

На правах рукописи



Охтилев Павел Алексеевич

**АЛГОРИТМЫ И ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ
ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН).

- Научный руководитель: **Соколов Борис Владимирович**, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук.
- Официальные оппоненты: **Ефимов Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора – директор по научной работе открытого акционерного общества «Авангард», г. Санкт-Петербург;
- Мосин Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, докторант очной докторантуры федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации.
- Ведущая организация: Акционерное общество «Конструкторское бюро «Арсенал» имени М.В. Фрунзе», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2019 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета Д.002.199.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук <http://www.spiiras.nw.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.002.199.01
кандидат технических наук



А.А. Зайцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в условиях необходимости повышения эффективности и конкурентоспособности современных высокотехнологичных предприятий и организаций ключевым фактором развития становится комплексная автоматизация и интеллектуализация их деятельности на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) создаваемых и используемых ими изделий. Этот факт подтверждается общемировыми тенденциями разработки и внедрения соответствующих информационных технологий (ИТ) и развития связанных с ними концепций «Индустрии 4.0», цифровой экономики, цифровых двойников, виртуальных предприятий, единого информационного пространства (ЕИП), информационной поддержки ЖЦ изделий.

Развитие этих концепций определено тем фактом, что многие предметные области (ПрО) характеризуются наличием *сложных организационно-технических объектов (СОТО)*, представленных полиструктурами, цели деятельности которых связаны с их изделиями (проектами). В диссертационном исследовании в качестве примера прикладной области, представленной такими объектами, рассматривается область, связанная с созданием и применением *космических средств (КСр)* соответствующими организациями и предприятиями ракетно-космической отрасли РФ. В таких системах циркулируют сверхбольшие потоки информации, используемые информационные ресурсы территориально распределены и представлены совокупностью квазиструктурированных данных, бизнес-процессы слабо формализованы и трудно поддаются оптимизации, фрагментарно автоматизированы решаемые задачи, а их результаты зачастую не согласованы. Совокупность указанных факторов ведет к слабо прогнозируемому уровню качества получаемых организациями результатов деятельности и его потенциальному снижению.

Так, в ракетно-космической отрасли уровень сложности и компьютеризации целого ряда технологических и организационных процессов на предприятиях разработчиков и эксплуатантов космических комплексов (КК) приводят к накоплению существенных объемов организационно-технической и технологической информации различной природы о КСр на всех этапах их ЖЦ. Эффективное использование этой информации, согласно ГОСТ по системе информации о техническом состоянии (ТС) КК и входящих в их состав изделий, а также согласно Стратегии цифровой трансформации ракетно-космической отрасли РФ, предложенной Госкорпорацией «Роскосмос», может быть обеспечено при условии автоматизации выполнения работ по её сбору, интеграции, совместной обработке и анализу с целью получения обобщенных сведений и данных о ТС изделий на всех этапах их ЖЦ. Такую деятельность принято называть *информационно-аналитической поддержкой ЖЦ изделий*. В результате её автоматизации становится возможным формирование электронного паспорта изделия, содержание которого отражает информацию о ТС КСр.

Решение задачи своевременного обеспечения заинтересованных лиц, принимающих решения (ЛПР) по управлению ЖЦ изделий, такой актуальной и достоверной информацией позволит повысить обоснованность их решений в части оптимизации процессов на предприятиях, обеспечения требуемых значений

показателей качества и надежности КСр. Однако по сей день эта задача решается вручную и фрагментарно, а конструктивных научно обоснованных подходов к её решению с учетом указанных аспектов к настоящему времени не предложено. Таким образом, тема предлагаемого диссертационного исследования о возможности *автоматизации информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр* (в особенности этапов их создания и применения) на основе разработки соответствующего модельно-алгоритмического комплекса *безусловно является актуальной*.

Степень разработанности темы исследования. Сформулированная в диссертации задача была исследована и решена на основе корректного использования и глубинного сочетания фундаментальных концепций, принципов и подходов, используемых в системном анализе, общей теории систем, теории вычислительных процессов, теории процессов, теорий формальных логик (в особенности дескрипционной логики), теории концептуального программирования, программной инженерии, инженерии требований, теории искусственного интеллекта, теории формальных грамматик, теории мультиагентных систем, теории мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных объектов. Среди выдающихся отечественных исследователей указанных направлений можно назвать Соколова Б.В., Охтилева М.Ю., Юсупова Р.М., Гаврилову Т.А., Городецкого В.И., Ильина В.Д., Когаловского М.Р., Нариньяни А.С., Погорелова В.И., Поспелова Д.А., Смирнова А.В., Тыугу Э.Х., Федорова И.Г., Цуканову О.А. Среди зарубежных исследователей можно отметить Буча Г., Ванда Я., Вебера Р., Гелерта А., Кальванезе Д., Кодда Э., Люггера Дж. Ф., МакГинесс Дебору Л., Норвига П., Пан Джефа З., Рассела С., Розэмана М., Рудольфа С., Хоррокса И.

