верификация может проводиться на основе тестирования созданной системы или модели – прототипа (динамический подход), или же без учета особенной работы и режимов функционирования модельной системы (статический подход).

Метод динамической верификации предполагает выполнение анализа и оценки свойств исследуемой информационной системы или модели на основе реальной эксплуатации самой модели или ее прототипа. Такой подход принято называть тестированием [119].

В процессах и процедурах верификации также можно использовать метод на основе статического подхода. В большинстве своем подобные методы основаны на проверке и поиске стандартных часто встречающихся ошибок, при этом используются определенный набор шаблонов, также возможно применение инструментов логико-синтаксического анализа переходов для выявления различных несоответствий.

Процессы верификации представляют собой строго регламентированные стандартизированные инструменты исполнения формальных и неформальных проверок информационных конструкций различных типов – для этого применяют стандарты ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207:2010 (определяет верификацию как подтверждение, на основе представления объективных свидетельств, того, что заданные требования полностью выполнены); ГОСТ Р 57412–2017 (устанавливает термин «контроль результатов компьютерного моделирования», который включает верификацию — подтверждение соответствия компьютерной реализации модели исходной математической или информационной модели) [120, 121].

Верификация информационной конструкции, под которой понимается модель, программная или информационная система – рассматривается как некий процесс построения логически обоснованного доказательства того, что она соответствует формальным установленным на этапе проектирования и

разработки требованиям. Информационная конструкция в данном аспекте рассматривается в качестве обобщения объектов информационного поля [122].

В качестве средств верификации могут быть использованы такие инструменты как системы верификации моделей и специальные сервисы верификации. Разнообразие методологических подходов и инструментариев для выполнения верификации информационных моделей может создавать некоторые трудности при исследовании различных объектов, процессов и сложных систем [123-125]. Разнообразие средств верификации информационных моделей представлено на рисунке 37.



Рисунок 37. Некоторые средства верификации информационных моделей

Верификационные системы на основе логического вывода основаны на технологии доказательств теорем. Подтверждение правильности программной системы подтверждается с помощью аксиоматических подходов на основе методов Хоара и Флойда. Процесс верификации выполняется с использованием алгоритмической логики системы. Верификационный алгоритм Флойда предполагает разбиение проверяемой программы на ряд участков, ограниченных булевыми выражениями – предикатами. Входные

данные программной системы предусматривают истинность исходного предиката. На основе истинности предиката начального участка цепочки затем доказываемся истинность следующего утверждения, представленного предикатом конца цепочки. Конечные предикат отражает постуловие тестируемой программной системы.

Применение статических методов верификации предполагает организацию процесса поиска типичных ошибок на основе некоторых шаблонов. Также статические методы включают в себя принципы синтаксического анализа переходов для выявления возможных ошибок и неточностей.

Для проверки информационных моделей также применяются эвристические методы, в рамках которых применяются средства проверки моделей за счет наложения ограничений в пространстве поиска. Среди возможных ограничений применяются ограничения на длину пути, время, число ветвей и др.

Методология Model Driven Development представляет собой метод верификации надёжных моделей, который включает набор спецификаций свойств - атрибутов, процессы разработки модели, разработки тестов, верификацию модели, имитационное моделирование и окончательное формирование проекта [125].

Одним из подходов к функциональной верификации программных систем является метод бинарных решающих диаграмм (Binary Decision Diagrams — BDD). Данный подход возможно применять только тогда, когда на основе декомпозиции информационной системы можно использовать булевы функции [126].

Также существуют верификационные методы, основанные на системах линейных неравенств. Данную группу методов верификации используют для проверки соответствия логических моделей систем в виде структурных диаграмм типа сущность-связь - ER-диаграмм, которые включают сущности (классы), бинарные связи (ассоциации) и ограничения кардинальности.

Методы на основе дескрипционной логики. Семейство формализмов для систем представления знаний, которые позволяют выводить одни знания из других, представленных в базе знаний. Подобный подход позволяет рассматривать систему представления знаний на основе создания ее описания посредством формализованного языка, включающего набор понятий предметной области, отношений между данными понятиями и четкую иерархическую организацию, и определение свойств и атрибутов понятий. Данные методы включают синтаксис, семантику, а также алгоритмические конструкции системы логического вывода. Синтаксис дескрипционной логики формирует правила построения логических выражений – высказываний, а семантика – формальное значение выражений, например, истинность или ложность [127-130].

Верификационные алгоритмы на основе логического вывода представляют собой информационные базы знаний, формулируемые на языке дескрипционных логик, применяются не только для представления знаний о предметной области, но и для логического анализа знаний.

Некоторые задачи, решаемые с помощью алгоритмов на основе логического вывода:

- ✓ проверка отсутствия в знаниях противоречий;
- ✓ вывод новых знаний из уже имеющихся;
- ✓ обеспечение возможности делать запросы к базам знаний (по аналогии с запросами к базам данных).

Большинство существующих методов и инструментов верификации информационных моделей объектов, процессов и систем проверяют выполнимость исходной модели, то есть возможность создания некоторого набора экземпляров её классов, не нарушающего определённых в ней ограничений [130].

5.2. Средства и инструменты верификации программных систем

Программная система – сложный составной набор взаимодействующего между собой программного обеспечения, баз данных и файлов, а также совокупность их описаний в виде документационного обеспечения, решающих определенный круг задач при помощи персональных компьютеров [131-133]. В общем виде структура программной системы, включающая наборы отдельных программ, файлы конфигурирования – настроечные параметры, системную документацию и руководство пользователя, представлена на рисунке 38.

Программная система представляет собой программное обеспечение, как правило, направленное на обеспечения выполнения некоторых функций:

- ✓ Управление процессами;
- ✓ Управление памятью;
- ✓ Управление файлами;
- ✓ Управление устройствами.

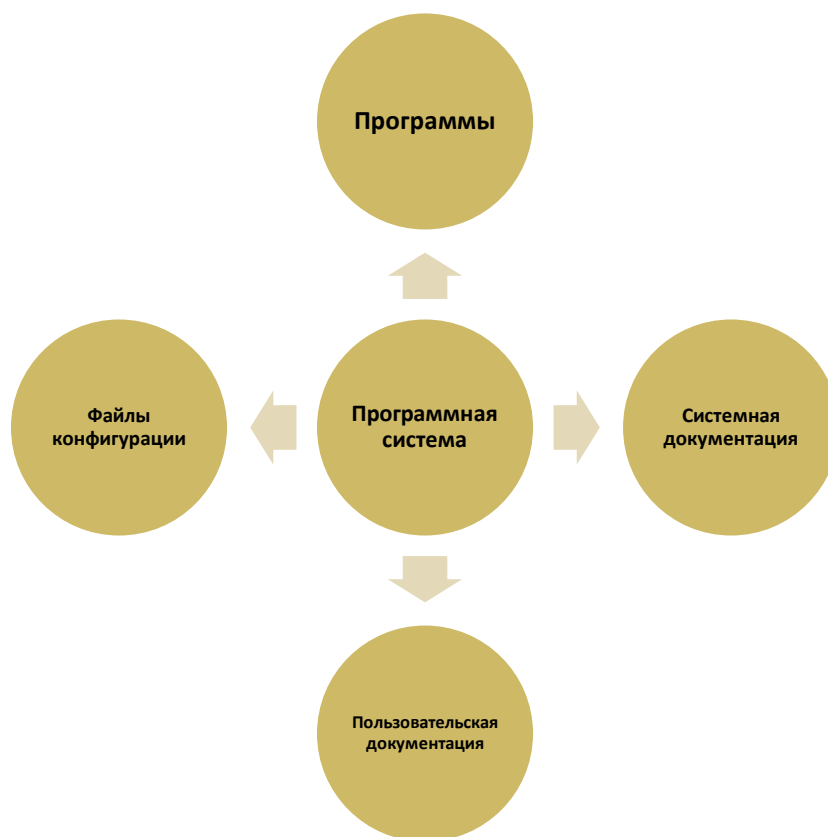


Рисунок 38 Типовая структура программной системы

Процесс разработки программ и программных систем – итерационная процедура, включающая несколько стадий (Рисунок 39). Этапы разработки программного обеспечения характеризуют модель его жизненного цикла [134-135].