Необходимо отметить, что исследуемая задача информационно-аналитической поддержки ЖЦ изделий в силу целого ряда особенностей, рассмотренных в диссертационной работе, требует привлечения системно-кибернетического подхода к созданию соответствующего модельно-алгоритмического комплекса. В связи с этим, в рамках исследования необходимо посредством комплексного моделирования на глубинном межмодельном уровне сочетать предлагаемые указанными авторами формальные подходы, позволяющие успешно решать задачи, составляющие основу информационно-аналитической поддержки ЖЦ изделий. Так, например, вопросам комплексного моделирования и многовариантного планирования технологических процессов, а также квалиметрии моделей и полимодельных комплексов уделено внимание в работах Соколова Б.В., вопросам мониторинга ТС СОТО – в работах Охтилева М.Ю., Шмелева В.В., мультиагентным системам в среде распределенных вычислительных устройств – в работах Городецкого В.И., Рассела С., Норвига П., онтологическому моделированию – в работах Цукановой О.А., Смирнова А.В., Кальванезе Д., Пан Джефа З., экспертным системам – в работах Поспелова Д.А., Гавриловой Т.А., Люггера Дж. Ф.

Цель и задачи исследования. Цель исследования заключается в повышении функциональной эффективности обеспечения заинтересованных организаций актуальной и достоверной информацией о ТС КСр на основе разработки модельно-алгоритмического комплекса автоматизированной информационно-аналитической поддержки их ЖЦ.

Поставленная в исследовании цель достигается посредством решения следующих **научно-технических задач**:

- идентификации и совместного учета информационных, поведенческих и функциональных требований к системе информационно-аналитической поддержки (СИАП) ЖЦ КСр на основе комплексного моделирования разноаспектных экспертных знаний о ПрО;
- формализации и совместного представления взаимосвязанных бизнес-процессов информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр на основе извлечения и согласования неполных и противоречивых экспертных знаний о них;
- уточнения в бизнес-процессах функциональных задач интеграции данных и приложений информационно-аналитической поддержки и порядка обработки и анализа этих данных с целью оценивания ТС КСр;
- осуществления инвариантного перехода от описания ПрО к вычислительным моделям (ВМ), приблизив их структурные свойства к исходным требованиям, и, в последующем, к схемам программ с возможностью организации потоковых асинхронных и параллельных вычислений по ним в соответствии с аналогичной спецификой и требованиями к ходу бизнес-процессов информационно-аналитической поддержки;
- автоматизированной верификации формируемого полимодельного комплекса и оценивания функциональной эффективности СИАП на основе разработки методики и алгоритмов расчета её частных показателей.

Объект исследования: процесс информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр.

Предмет исследования: модели и алгоритмы информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана формальная онтологическая система, позволяющая на конструктивной основе специфицировать и совместно учитывать информационные, поведенческие и функциональные требования, предъявляемые к облику СИАП ЖЦ СОТО (в т.ч. КСр) и осуществлять инвариантный переход от описания ПрО к моделям программного обеспечения (ПО) СИАП;
2. Разработана оригинальная онтологическая модель представления знаний (МПЗ) о бизнес-процессах информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр как СОТО, отличающаяся от существующих моделей ориентацией на извлечение и совместное представление разноаспектных знаний экспертов ПрО об особенностях реализации этапов ЖЦ СОТО в виде поведенческих требований, предъявляемых к комплексу программ СИАП и их интероперабельности;
3. Впервые разработана онтологическая МПЗ о согласовании вычислительных задач (СВЗ), позволяющая уточнять бизнес-процессы информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр как СОТО в виде функциональных требований к порядку интеграции данных, их обработки и анализа;
4. Разработан новый алгоритм структурно-параметрического синтеза ВМ в виде G-моделей, обеспечивающий в автоматизированном режиме инвариантный

переход от специфицирования требований к конструктивизму задания отношений вычислимости, и, как следствие, получению схем программ, по которым могут быть организованы вычисления;

5. Разработан новый алгоритмический комплекс верификации моделей информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр как СОТО, позволяющий в рамках созданной методики обоснованно оценивать её функциональную эффективность на основе сформированной структуры показателей.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в разработке совокупности взаимосвязанных МПЗ с ориентацией на моделирование последовательности уточняющих спецификаций задач автоматизированной информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО (в т.ч. КСр), а также алгоритмов синтеза и верификации указанных моделей, обеспечивающих на формальной основе возможность осуществить инвариантный переход от описания требований в ПрО к моделям ПО СИАП. Практическая значимость выполненной работы состоит в повышении функциональной эффективности информационно-аналитической деятельности представителей организаций разработчиков и эксплуатантов КК по оперативному обеспечению заинтересованных лиц актуальной и достоверной информацией о ТС КСр на всех этапах их ЖЦ на основе комплексного моделирования экспертных знаний, их верификации и последующей автоматизации их использования при оценивании ТС КСр, что в результате обеспечивает повышение оперативности и обоснованности выработки управленческих воздействий на ЖЦ КСр, направленных на оптимизацию показателей их качества и надежности.

Методология и методы исследования. Методология исследования основана на использовании междисциплинарного подхода, базирующегося на фундаментальных положениях таких научных отраслей, как системный анализ, программная инженерия, инженерия требований, математическое моделирование, теория искусственного интеллекта. При решении поставленных задач в числе прочих применялись методы комплексного имитационно-аналитического, онтологического, процессного и объектного моделирования, концептуального программирования и распознавания образов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Онтологическая модель представления знаний о бизнес-процессах информационно-аналитической поддержки создания и применения космических средств.
2. Онтологическая модель представления знаний о согласовании вычислительных задач информационно-аналитической поддержки создания и применения космических средств.
3. Алгоритм структурно-параметрического синтеза вычислительных моделей в виде G-моделей по онтологическим спецификациям требований к системе информационно-аналитической поддержки создания и применения космических средств.
4. Алгоритм проверки согласованности (выполнимости и онтологической выразительности) спецификаций требований к системе информационно-аналитической поддержки создания и применения космических средств.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждаются всесторонним анализом современного состояния исследований задачи информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО, корректностью предложенных моделей и алгоритмов, согласованностью результатов экспериментов, проведенных с использованием программной реализации, апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах, докладах на научно-технических конференциях и семинарах, положительными результатами внедрения основных научных положений диссертации в рассматриваемой ПрО, что подтверждается 4 актами о внедрении.

Личный вклад автора. Содержание диссертационной работы и научная новизна отражают персональный вклад автора. Научное исследование было проведено при общем руководстве д.т.н., профессора Соколова Б.В. Представленные научные результаты получены автором лично. Программная реализация модельно-алгоритмического комплекса получена при участии автора.

Реализация и внедрение результатов исследований. Результаты диссертационной работы использованы:

– в научно-исследовательских работах, выполненных в СПИИРАН – гранты РФФИ № 16-07-00779-а, 17-29-07073-офи_м, 18-08-01505-а, 0073-2018-0003 – при разработке онтологической системы информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО;

– в рамках выполняемой АО «РКЦ «Прогресс» опытно-конструкторской работы по созданию комплекса ракеты-носителя (РН) «Союз-2» (шифр «Русь») – при решении задач совершенствования системы информации о ТС и надежности КК и входящих в их состав изделий на основе разработки полимодельного комплекса информационно-аналитической поддержки ЖЦ РН «Союз-2»;

– в рамках выполняемой АО «НИО ЦИТ Петрокомета» (Госкорпорация «Ростех») составной части опытно-конструкторской работы на тему «Разработка единого виртуального электронного паспорта космической ракеты-носителя «Союз-2» – при разработке алгоритмического комплекса синтеза и верификации моделей и разработке СИАП ЖЦ КСр;

– в рамках учебно-педагогической деятельности при ФГАОУ ВО «СПбГУАП» и сопряженных с ней дисциплин «Методология программной инженерии (спецификация требований)», «Поддержка жизненного цикла программного обеспечения (спецификация требований)» – при разработке методики оценивания функциональной эффективности информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО.