На стадии анализа требований проводится поиск и сбор информации, необходимой для определения функционала будущего программного продукта, проводится обсуждение требований и создается техническое задание [136-138].

Этап проектирования предполагает выполнение процессов разработки и утверждения требований к архитектуре программной системы, конкретизируется набор технологий и языков программирования и инструментарий разработки [139,140].

Непосредственно сам процесс разработки предполагает в процессах написания программного кода реализацию выбранного функционала самой программной системы [141, 142]. Выполняется написание отдельных программных модулей, а также их системная интеграция – сборка в единую программную систему [143, 144].



Рисунок 39. Элементы жизненного цикла процесса разработки программных систем [145]

Для выявления и устранения ошибок в ходе создания программ-модулей, а также для обнаружения возможных проблем в работе служит этап тестирования. Одним из стадий процессов тестирования является процедура верификации программной системы, направленная на проверку и установление соответствия продукта установленным в технической документации требованиям, спецификациям и стандартам [146].

Стадии внедрения и развёртывания предполагают запуск и функционирование программы в реальных условиях, с учетом процессов настройки серверов, а также интеграции приложений с другими программными системами при необходимости [147, 148].

Такие стадии жизненного цикла как техническая поддержка и автоматическое или ручное обновление предполагают, что после запуска проводится некоторая работа над исправлением ошибок, добавлением новых функций и оптимизацией производительности программных систем [149-152].

Верификация программных систем, как один из этапов реализации процессов их тестирования, предполагает выполнение формальных процедур проверки на соответствие программного продукта требованиям, заявленным в технической документации. Данный подход сосредоточен именно на процессах разработки программной системы, и не является прямой оценкой уровня ее функциональности. Процедуру верификации целесообразно проводить на ранних стадиях проекта создания программной системы – на уровне этапа анализа требований к разработке и функционированию и вплоть до процессов проверки архитектуры системы и ее реализации [153-156].

Необходимо также отличать между собой процессы верификации и валидации программных систем. Валидация представляет собой проверку соответствия разрабатываемого программного продукта ожиданиям реальных пользователей по работе в реальной среде (рисунок 40).

Фактически, валидация есть оценка уровня работоспособности готовой программной системы с учетом ее соответствия запросам современного рынка.

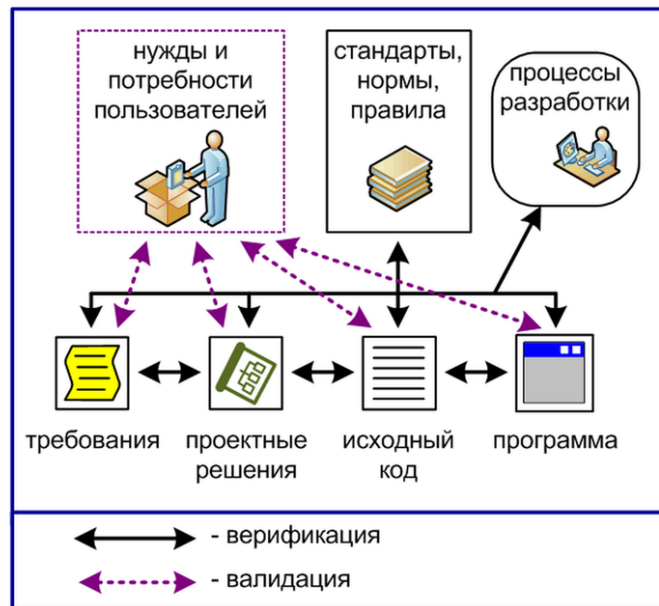


Рисунок 40. Процессы валидации и верификации программ и программных систем [157]

Таким образом, верификация сосредоточена на процессах разработки программных систем, а валидация – на процессах уровня качества функционирующего готового продукта, представленного на рынке программного обеспечения. Методология процедур и процессов валидации и верификации программных систем достаточно разнообразна и предполагает использование различных инструментов. Модели валидации и верификации программных систем в первом приближении представлены на рисунке 41.

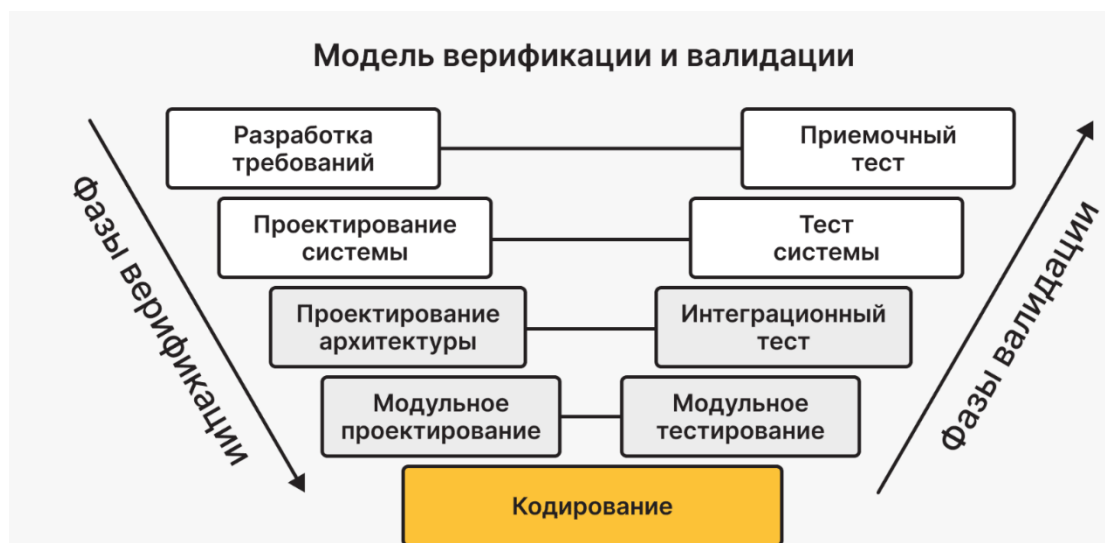


Рисунок 41. Модели верификации и валидации программ и программных систем [157]

Среди методов верификации программных систем обычно выделяют ряд процедур, позволяющих убедиться, что программное обеспечение соответствует необходимым стандартам и спецификациям. Методы верификации программных систем перечислены на рисунке 42.



Рисунок 42. Методология верификации программных систем

Методы верификации

Существует несколько методов верификации, которые помогают удостовериться, что программное обеспечение соответствует требуемым стандартам и спецификациям.

Анализ требований — это первый и один из самых важных шагов в верификации. На этом этапе проверяются технические спецификации и документация, чтобы убедиться, что они полностью отражают запросы бизнеса и будущих пользователей [157-160].

Ревью кода представляет собой проверку исходного кода на соответствие стандартам качества, архитектурным решениям и лучшим практикам. Это важный этап при верификации, который может быть проведен

вручную или с использованием специальных инструментов, таких как SonarQube и ESLint.

Статический анализ кода подразумевает использование автоматизированных инструментов для анализа кода без его выполнения. Это позволяет обнаружить ошибки, потенциальные уязвимости и нарушения стандартов на ранних этапах разработки.

Формальная верификация включает математические методы для доказательства того, что система соответствует определенным требованиям. Этот метод чаще используется в критически важных приложениях, таких как авиационные системы, где ошибки могут быть катастрофическими.