Апробация результатов работы. Материалы диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих международных, всероссийских и ведомственных конференциях: Научная сессия ГУАП, посвященная дню Космонавтики (2016, 2017, 2018 гг.); XIX и XX международные конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (2017, 2018 гг.); 10-я Всероссийская Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017); Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения) (2017 г.); Восьмая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию

и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017); Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (CTS'2017); III Всероссийская научно-техническая конференция «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения» (2017 г.); Computer Science On-line Conference 2018 (CSOC 2018); XVI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2018)»; 3-я Международная научная конференция «Интеллектуальные информационные технологии в технике и на производстве» (2018 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в **29** печатных работах, среди них **5** работ в журналах, индексируемых в SCOPUS, **4** работы в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Также было зарегистрировано **4** программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа объемом в 408 машинописных страниц состоит из введения, 4 разделов, списка литературы из 274 наименований, списка сокращений и условных обозначений, списка из 85 иллюстраций и 32 таблиц, 4 приложений и предметного указателя.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационного исследования и степень её разработанности, определение научно-технической задачи и постановку цели научного исследования, определение предмета и объекта исследований, методологию и методы исследований, положения, выносимые на защиту, а также краткое изложение содержания и основных результатов диссертации, их научной новизны, теоретической и практической значимости.

В **разделе 1** диссертационного исследования проводится системный анализ состояния исследований задачи автоматизации информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО, рассматриваются существующие модели, методы и технологии информационной поддержки изделий, программной инженерии информационных систем (ИС). Проведенный анализ показал, что на сегодняшний день в явном виде существует актуальная и сложная научно-техническая задача, характеризующаяся, с одной стороны, высокими требованиями, предъявляемыми к структурно-функциональному облику информационно-аналитических систем (ИАС) в части решения совокупности частных задач по оцениванию ТС СОТО, а с другой – необходимостью интеграции приложений (ЕИ – Enterprise Information Integration) и разнородной информации (ЕАИ – Enterprise Application Integration) о состоянии подсистем и элементов СОТО при создании ЕИП организаций в рамках существующих на предприятиях неоднородных автоматизированных систем (АС), функционирующих на разных аппаратных и технологических платформах и использующих различные типы и модели данных.

Задача автоматизации информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО характеризуется следующими аспектами:

- необходимо формирование ЕИП заинтересованных организаций, основанного на совместном учете метаданных гетерогенных информационных ресурсов и результатов функционирования смежных АС при решении комплекса задач,

описанных в рамках концепции информационной поддержки ЖЦ изделий – CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support);

- информационно-аналитическую поддержку ЖЦ СОТО следует рассматривать, с одной стороны, как одну из задач мониторинга ТС СОТО специального вида, а с другой, как комплекс оперативных аналитических вычислений (OLAP, англ. – On-Line Analytical Processing) в режиме реального времени (РВ) с реализацией ETL-принципа (Extraction – Transformation – Loading) в целях обеспечения целостности и конфиденциальности данных в источниках данных;

- необходимо обеспечить совместную реализацию принципов интеграции данных (ЕИ) и интеграции приложений (ЕАИ) на основе формирования мультиагентной архитектуры, задающей одноранговую сеть кооперации интеллектуальных агентов в виде параллельных и асинхронных семантически интероперабельных процессов решения аналитических вычислительных задач в соответствии с требованиями FASMI для OLAP-систем и их предметной ориентацией;

- в основе формализации Про лежит извлечение и представление разноаспектных экспертных знаний о специфике бизнес-процессов информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО. Этот факт определяет необходимость разработки модельно-алгоритмического обеспечения экспертной системы (ЭС), основанного на взаимосвязанных проблемно-ориентированных МПЗ в рамках перспективной технологии автоматизированного проектирования СИАП ЖЦ СОТО, предполагающей формирование баз знаний (БЗ) последовательно уточняющих согласованных спецификаций требований и программ, их синтез, верификацию и трассировку (в т.ч. при решении задач управления изменениями).

В результате проведенного анализа была сформулирована актуальная научно-техническая задача разработки модельно-алгоритмического комплекса автоматизированной информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО. Далее приведена **формальная постановка задачи** диссертационного исследования, структура которой проиллюстрирована на рис. 1.