Моделирование и прототипирование включает создание моделей и прототипов программного обеспечения на ранних стадиях разработки. Данный подход позволяет обнаружить ошибки и несоответствия до того, как продукт будет полностью реализован.

Методы валидации

Методы валидации предназначены для проверки того, что продукт отвечает ожиданиям пользователей и выполняет свои функции в реальной рабочей среде.

Функциональное тестирование проверяет, соответствует ли приложение заявленным функциональным требованиям. Проверяется каждая функция программного обеспечения в условиях, приближенных к реальным.

Интеграционное тестирование проверяет взаимодействие различных компонентов системы. Важно убедиться, что после интеграции все части ПО работают совместно, как ожидалось.

Приемочное тестирование (UAT, Alpha/Beta-тестирование) проводится с участием реальных пользователей и направлено на проверку того, насколько продукт удовлетворяет их ожиданиям и требованиям. Альфа- и бета-тестирование позволяет выявить баги и улучшить продукт перед массовым запуском.

Usability тестирование проверяет, насколько удобен и интуитивно понятен интерфейс продукта для конечного пользователя.

Нагрузочное и стресс-тестирование проверяет, как система ведет себя при высоких нагрузках, что важно для оценки ее производительности и устойчивости.

Системное тестирование включает тестирование всей системы как единого целого. Это окончательная проверка, чтобы убедиться, что продукт функционирует в рамках общей архитектуры и соответствует требованиям.

Верификация и валидация — это два ключевых процесса в тестировании программного обеспечения, которые обеспечивают его качество и соответствие требованиям. Они не взаимоисключают, а скорее дополняют друг друга, помогая создавать надежные и высококачественные интеллектуальные цифровые продукты. Для успешного релиза важно уделить внимание как процессам и инструментам верификации, так и валидации, чтобы продукт не только был правильным, но и соответствовал ожиданиям пользователей.

Заключение

В научной монографии с системных позиций рассмотрены вопросы, касающиеся формализации основных принципов информационного моделирования объектов, процессов и систем. Исследование направлено на создание информационного описания основных принципов формализации, классификации и верификации за счет выявления, анализа и систематизации основных методов, инструментов и средств визуального информационного моделирования объектов, процессов и систем с целью решения ряда практических прикладных задач: регламентирования, документирования, проектирования и разработки, визуализации, а также задачи организации программного управления информацией и документацией.

В монографии проведен системный анализ средств, методов и инструментов информационного моделирования как одного из перспективных научных методов исследования различных объектов, процессов и систем. Собраны, систематизированы и интерпретированы основные научные принципы и подходы к формализации объектов, процессов и систем на основе комплекса дескриптивных информационных моделей.

Информационное моделирование процессов и систем как один из инструментов создания их формализованного описания – важный этап организации и проведения системных исследований. Многообразие методов и инструментов информационного анализа и визуального моделирования процессов и систем открывает новые горизонты для исследователя.

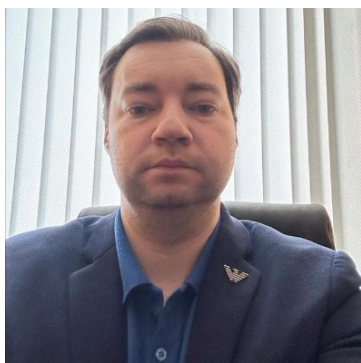
Рассмотренные в данной монографии разделы направлены на идентификацию, анализ и формирование основных системных принципов и подходов к формализации, классификации и верификации методов и инструментов информационного моделирования процессов и систем. Также в монографии предлагается системное формализованное структурированное информационное описание принципов и подходов к информационному моделированию процессов и систем. Результатом данного исследования является обзор и систематизация комплекса принципов, методологических

приемов и подходов к формализации объектов, процессов и систем на основе методов и инструментов информационного моделирования.

Рассмотренные научные подходы к классификации средств и инструментов информационного моделирования, а также принципов уровневой формализации, верификации и классификации при описании процессов и систем могут быть использованы в качестве инструмента информационной поддержки процесса выбора средств моделирования при решении различных прикладных задач системного исследования объектов, процессов и систем различного порядка сложности.

КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СПРАВКА ОБ АВТОРЕ МОНОГРАФИИ

КУЗНЕЦОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ



Окончил МИРЭА – Российский технологический университет, бакалавр техники и технологии в 2010 г., магистр техники и технологий в 2012 г. Прошел обучение в очной аспирантуре кафедры Информационных систем в химической технологии по научной специальности 09.06.01 – Информатика и вычислительная техника, направленность – Системный анализ, управление и обработка информации в 2016г. Кандидат технических наук (научная специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации в 2017г., доцент ВАК (научная специальность 2.3.8 Информатика и информационные процессы) в 2025г., доцент кафедры Информационных технологий, искусственного интеллекта и общественно-социальных технологий цифрового общества (выпускающая кафедра), заместитель руководителя по научной деятельности и член Ученого совета факультета политических и социальных технологий Российского государственного социального университета (РГСУ).

Автор и соавтор более 160 научных, 12 учебно-методических работ. Область научных интересов: интеграция информационных систем; визуальное моделирование объектов, процессов и систем, математическое моделирование и анализ экспериментальных данных, информатика и

информационные процессы; вычислительный эксперимент и численное моделирование процессов и систем; структурный и морфологический системный анализ; управление и обработка информации; статистика многомерных данных; автоматизированные интеллектуальные информационные системы в управлении предприятиями; формализованные методы управления информацией в сложных системах; языки визуального моделирования бизнес-процессов предприятия; бизнес-интеллект и бизнес-информатика; химическая и био-информатика; цифровизация и интеллектуализация образовательных процессов и систем; искусственный интеллект и статистика «больших данных».

Список источников

1. Качанова Тамара Леонидовна, Фомин Борис Федорович Физика систем - посткибернетическая парадигма системологии // Глобальная энергия. 2011. №3 (121). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fizika-sistem-postkiberneticheskaya-paradigma-sistemologii> (дата обращения: 16.02.2026).
2. Каргин Н. Н. Системология: теория. Методология. Практика/под ред. Док. Философских наук, профессора В. Д. Диденко: монография, гоувпо «МТС». - М. , 2007. // Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса. 2008. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kargin-n-n-sistemologiya-teoriya-metodologiya-prak-tika-pod-red-dok-filosofskih-nauk-professora-v-d-didenko-monografiya-gouvro-mts-m-2007> (дата обращения: 16.02.2026).
3. Акимов О. Е. Дискретная математика: логика, группы, графы. 2-е изд., доп. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. 376 с.: ил. ISBN 5-93208-025-6.
4. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети / Пер. с английского В. Н. Буркова, С. Е. Ловецкого, В. Б. Соколова. Под ред А. И. Теймана. М.: Наука, 1974. 366 с., ил.
5. Гудман С., Хидетниемеи С. Введение в разработку и анализ алгоритмов. М.: Мир, 1981. 366 с., ил.
6. Кристофдес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Пер. с англ. Э. В. Вершкова и И. В. Коновальцева. Под. ред. Г. П. Гаврилова. М.: Мир, 1978. 432 с., ил.
7. Фрич Р., Перегуд Е. Е., Мациевский С. В. Избранные главы теории графов: Учебное пособие / Пер. с нем. Е. Е. Перегуда; Пол ред. С. В. Мациевского. Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2008. 204 с.: ил. ISBN 978-5-88874-880-0.
8. Исаев Р.А., Подвесовский А.Г. Повышение когнитивной ясности графовых моделей представления знаний и принятия решений с применением визуализации // Эргодизайн. 2021. №1 (11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-kognitivnoy-yasnosti-grafovyh->

modeley-predstavleniya-znaniy-i-prinyatiya-resheniy-s-primeneniem-vizualizatsii
(дата обращения: 20.03.2025).

9. Гаврилова Т. А., Кудрявцев Д. В., Лещева И. А., Павлов Я. Ю. Об одном методе классификации визуальных моделей // Бизнес-информатика. 2013. №4 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-odnom-metode-klassifikatsii-vizualnyh-modeley> (дата обращения: 20.03.2025).

10. Шорыгин Сергей Михайлович Визуальное моделирование в информационных технологиях // ПНиО. 2014. №6 (12). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vizualnoe-modelirovanie-v-informatsionnyh-tehnologiyah> (дата обращения: 20.03.2025).

11. Маторин С. И., Зимовец О. А., Щербинина Н. В., Сульженко Т. С. Концепция формализованной теории систем, основанной на подходе «Узел-Функция-Объект» // Экономика. Информатика. 2016. №16 (237). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-formalizovannoy-teorii-sistem-osnovannoy-na-podhode-uzel-funktsiya-obekt> (дата обращения: 27.03.2025).

12. Калянов Г. Н. Концептуальная модель DFD-технологии // Открытое образование. 2017. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnaya-model-dfd-tehnologii> (дата обращения: 29.03.2025).

13. Ахметшин, Р. М. Информационное моделирование с применением Renga Architecture : учебное пособие / Р. М. Ахметшин. — Уфа : УГНТУ, 2019. — 133 с. — ISBN 978-5-7831-1913-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/179269> (дата обращения: 29.03.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

14. Системный анализ [Электронный ресурс] : конспект лекций по дисциплине «Системный анализ» для студентов бакалавриата очной формы обучения направления подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств / М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т, каф. электротехники и электропривода ; сост. С.В. Шилкина. — Электрон. дан. и прогр. (1,7 Мб). — Москва : НИУ

МГСУ, 2015. — Учебное сетевое электронное издание — Режим доступа: http://lib.mgsu.ru/Scripts/irbis64r_91/cgiirbis_64.exe?C21COM=F&I21DBN=IBIS&P21DBN=IBIS — Загл. с титул. экрана.

15. Фридланд А.Я. Информатика: процессы, системы, ресурсы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.

16. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1990.

17. Моделирование систем: учебное пособие / Т.Г. Асланов, У.Р. Тетакаев; ДГТУ. – Махачкала, 2020 – 167 с.

18. Горлушкина Н.Н. Системный анализ и моделирование информационных процессов и систем. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 120 с.

19. Спицина, И.А. Системный анализ и моделирование информационных систем: учебное пособие / И.А. Спицина, К.А. Аксенов ; М-во науки и высшего образования РФ.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021.— 118 с. ISBN 978-5-7996-3196-3

20. Комаров К.Л. Системный анализ и моделирование — как универсальные методы научных исследований // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2007. №16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-i-modelirovanie-kak-universalnye-metody-nauchnyh-issledovaniy> (дата обращения: 26.02.2025).

21. Вовк И.Г., Бугакова Т.Ю. Пособие по системному анализу, моделированию и принятию решений: Справочное учебное пособие-Новосибирск; СГГА, 2009.- с.

22. Мелентьев В.А. Скобочная форма описания графов и ее использование в структурных исследованиях живучих вычислительных систем // Автометрия. 2000. Т. 38. № 4. С. 36–52

23. Ровнягин Михаил Михайлович, Лебедев Михаил Сергеевич, Чудновский Александр Леонидович Современные методы верификации и особенности их применения // Современные информационные технологии и

ИТ-образование. 2011. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-metody-verifikatsii-i-osobennosti-ih-primeneniya> (дата обращения: 29.12.2025).

24. Губенко Я. С., Камкин А. С., Чупилко М. М. Сравнительный анализ современных технологий разработки тестов для моделей аппаратного обеспечения // Труды ИСП РАН. 2009. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-sovremennyh-tehnologiy-razrabotki-testov-dlya-modeley-apparatnogo-obespecheniya> (дата обращения: 29.12.2025).

25. Борисова И.А., Сажнева Л.П. Перспективы и направления развития продукции информационно-коммуникационных систем // Экономика и предпринимательство. 2017. № 12-2 (89). С. 1169–1172.

26. Слинкин Д. И. Анализ современных методов тестирования и верификации проектов сверхбольших интегральных схем // Программные продукты и системы. 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennyh-metodov-testirovaniya-i-verifikatsii-proektov-sverhbolshih-integralnyh-shem> (дата обращения: 29.12.2025).

27. Царинжапов А. А., Кошевенко А. В. Разработка и отладка модели микропроцессора архитектуры MIPS и ее реализация на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) // ИВД. 2018. №2 (49). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-otladka-modeli-mikroprotsessora-arhitektury-mips-i-ee-realizatsiya-na-programmiruemyh-logicheskikh-integralnyh-shemah-plis> (дата обращения: 29.12.2025).

28. Корнюшко В.Ф., Панов А.В., Богунова И.В., Николаева О.М., Флид А.А. Применение системного подхода для построения информационного пространства разработки состава готовых лекарственных форм // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 3(75). С. 83–100.

29. Черемных СВ. Ч-46 Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум / С.В. Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. - М.: Финансы и статистика, 2006. - 192 с : ил. - (Прикладные информационные технологии). ISBN 5-279-02564-X

30. Волкова, В.Н. Теория систем и системный анализ: учебник для бакалавров / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. — М. : Издательство Юрайт ; ИД Юрайт, 2012. — 679 с. — Серия : Бакалавр. ISBN 978-5-9916-1443-6

31. Волкова, В.Н. Теория систем и системный анализ : учебник для вузов / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. — 3-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 562 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-14945-6. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/559633> (дата обращения: 26.02.2025).

32. Системное моделирование и анализ мезо- и микроэкономических объектов / отв. ред. В.В. Кулешов и Н.И. Суслов. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2014. – 488 с.

33. Каюмова А.В. Визуальное моделирование систем в StarUML: Учебное пособие/ А.В. Каюмова. Казань. – Казанский федеральный университет, 2013. – 104с.

34. Афанасьева, Т.В. Моделирование в задачах анализа свойств систем : учебное пособие / Т.В. Афанасьева, Н.Г. Ярушкина. – Ульяновск : УлГТУ, 2019. – 114 с. ISBN 978-5-9795-1930-2

35. ТЕОРИЯ СИСТЕМ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ. Краткий курс: учеб.-практ. пособие / В. Е. Крылов [и др.] ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. – 192 с. ISBN 978-5-9984-1451-0

36. Карабутов Н.Н. Введение в теорию эксперимента в исследовании систем: учебное пособие для вузов / Н.Н. Карабутов. - Санкт-Петербург: Лань, 2023. - 168 с.: ил. ISBN 978-5-507-44900-2

37. Калугян К.Х., Хубаев Г.Н. Теория систем и системный анализ : учеб. пособие. – Ростов н/Д : издательско-полиграфический комплекс РГЭУ (РИНХ), 2016. – 77 с. ISBN 978–5–7972–2245–3

38. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981.