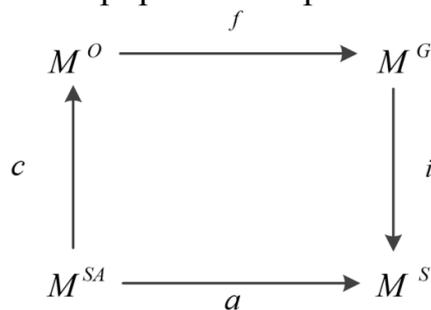


Рис. 1. Коммутативная диаграмма задачи автоматизированной информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО

Дано: $M^{SA} = \{m_i^{SA} | i = 1, \dots, n\}$ – конечное множество моделей Про, каждая из которых характеризует некоторое типовое (одиночное или серийное) изделие, причем заданы конечные множества соответственно объектов и явлений Про, бизнес-процессов информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО и связи между ними $\langle Ob, Ph, Pr, R \rangle$. $Pr = \{pr_v | v = 1, \dots, p\}$ – множество бизнес-процессов вида $pr_v = \langle Event, Action, Condition, Follow \rangle$, где *Event* – множество событий, характеризующих появление новой информации о СОТО, *Action*–

множество действий по обработке и анализу информации, *Condition* – множество условий их применимости, *Follow* – множество отношений следования, задающих порядок исполнения процесса. $M^O = \{Sk, Sf\}$ – множество, совокупность элементов которого называют операциональной моделью, где $Sk = \{sk_h | h = 1, \dots, t\}$ – множество спецификаций (концептуальных схем), задающих семантические отображения на источники данных для доступа к ним в единой терминологии ПрО, причем среди них имеется $sk_h^{ep} \in Sk$ – схема (модель состояния) электронного паспорта изделия, а $Sf = \{sf_v | v = 1, \dots, p\}$ – множество спецификаций функциональных требований (моделей СВЗ), уточняющих процессы pr_v . $M^G = \{m_v^G | v = 1, \dots, p\}$ – множество ВМ в виде G-моделей, определяющих отношения вычислимости на параметрах в соответствии со спецификациями sf_v . $M^S = \{s_v^S | v = 1, \dots, p\}$ – множество схем программ СИАП ЖЦ СОТО.

Найти: во-первых, конструктивное описание и алгоритмическую реализацию следующей композиции частных отображений:

$$1) \quad a = i \circ f \circ c, \quad (1)$$

где c – отображение, ставящее в соответствие элементам m_i^{SA} элементы sk_h и sf_v , конкретизирующие информационные и функциональные требования к ПО, f – отображение, ставящее в соответствие спецификациям sf_v ВМ m_v^G , причем операторы в составе m_v^G используют спецификации sk_h , i – отображение, ставящее в соответствие m_v^G схему программы m_v^S . При этом необходимо определить формальный аппарат и порядок задания моделей M^{SA}, Sk, Sf, M^G, M^S .

Во-вторых, для композиции отображений (1) оптимальную СИАП ЖЦ СОТО, при которой показатель её функциональной эффективности принимает экстремальное значение:

$$2) \quad E^{ias} = f(\delta) \rightarrow \max_{\delta \in \Delta}, \quad (2)$$

где E^{ias} – показатель функциональной эффективности СИАП, рассчитываемый с учетом влияющих на него следующих частных показателей: F^{ds} – показатель реализуемости ЕИП в соответствии с требованиями задачи, Q^{ias} – показатель уровня информационно-аналитической поддержки, характеризуемого оперативностью получения и достоверностью результатов анализа, причем качество получаемых решений определяется, в первую очередь, достоверностью и полнотой исходных данных, согласованностью моделей M^{SA}, M^O, M^G, M^S , корректностью программ. В этом случае допустимые альтернативы реализации СИАП задаются как кортежи, принадлежащие заданному множеству Δ , которое формируется на декартовом произведении множеств моделей вида: $M^{SA} \times M^O \times M^G \times M^S$.

В разделе 2 рассмотрено онтолого-управляемое моделирование бизнес-процессов и СВЗ, модели и алгоритмы доступа к гетерогенным информационным ресурсам, синтез ВМ и схем программ, особенности организации вычислений по ним в рамках мультиагентной архитектуры. На основе сформулированных выше положений был разработан модельно-алгоритмический комплекс СИАП ЖЦ СОТО, в основу которого положена совокупность взаимосвязанных посредством онтологической системы МПЗ. Онтологии могут быть использованы для анно-

тирования и семантической поддержки моделей совместно с декларативно-процедуральными МПЗ на основе принципа онтолого-управляемого проектирования, заключающегося в специфицировании (аппроксимации) концептуализации аналитических вычислительных задач, что позволяет формализовать требования к СИАП, а также верифицировать и согласовывать модели разных уровней представления. Выполнение указанных свойств обеспечивает приближение качественных характеристик создаваемого ПО СИАП к требуемому уровню согласно постановке задачи, за счет чего может быть достигнуто повышение функциональной эффективности информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО.