39. Волкова В.Н. Постепенная формализация моделей принятия решений. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. – 120 с.
40. Волкова В.Н., Денисов А.А., Темников Ф.Е. Методы формализованного представления систем: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГТУ, 1993.
41. Оболонин И.А. Проектирование в инфокоммуникационных технологиях: Учебник СибГУТИ. Новосибирск, 2013, 324 с.
42. Кознов Д.В. Языки визуального моделирования. Проектирование и визуализация программного обеспечения 2004. 171 с.
43. Петрова И.Р. Методология функционального моделирования IDEF0/ И.Р. Петрова, Р.Х. Фахртдинов, А.А. Сулейманова . – Казань: Казан. ун-т, 2018. – 68 с
44. Долятовский В.А., Ситников Р.В. Системный анализ в управлении организации: Учеб. пособие. – Ростов н/Д: Изд-во РГЭУ (РИНХ), 2010. – 118 с.
45. И.Н. Глухих. ТЕОРИЯ СИСТЕМ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ [Электронный ресурс]: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2016. 148 с. ISBN 978-5-400-01165-8
46. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
47. http://systematy.ru/articles/tema_4_informatsionnoe_modelirovanie_p_redmetnoy_oblasti_pri_postroenii_eis_vvedenie_v_metodologii_informatsionnogo_modelirovaniya_biznes-protsesov_pri_razrabotke_asu_ch3 (дата обращения - 01.03.2025г., режим доступа – свободный)
48. https://www.businessstudio.ru/upload/files/notation_idef0.pdf (дата обращения - 01.03.2025г., режим доступа – свободный)
49. Зыков В.В. Системный анализ: учеб. пособие. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2008. 384 с

50. Бескровный, И.М. Б 53 Системный анализ и информационные технологии в организациях [Текст] : учебное пособие / И. М. Бескровный. – М. : РУДН, 2012. – 392 с. ISBN 978-5-209-04874-9

51. Абдулгалимов А.М., Ахмедханова С.Т. Учебное пособие по дисциплине «Теория систем и системный анализ»: Учебное пособие для студентов направления подготовки магистров 090404 – Программное инженерия. // Махачкала, ИПЦ ДГТУ, 2021 г., 141с.

52. Фофанов О.Б. Алгоритмы и структуры данных: учебное пособие / О.Б. Фофанов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 126 с.

53. Б.Я. Советов, С.А. Яковлев Моделирование систем. Учебник для вузов. «Питер» С-П. 602 с. 2005 ISBN (EAN): 5-06-003860-2

54. Моделирование систем : учебное пособие / И.А. Елизаров, Ю.Ф. Мартемьянов, А.Г. Схиртладзе, А.А. Третьяков. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 96 с. – 100 экз. ISBN 978-5-8265-1022-3

55. Арлоу Д., Нейштадт И. UML 2 и Унифицированный процесс. Практический объектно-ориентированный анализ и проектирование, 2е издание. – Пер. с англ. – СПб: Символ Плюс, 2007. – 624 с., ил. 13: ISBN 978-5-93286-094-6

56. Технологии разработки программного обеспечения: Учебник / С. Орлов. — СПб.: Питер, 2002. — 464 с.: ил. ISBN 5-94723-145-X

57. Черткова, Е. А. Программная инженерия. Визуальное моделирование программных систем : учебник для вузов / Е. А. Черткова. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 146 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-18197-5. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/562413> (дата обращения: 28.02.2025).

58. Денисов А.А. Современные проблемы системного анализа: Учебник. 3-е изд. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2008. – 304 с.

59. Жемчугов А. М., Жемчугов М. К. Цикл PDCA Деминга. Современное развитие // Проблемы экономики и менеджмента. 2016. №2 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsikl-pdca-deminga-sovremennoe-razvitiye> (дата обращения: 01.03.2025).

60. Поляков А. Н. Уильям Эдвардс Деминг, его взгляды и их истоки (рус.) // Management : журнал. — 2019. — № 3 (51) - 2019. — С. 72—76.

61. Липунцов Ю.П. Этапы информационного моделирования // *π-Economy*. 2015. №6 (233). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/etapy-informatsionnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 29.03.2025).

62. Дешко И.П. Информационный подход в моделировании // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. №5 (17). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnyy-podhod-v-modelirovanii> (дата обращения: 29.03.2025).

63. Иванов А.Г., Бахвалов С.В. Информационное моделирование медицинской информационно-аналитической системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-modelirovanie-meditsinskoj-informatsionno-analiticheskoy-sistemy> (дата обращения: 29.03.2025).

64. Манухина О.В. Информационное моделирование в системах обработки данных // Учёные записки ЗабГУ. Серия: Профессиональное образование, теория и методика обучения. 2011. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-modelirovanie-v-sistemah-obrabotki-dannyh> (дата обращения: 29.03.2025).

65. Кужин М. Ф., Сафронов С. С. Информационное моделирование в организации строительного производства // Системные технологии. 2018. №4 (29). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-modelirovanie-v-organizatsii-stroitel'nogo-proizvodstva> (дата обращения: 29.03.2025).

66. Филатов А. С. ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СЛУЖБЕ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ // Форум молодых ученых. 2017.

№5 (9). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-modelirovanie-v-sluzhbe-upravleniya-personalom> (дата обращения: 29.03.2025).

67. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Кочура В.Г. Информационное моделирование объекта параметрической архитектуры // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2019. №1 (201). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnoe-modelirovanie-obekta-parametricheskoj-arhitektury> (дата обращения: 29.03.2025).

68. Каллаур Г.Ю. ОБОСНОВАНИЕ ИНВЕСТИЦИЙ В ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ // Экономика строительства. 2018. №1 (49). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-investitsiy-v-tehnologii-informatsionnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 29.03.2025).

69. Долженко А. И. Моделирование корпоративной информационной системы // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Общественные науки. 2006. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-korporativnoy-informatsionnoy-sistemy> (дата обращения: 29.03.2025).

70. Лось А. В., Тихоненко Д. В. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТРАНСПОРТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. №14. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-tehnologii-v-transportnom-modelirovanii> (дата обращения: 29.03.2025).

71. Информационные технологии и обработка экспериментальных данных: учебное пособие / А.С. Кузнецов.—Санкт- Петербург: Сциентиа, 2025.—98 с.ISBN 978-5-907902-13-8.—doi: 10.32415/scientia_978-5-907902-13-8.

72. Кузнецов, А.С. Основы построения цифровых моделей химико-технологических процессов : учебно-методическое пособие / А.С. Кузнецов, С.В. Разливинская, Е.Г. Шмакова. — Москва : РТУ МИРЭА, 2022. — 48 с. — ISBN 978-5-7339-1667-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-

библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/311282> (дата обращения: 29.03.2025). — Режим доступа: для авториз. Пользователей.

73. МАЙЕР Р.В. Основы компьютерного моделирования: Учебное пособие. Глазов: ГГПИ, 2005. 25 с.

74. Могилев А.В., Пак Н.И., Хеннер Е.К. Информатика: Учеб. пособие для студ. пед. вузов / Под ред. Е.К.Хеннер.--- М.: Изд.центр "Академия", 2001. --- 816 с.

75. Гультяев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс -- СПб.: Питер, 2000. -- 432 с.

76. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике: В 2-х частях. Часть первая.-- М.: Мир, 1990.-- 400 с.

77. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: Учеб. пособие для вузов \ Т.Н. Гратман, Д.В. Клушин. - М.: ИКЦ "Академкнига", 2006. - 416 с.

78. Гартман Т. Н., Советин Ф. С. Аналитический обзор современных пакетов моделирующих программ для компьютерного моделирования химико-технологических систем // Успехи в химии и химической технологии. 2012. №11 (140). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-sovremennyh-paketov-modeliruyuschih-programm-dlya-kompyuternogo-modelirovaniya-himiko-tehnologicheskikh-sistem> (дата обращения: 07.04.2025).

79. Компьютерное моделирование химико-технологических процессов в программе Chemcad: практическое руководство для технологов и проектировщиков: учебное пособие для вузов / О.В. Перерва, Т.Н. Гартман, А.В. Панкрушина, Ф.С. Советин. - Санкт-Петербург: Лань, 2024. - 184 с. ISBN 978-5-507-49213-8

80. Гельгор А.Л. Теоретико-информационные основы телекоммуникационных систем: учеб. пособие / Гельгор А.Л., Попов Е.А. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 288 с.

81. Макаров, Р. И. Анализ и синтез информационных систем : учеб. пособие / Р. И. Макаров, Е. Р. Хорошева ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г.

Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 251 с. – ISBN 978-5-9984-1001-7

82. Самойлов В. Н. Теоретико-информационный анализ сложных систем / В. Н. Самойлов; Объед. ин-т ядер. исслед. Науч. центр прикл. исслед. Лаб. информ. технологий. - Дубна : ОИЯИ, 2002. - 330 с.

83. Ильина Е.А., Попов С.Н., Кочержинская Ю.В., Окжос К.М., Ахметова А.У. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ ПО ОБРАБОТКЕ БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ // Фундаментальные исследования. 2016. № 5-2. С. 247-251; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40283> (дата обращения: 10.04.2025).

84. Теоретико-информационный анализ синергетического управления процессами в сложных системах: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.13.01 ; 05.13.12 / Финогеев А.Г.

85. Системный анализ: оптимизация и принятие решений: учеб. пособие / Э.Н. Гаврилова, С.А. Зайцев, И.В. Зайчикова [и др.]; под общ. ред. И.А. Корольковой; Моск. ун-т им. С.Ю. Витте; каф. ИС [Электронное издание]. – Москва: изд. ЧОУВО «МУ им. С.Ю. Витте», 2025. – 4,5 Мб.

86. Системный анализ: управление и обработка информации: учеб. пособие: / Б.А. Аль-Нами, И.В. Андросова, О.Е. Гудкова [и др.]; под общ. ред. И.А. Корольковой; Моск. ун-т им. С.Ю. Витте; каф. ИС [Электронное издание]. – Москва: изд. ЧОУВО «МУ им. С.Ю. Витте», 2025. – 5,2 Мб.

87. Цифровая экономика РФ. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. – URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/> (дата обращения: 26.05.2025). – Текст: электронный.

88. Хабаху, С.Н. Информационные технологии в экономике и социальной сфере: пути развития и применения / С.Н. Хабаху, В.А. Вальдман, Р.Н. Фролов // Экономика и предпринимательство. – 2012. – № 4 (27). – С. 304–307. – ISSN 1999-2300.

89. Теория управления: учебник / Российская академия государственной службы при Президенте РФ, Волгоградская академия государственной службы, Орловская академия государственной службы; ред.: А.Л. Гапоненко, А.П. Панкрухин. – Москва: РАГС, 2003. – 558 с.: табл. – Глоссарий: с. 539–558. – Библиогр. в конце глав. – (Учебники Российской академии государственной службы при Президенте РФ). – ISBN 5-7729- 0084-6 (в пер.)

90. Черткова, Е.А. Программная инженерия. Визуальное моделирование программных систем: учебник для вузов / Е.А. Черткова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Юрайт, 2025. – 146 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-18197-5. – URL: <https://urait.ru/bcode/562413> (дата обращения: 10.06.2025). – Текст: электронный.

91. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука: пер. с англ. / Р. Шеннон; под ред. Е.К. Масловского. – Москва: Мир, 1978. – 418 с.: ил.; 22 см.

92. Плотников, А.В. Идеи Питера Друкера в итеративно-инкрементном подходе к разработке программного обеспечения и управлению / А.В. Плотников, А.А. Плотникова, С.А. Елькин // Московский экономический журнал. – 2023. – № 1. – ISSN 2413-046X. – URL: <https://qje.su/ekonomicheskaya-teoriya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-1-2023-41/> (дата обращения: 10.06.2025). – Текст: электронный

93. Карпенко Петр Павлович, Селезнев Андрей Васильевич, Пелогейко Александр Викторович, Чебунина Маргарита Васильевна, Буравцова Дарья Александровна, Башкинцева Мария Викторовна ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА // Столыпинский вестник. 2022. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovy-sistemnogo-analiza> (дата обращения: 12.12.2025).

94. Малахова Елена Владимировна ПОНЯТИЕ СИСТЕМЫ И ОСНОВНЫЕ ПАРАДИГМАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА // Общество: философия, история, культура. 2021. №6 (86). URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-sistemy-i-osnovnye-paradigmalnye-osnovaniya-sistemnogo-podhoda> (дата обращения: 12.12.2025).

95. Бузин Валерий Николаевич О роли системного подхода к социальному управлению медиaprостранством // Среднерусский вестник общественных наук. 2011. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-rol-i-sistemnogo-podhoda-k-sotsialnomu-upravleniyu-mediaprostranstvom> (дата обращения: 12.12.2025).

96. Захарова Алена Александровна, Шкляр Алексей Викторович Визуальные модели // Проблемы информатики. 2011. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vizualnye-modeli> (дата обращения: 12.12.2025).

97. Гратинский В. А., Новиков Е. М., Захаров И. С. ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕРИФИКАЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПРОГРАММ // Труды ИСП РАН. 2020. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekspertnaya-otsenka-rezultatov-verifikatsii-instrumentov-verifikatsii-modeley-programm> (дата обращения: 12.12.2025).

98. Езова Наталья Сергеевна, Кузнецов Денис Борисович Верификация параллельных программ // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2012. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-parallelnyh-programm> (дата обращения: 12.12.2025).

99. Вельдер С. Э., Шалыто А. А. Методы верификации моделей автоматных программ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. №53. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-verifikatsii-modeley-avtomatnyh-programm> (дата обращения: 12.12.2025).

100. Сальников А. В., Французов М. С., Виноградов К. А., Пятунин К. Р., Никулин А. С. ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ // Известия вузов. Машиностроение. 2022. №9 (750). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-i-validatsiya-kompyuternyh-modeley> (дата обращения: 12.12.2025).

101. Е.В. Бурляева, В.В. Кононенко, В.Ф. Корнюшко, С.В. Разливинская Алгоритмы и программа верификации функциональных моделей // Программные продукты и системы. 2021. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-i-programma-verifikatsii-funktsionalnyh-modeley> (дата обращения: 12.12.2025).

102. Павел Юрьевич Елсуков Принципы верификации информационных моделей и алгоритмов // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. №2 (19). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-verifikatsii-informatsionnyh-modeley-i-algoritmov> (дата обращения: 12.12.2025).

103. Бабкин Е. А., Разиньков В. В. Верификация событийных имитационных моделей // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2012. №4 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-sobytiynyh-imitatsionnyh-modeley> (дата обращения: 12.12.2025).

104. Иванов А. М., Власов А. И. Верификация программных моделей коммуникационных сетей // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-programmnyh-modeley-kommunikatsionnyh-setey> (дата обращения: 12.12.2025).

105. Волович М. Е., Дерюгина О. А. Верификация UML-моделей программных систем // Cloud of science. 2015. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-uml-modeley-programmnyh-sistem> (дата обращения: 12.12.2025).

106. Сергиевский М. В., Кирпичникова К. К. Валидация и оптимизация диаграмм классов uml // Cloud of science. 2018. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/validatsiya-i-optimizatsiya-diagramm-klassov-uml> (дата обращения: 12.12.2025).

107. Семенов В. А., Морозов С. В., Ильин Д. В. Комбинированный метод верификации масштабных моделей данных // Труды ИСП РАН. 2014. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kombinirovannyy-metod-verifikatsii-masshtabnyh-modeley-dannyh> (дата обращения: 12.12.2025).

108. Минаева Е. В., Рябова Т. Ф., Деева В. А. Методология исследования сложных систем // Российское предпринимательство. 2008. №2-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-issledovaniya-slozhnyh-sistem> (дата обращения: 16.02.2026).