В качестве формального аппарата для задания онтологических спецификаций требований использовано семейство дескрипционных логик. Данный формальный аппарат обладает рядом преимуществ для решаемой задачи, к числу которых можно отнести выразительность, направленную на специфицирование объектов через их атрибуты и отношения, явное задание БЗ с разделением знаний на интенциональные и экстенциональные, обеспечение семантической интероперабельности. Выбор определенных понятий и отношений между ними в качестве концептов и ролей онтологии позволяет определять проблемно-ориентированные онтологические МПЗ различного вида. Так, онтологической МПЗ O называется такая тройка $\langle CN, RN, \mathcal{I} \rangle$, где CN определяет носитель модели, а RN – множество бинарных отношений на CN , определяющее её сигнатуру, \mathcal{I} – интерпретация. Дескрипционные логики позволяют описывать стабильные интенциональные знания в виде терминологических аксиом (понятий (концептов) и их взаимосвязей (ролей)) и изменяющиеся экстенциональные знания в виде утверждений об индивидах. В соответствии с этим делением дескрипционная логика явно определяет БЗ $\mathcal{K} = \mathcal{T} \cup \mathcal{A}$, где \mathcal{T} – конечное множество терминологических аксиом, а \mathcal{A} – система фактов о ПрО. Аксиомы представляются выражениями вида $C \sqsubseteq D$ или $C \equiv D$, где C и D – произвольные концепты. Факты представляются выражениями вида $a: C$ или $a R b$, где $a, b \in IN$ есть индивиды, C – произвольный концепт, R – роль. Интерпретация \mathcal{I} называется моделью системы фактов \mathcal{A} , если \mathcal{I} является моделью всех фактов из \mathcal{A} . \mathcal{A} называется выполнимой (в терминологии \mathcal{T}), если \mathcal{A} имеет модель (являющуюся одновременно моделью терминологии \mathcal{T} , т.е. $\mathcal{I} \models \mathcal{T}$). Практическое назначение **онтологической системы** (взаимосвязанных онтологических МПЗ) $\Sigma^{ias} = \langle O^{meta}, M^{O^d}, O^t, O^a, \Xi^i \rangle$ в рассматриваемом контексте состоит в том, чтобы создавать иерархию согласованных спецификаций в рамках задаваемых систем фактов \mathcal{A} (см. рис. 2).

В рамках онтологической системы определены следующие элементы: $O^{meta} = \langle CN^{meta}, RN^{meta}, \mathcal{I}^{meta} \rangle$ – онтология верхнего уровня ПрО, позволяющая описывать ПрО и бизнес-процессы в ней; $M^{O^d} = \{O_h^d | h = 1, \dots, t\}$, где $O_h^d = \langle CN_h^d, RN_h^d, AN_h^d, \mathcal{I}_h^d \rangle$ – предметная онтология, позволяющая описывать совокупность объектов и явлений ПрО через множества атрибутов AN_h^d и их значений; $O^t = \langle CN^t, RN^t, \mathcal{I}^t \rangle$ – онтология задач ПрО, уточняющая бизнес-процессы в виде СВЗ-моделей, представленных спецификациями онтологических запросов

к источникам данных посредством схем Sk , аналитических вычислительных задач и порядка их применения; $O^a = \langle CN^a, RN^a, \mathcal{I}^a \rangle$ – прикладная онтология ПрО, уточняющая СВЗ-модели в виде ВМ как совокупности операторов и параметров, причем среди операторов имеются операторы исполнения онтологических запросов к источникам данных с использованием схем из Sk ; Ξ^i – модель машины вывода, ассоциированной с онтологической системой Σ^{ias} и реализующей отображения $\mu, \eta, \gamma, \xi, \delta$.