109. Семенов В. А., Морозов С. В., Тарлапан О. А. Инкрементальная верификация объектно-ориентированных данных на основе спецификации ограничений // Труды ИСП РАН. 2004. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/inkrementalnaya-verifikatsiya-obektno-orientirovannyh-dannyh-na-osnove-spetsifikatsii-ogranicheniy> (дата обращения: 12.12.2025).

110. Сергиевский М. В., Конкин А. Ю. Использование дескрипционной логики для оптимизации диаграмм классов UML // Cloud of science. 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-deskriptsionnoy-logiki-dlya-optimizatsii-diagramm-klassov-uml> (дата обращения: 12.12.2025).

111. Дерюгина О. А. Программно-математические средства рефакторинга UML-диаграмм классов с учетом заданных критериев качества // Cloud of science. 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmno-matematicheskie-sredstva-refaktoringa-uml-diagramm-klassov-s-uchetom-zadannyh-kriteriev-kachestva> (дата обращения: 12.12.2025).

112. Дерюгина О. А. Семантика и семантически эквивалентные трансформации UML-диаграмм классов // Труды МФТИ. 2015. №2 (26). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/semantika-i-semanticheski-ekvivalentnyye-transformatsii-uml-diagramm-klassov> (дата обращения: 12.12.2025).

113. Жихарев А. Г., Маторин С. И., Михелев М. В., Цоцорина Н. В. Формализация бизнеса с помощью графоаналитических моделей // Экономика. Информатика. 2009. №1 (56). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizatsiya-biznesa-s-pomoschyu-grafoanaliticheskikh-modeley> (дата обращения: 12.12.2025).

114. Салибекян Сергей Михайлович, Панфилов Пётр Борисович. Формализация dataflow-модели вычислительного процесса // Объектные

системы. 2013. №1 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizatsiya-dataflow-modeli-vychislitelnogo-protssessa> (дата обращения: 12.12.2025).

115. Баркович Александр Аркадьевич ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДИСКУРС-АНАЛИЗ: МОДЕЛИ ФОРМАЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРИЗАЦИИ // Труды БГТУ. Серия 4: Принт- и медиатехнологии. 2022. №2 (261). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/funktsionalnyy-diskurs-analiz-modeli-formalizatsii-i-strukturizatsii> (дата обращения: 12.12.2025).

116. Дубинин Виктор Николаевич, Вяткин Валерий Владимирович Формализация моделей выполнения функциональных блоков IEC 61499 // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2011. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizatsiya-modeley-vypolneniya-funktsionalnyh-blokov-iec-61499> (дата обращения: 12.12.2025).

117. Федотов Владислав Харитонович, Будников Юрий Владиславович О формализации моделей представления знаний в интеллектуальных информационных системах // Вестник ЧГУ. 2006. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-formalizatsii-modeley-predstavleniya-znaniy-v-intellektualnyh-informatsionnyh-sistemah> (дата обращения: 12.12.2025).

118. Воробьева Диана Евгеньевна Формализация модели мониторинга защищенности работы СУБД SQL // I-methods. 2023. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizatsiya-modeli-monitoringa-zaschischennosti-raboty-subd-sql> (дата обращения: 12.12.2025).

119. Микони С. В. Формализация познавательного процесса на основе базиса моделей // Онтология проектирования. 2018. №1 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizatsiya-poznavatel'nogo-protssessa-na-osnove-bazisa-modeley> (дата обращения: 12.12.2025).

120. Системный анализ: оптимизация и принятие решений: учеб. пособие / Э.Н. Гаврилова, С.А. Зайцев, И.В. Зайчикова [и др.]; под общ. ред. И.А. Корольковой; Моск. ун-т им. С.Ю. Витте; каф. ИС [Электронное издание]. – Москва: изд. ЧОУВО «МУ им. С.Ю. Витте», 2025. – 4,5 Мб.

121. Системный анализ: управление и обработка информации: учеб. пособие: / Б.А. Аль-Нами, И.В. Андросова, О.Е. Гудкова [и др.]; под общ. ред. И.А. Корольковой; Моск. ун-т им. С.Ю. Витте; каф. ИС [Электронное издание]. – Москва: изд. ЧОУВО «МУ им. С.Ю. Витте», 2025. – 5,2 Мб.

122. Franz Baader and Diego Calvanese and eborah L. McGuinness and Daniele Nardi and Peter F. Patel-Schneider. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications. — Cambridge University Press, 2003. — ISBN 0-521-78176-0

123. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. — М.: ИД «Вильямс», 2006. — 1408 с. — ISBN 5-8459-0887-6.

124. Кучуганов Александр Валерьевич Дескрипционная логика поиска объектов на изображениях // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №3 (11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/deskriptionnaya-logika-poiska-obektov-na-izobrazheniyah> (дата обращения: 25.12.2025).

125. Сергиевский М. В., Конкин А. Ю. Использование дескрипционной логики для оптимизации диаграмм классов UML // Cloud of science. 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-deskriptionnoy-logiki-dlya-optimizatsii-diagramm-klassov-uml> (дата обращения: 25.12.2025).

126. Литвинов В. В., Богдан И. В. Формальная верификация диаграммы классов // ММС. 2013. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalnaya-verifikatsiya-diagrammy-klassov> (дата обращения: 25.12.2025).

127. Дерюгина О. А. Программно-математические средства рефакторинга UML-диаграмм классов с учетом заданных критериев качества // Cloud of science. 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmno-matematicheskie-sredstva-refaktoringa-uml-diagramm-klassov-s-uchetom-zadannyh-kriteriev-kachestva> (дата обращения: 25.12.2025).

128. Hudelot C., Atif J., Bloch I. Integrating bipolar fuzzy mathematical morphology in description logics for spatial reasoning // European Conference on Artificial Intelligence ECAI 2010. Lisbon. Portugal (Aug 2010). Pp. 497-502.

129. Zoe Falomir, Ernesto Jim'enez-Ruiz, M. Teresa Escrig, Lled'ó Museros. Describing Images using Qualitative Models and Description Logics / Preprint submitted to SPATIAL

130. Fu K.S. Syntactic Methods in pattern recognition. Academic Press. New York and London. 1974. Русский перевод: Фу К. Структурные методы в распознавании образов. М.: Мир. 1977. 319 с.

131. Бычков И.В., Ружников Г.М., Фёдоров Р.К., Авраменко Ю.В. Интерпретатор языка SOQL для обработки растровых изображений // Вычислительные технологии. Т. 21. №1. 2016. С. 49-59.

132. Кучуганов А.В. Поиск и описание искусственных объектов на аэрокосмоснимках // Седьмая международная конференция "Системный анализ и информационные технологии" САИТ - 2017 (13 - 18 июня 2017 г., г. Светлогорск, Россия): Труды конференции. ФИЦ ИУ РАН. 2017. С. 644-649. ISBN 978-5-904466-36-7.

133. Zoe Falomir, Ernesto Jim'enez-Ruiz, M. Teresa Escrig, Lled'ó Museros. Describing Images using Qualitative Models and Description Logics / Preprint submitted to SPATIAL COGNITION AND COMPUTATION / Taylor & Francis. Volume 11. Issue 1. January 2011. Pp. 45-74 Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/13875868.2010.545611>.

134. Интернет-ресурс по современным методологиям верификации и языкам описания аппаратуры. - <http://testbench.in/> (дата обращения – 29.12.2025)

135. Hardware Design Verification: Simulation and Formal Method-Based Approaches, William K. Lam, Prentice Hall PTR, March 03, 2005;

136. The Verilog PLI Handbook Second Edition, Stuart Sutherland, USA New York, 2002;

137. Coverage Technology User Guide, Synopsys, August 2011;

138. SystemVerilog for Verification, Chris Spear: Marlboro, USA, Springer Science+Business Media, 2008

139. Интернет-ресурс по современным методологиям верификации. - <http://verification-academy.mentor.com/> (дата обращения 29.12.2025)

140. Mentor Graphics UVM/OVM Documentation (verification methodology cookbook), July 2011

141. Хисамбеев И. Ш. Роль стохастического тестирования в функциональной верификации микропроцессоров // Программные продукты и системы. 2012. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-stohasticheskogo-testirovaniya-v-funktsionalnoy-verifikatsii-mikroprotsessorov> (дата обращения: 29.12.2025).