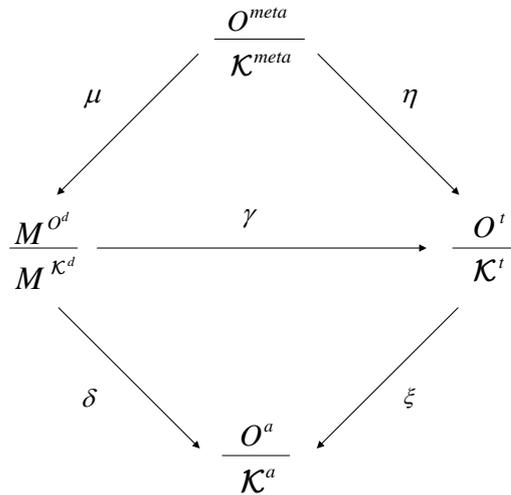


Рис. 2. Диаграмма онтологической системы информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО

Для процессов информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО характерны причинно-следственные связи между событиями, где события выступают как контрольные точки выполнения этапов работ и как выводы о состоянии СОТО на основе направленных аналитических действий (процесс оценивания ТС). Такое содержательное событийно-ориентированное представление с наличием графической нотации позволяет с требуемой степенью адекватности формализовать разноаспектные знания специалистов (экспертов ПрО), связанных с СОТО на всех этапах ЖЦ. Таким образом, была разработана специальная онтологическая **МПЗ о бизнес-процессах информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО** на основе неформализованной нотации BPMN, позволяющая явно задавать модели потоков работ с событийным контролем, разграничением по стадиям и этапам ЖЦ и заданием связей между ними. На рис. 3 представлена взаимосвязь элементов графической нотации и введенных концептов и ролей онтологии. В тексте диссертационной работы представлены разработанные терминологические аксиомы онтологии и модели бизнес-процессов информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО.

Для обеспечения унифицированного доступа к разнородным источникам данных была использована концепция семантических медиаторов, реализуемых посредством метода онтолого-управляемого доступа (Ontology-Based Data Access (OBDA)) к информационным ресурсам, предложенного D. Calvanese, основанного на формировании онтологических концептуальных схем источников данных за счет систем фактов вида $\mathcal{A}^d = \langle \mathcal{M}, \mathcal{DB} \rangle$ ($\mathcal{M}: \Phi \rightsquigarrow \psi$ – множество пра-

вил отображения, англ. – mapping), заданных посредством диалекта дескрипционной логики DL-Lite_A, и трансляции онтологических запросов ψ в запросы Φ на языке, понятном системе управления базой данных DB . Использование указанного метода позволяет в рамках единого аппарата в терминах ПрО формировать утверждения о ней независимо от источника данных и технологии управления им. При этом онтологический конъюнктивный запрос задается выражением:

$$q(\vec{x}) \leftarrow \bigwedge_{i=0}^n A_i(\vec{x}, \vec{y}), \quad (3)$$

где \vec{x} – свободные переменные запроса, \vec{y} – связанные переменные или литералы, A – триплет, определенный в модели данных RDF, вида $\langle Subject, Predicate, Object \rangle$. Запрос q истинен в БЗ \mathcal{K}^d , если $\mathcal{I}^d \models \mathcal{K}^d$ и $\mathcal{I}^d \models q$.

Концептуализация бизнес-процессов (БП) информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО							
Исходные положения							
Нотация БП BPMN Автоматизация потоков работ (Workflow, DocFlow)			Событийно-ориентированные процессы информационно-аналитической поддержки. События – появление новых фактов и явлений в ПрО, подлежащих обработке и анализу. Действия – автоматизируемые задачи по оцениванию ТС СОТО.				
Концепты и роли онтологии бизнес-процессов							
События (Event)			Действие	Отношения (Роли)			
Начальное событие  StartEvent	Промежуточное событие  InterEvent	Конечное событие  FinalEvent	 Action	Указывает на определяемый элемент  Defines	Интероперабельности  MessageTo	Следования  Follow	Предшествования  Follow ⁻
Шлюз (Condition)					Сообщение	Пул (ЖЦ)	Дорожка (ЖЦ)
Эксклюзивный или ExCondition	Инклюзивный IncCondition	Комплексный CCondition	Параллельный PCondition	Условный поток операций  FCondition	 Message	 LifeCycle	 Process

Рис. 3. Концепты и роли онтологии бизнес-процессов информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО

Для единообразного доступа к источникам данных независимо от технологий управления ими был разработан алгоритм автоматического выбора источника данных при исполнении онтологических запросов, осуществляющий обращение к тому или иному медиатору в зависимости от определённого в рамках онтологического запроса уникального идентификатора ресурса (URI) вида:

$$\langle \text{http://имя-хоста/онтология\#идентификатор_ресурса} \rangle. \quad (4)$$