142. Аряшев С.И., Краснюк А.А., Чибисов П.А. Адаптация тестов для оценки производительности 64-разрядного универсального суперскалярного микропроцессора / Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем-2005: сб. науч. тр.; [под ред. А.Л. Стемпковского]. М.: ИППМ РАН, 2005. С. 263-268.

143. Аряшев С.И., Николина Н.В. Влияние буферизации данных на производительность подсистемы памяти / Электроника, микро- и нанoeлектроника: сб. науч. тр.; [под ред. В.Я. Стенина]. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С. 164-167.

144. Попов Валерий Петрович Концепция системной памяти в системном анализе // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2016. №1 (11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-sistemnoy-pamyati-v-sistemnom-analize> (дата обращения: 29.12.2025).

145. Махбуба Эргашева Системный анализ образования // ОИИ. 2021. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-obrazovaniya> (дата обращения: 29.12.2025).

146. Спивак Владимир Александрович СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ - КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМНОГО И КРИТИЧЕСКОГО ПОДХОДА // Лидерство и менеджмент. 2022. №2. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-klyuchevoy-element-sistemnogo-i-kriticheskogo-podhoda> (дата обращения: 29.12.2025).

147. Михелёв Владимир Владимирович СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНЫЙ ПОДХОД К СИСТЕМНОМУ АНАЛИЗУ: ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА // Экономика. Информатика. 2022. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemno-obektnyy-podhod-k-sistemnomu-analizu-osobennosti-i-preimuschestva> (дата обращения: 29.12.2025).

148. Звягин Л. С. Системный анализ и построение моделей // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-i-postroenie-modeley> (дата обращения: 29.12.2025).

149. Минаков Владимир Федорович, Остроумов Алексей Александрович, Радченко Мария Викторовна Системный анализ логистических потоков // Статистика и экономика. 2015. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-logisticheskikh-potokov> (дата обращения: 29.12.2025).

150. Волкова Виолетта Николаевна, Черненькая Людмила Васильевна, Магер Владимир Евстафьевич Классификация моделей в системном анализе // Информатика, телекоммуникации и управление. 2013. №3 (174). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-modeley-v-sistemnom-analize> (дата обращения: 29.12.2025).

151. Боргоякова Т. Г., Лозицкая Е. В. Системный анализ и математическое моделирование // ИВД. 2018. №1 (48). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-i-matematicheskoe-modelirovaniye> (дата обращения: 29.12.2025).

152. Сулейманов Джавдет Шевкетович, Фридман Александр Яковлевич, Гильмуллин Ринат Абрекович, Кулик Борис Александрович СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА // Труды Кольского научного центра РАН. 2021. №5 (12). URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-zadachi-modelirovaniya-estestvennogo-yazyka> (дата обращения: 29.12.2025).

153. Богнюков Александр Алексеевич, Зорькин Дмитрий Юрьевич, Шведов Евгений Геннадьевич СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. №6 (242). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-i-modelirovanie-sistem-massovogo-obsluzhivaniya> (дата обращения: 29.12.2025).

154. Калюжный И. Л., Калюжная Т. В., Митус В. А. Применение принципов системного анализа в моделировании инновационного процесса // Экономика промышленности. 2010. №4 (52). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-printsipov-sistemnogo-analiza-v-modelirovanii-innovatsionnogo-protssessa> (дата обращения: 29.12.2025).

155. Бобков Сергей Петрович, Астраханцева Ирина Александровна, Галиаскаров Эдуард Геннадьевич ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение . 2021. №1 (65). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sistemnogo-podhoda-pri-razrabotke-matematicheskikh-modeley> (дата обращения: 29.12.2025).

156. Клейнер Георгий Борисович, Щепетова Светлана Евгеньевна Системная парадигма в развитии: научная школа системного анализа и моделирования Финуниверситета – ЦЭМИ РАН // SAEC. 2019. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnaya-paradigma-v-razvitii-nauchnaya-shkola-sistemnogo-analiza-i-modelirovaniya-finuniversiteta-tsemi-ran> (дата обращения: 29.12.2025).

157. Демин А. А., Карпунин А. А., Ганев Ю. М. Методы верификации и валидации сложных программных систем // Программные продукты и системы. 2014. №4 (108). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-verifikatsii-i-validatsii-slozhnyh-programmnyh-sistem> (дата обращения: 16.02.2026).

158. Морозов Владимир Васильевич -. Системный анализ и моделирование процессов управления организационно-техническими системами..... // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2009. №2 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-i-modelirovanie-protsessov-upravleniya-organizatsionno-tehnicheskimi-sistemami> (дата обращения: 29.12.2025).

159. Замула А. А. Системный анализ и формализация деятельности коммерческого банка // ВЕЖПТ. 2012. №3 (60). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-i-formalizatsiya-deyatelnosti-kommercheskogo-banka> (дата обращения: 29.12.2025).

160. Боркин Владимир Сергеевич Особенности системного анализа и моделирования потенциально опасных операций технологических процессов // ГИАБ. 2014. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-sistemnogo-analiza-i-modelirovaniya-potentsialno-opasnyh-operatsiy-tehnologicheskikh-protsessov> (дата обращения: 29.12.2025).

161. Кошечкин К. А., Гладкая Е. В., Кондратьева Я. Ю. Валидация фармацевтических информационных систем: вычислительное программное обеспечение и персональные компьютеры // Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. 2015. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/validatsiya-farmatsevticheskikh-informatsionnyh-sistem-vychislitelnoe-programmnoe-obespechenie-i-personalnye-kompyutery> (дата обращения: 16.02.2026).

162. Arthur Zbrozek, Joy Hebert, Gregory Gogates, Rod Thorell, Christopher Dell, Elizabeth Molsen, Gretchen Craig, Kenneth Grice, Scottie Kern, Sheldon Hines Валидация электронных систем сбора данных «Оценок Результатов Пациентами» — Рекомендации для клинических исследователей: отчёт Целевой Группы ISPOR по надлежащей исследовательской практике валидации ePRO систем // Качественная клиническая практика. 2015. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/validatsiya-elektronnyh-sistem-sbora-dannykh>

dannyh-otsenok-rezultatov-patsientami-rekomendatsii-dlya-klinicheskikh-issledovateley-otchyot (дата обращения: 16.02.2026).

163. Samonov A.V., Samonova G.N. Methodology and tools for development and verification of formal fUML models of requirements and architecture for complex software and hardware systems // Труды ИСП РАН. 2018. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/methodology-and-tools-for-development-and-verification-of-formal-fuml-models-of-requirements-and-architecture-for-complex-software-and> (дата обращения: 16.02.2026).

Научное издание

Кузнецов Андрей Сергеевич

**ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ,
ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ: ПРИНЦИПЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ,
КЛАССИФИКАЦИИ И ВЕРИФИКАЦИИ**

Монография

Компьютерная верстка: А.С. Кузнецов

Подписано к использованию 19.02.2026 г.

Объем данных — 2,28 Мб.

Мин. сист. требования: Adobe Acrobat Reader.

Размещено в открытом доступе на сайте www.scientia-pub.org

Издательский дом «Сциентиа»

г. Санкт-Петербург, пер. Дегтярный, д. 22, литер А

Тел. +7 (812) 649-93-76

www.scientia-pub.org

email: info@scientia-pub.org