С учетом наличия онтологической МПЗ о бизнес-процессах информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО, а также метода унифицированного доступа к источникам данных с использованием запросов вида (3) может быть осуществлен переход от описания ПрО к спецификациям сценариев интеграции данных и порядка согласования аналитических вычислительных задач. Формируемая в результате спецификация, названная в работе **СВЗ-моделью**, позволяет без уточнения непосредственно моделей решения вычислительных задач задать функциональные требования к их входным и выходным параметрам, определить порядок их обработки, условия их применимости с использованием ETL-принципа. На рис. 4 представлены основные концепты и роли разработанной онтологической МПЗ о согласовании вычислительных задач. В тексте диссертационной работы представлены разработанные терминологические аксиомы онтологии и примеры СВЗ-моделей, уточняющие модели бизнес-процессов.

В рамках исследования также разработан **алгоритм структурно-параметрического синтеза моделей решения аналитических вычислительных задач**

по СВЗ-моделям, позволяющий осуществить переход от спецификаций согласования задач к гибридным структурно-функциональным продукционно-фреймовым G-моделям, выбранным в качестве конструктивного аппарата комплексного моделирования непосредственно решения аналитических вычислительных задач с использованием метода структурно-потокowo-многоуровневого распознавания образов (последовательно-параллельных процедур локального распознавания на основе совокупности вводимых вычислимых отношений как вычисляющих алгоритмов, т.е. процессов вычисления оценок). Инвариантный переход от специфицирования требований к заданию отношений вычислимости обеспечивает соответствие ВМ исходным требованиям, возможность на конструктивной основе осуществлять проверку разрешимости соответствующих вычислительных задач, синтезировать модели их программ (формальный вывод которых определен для G-моделей на основе контекстно-свободных р-грамматик) в виде G-сетей, позволяющих задавать асинхронные параллельные и потоковые вычисления, а также декомпозировать процесс разработки прикладного ПО СИАП ЖЦ СОТО, отделив моделирование решения аналитических вычислительных задач от специфицирования поведенческих и функциональных требований.

Алгоритмическая реализация отображения $sf_v \rightarrow m_v^G$ предполагает формирование G-модели m_v^G по соответствующей СВЗ-модели sf_v в результате синтеза параметров по спецификациям свободных переменных онтологических запросов, заданных в sf_v , и операторов по спецификациям запросов и предикатов с последующей конкатенацией формируемых элементарных G-моделей.

Концептуализация согласования аналитических вычислительных задач информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО					
Исходные положения					
Ориентация на моделирование решения задач интеграции данных и приложений					
Уточнение событий бизнес-процессов на основе фактов из ПрО, выраженных в виде онтологических запросов к источникам данных					
Уточнение входных и выходных параметров аналитических вычислительных задач					
Концепты и роли онтологии СВЗ					
Запрос (<i>Query</i>)		Конъюнкт запроса	Отношения		
Запрос выборки  <i>RQuery</i>	Запрос на запись  <i>WQuery</i>	Триплет связанных, свободных переменных и литералов  <i>Conjunct</i>	Следования  <i>Follow</i>	Предшествования  <i>Follow⁻</i>	По входу  <i>Input</i>
Переменные запроса		Предикат	Вычислительная задача	Отношения	
Свободная переменная  <i>FreeVar</i>	Условие применимости  <i>Predicate</i>	 <i>ComputeTask</i>	По выходу  <i>Output</i>	Указывает на определяемый эл-т <i>Defines</i>	Указывает на эл-т, которым определен <i>IsDefinedBy</i>

Рис. 4. Концепты и роли онтологии согласования вычислительных задач

Разработан алгоритм трансляции спецификаций онтологических запросов, задаваемых в СВЗ-моделях, на синтаксис онтологических SPARQL-запросов, что позволяет в рамках процедуры специфицирования ПрО в терминах, ориентированных на описание фактов и явлений ПрО, формировать программно-ориентированное синтаксическое представление команд языка запросов. Также в работе дополнены и обоснованы аспекты организации вычислений по G-моделям в ориентации на процессы автоматизированной информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО, связанные с исполнением онтологических запросов в рамках парадигмы управления по данным и потоковых вычислений.

На основе разработанного модельно-алгоритмического комплекса была сформирована мультиагентная архитектура СИАП ЖЦ СОТО (см. рис. 5).

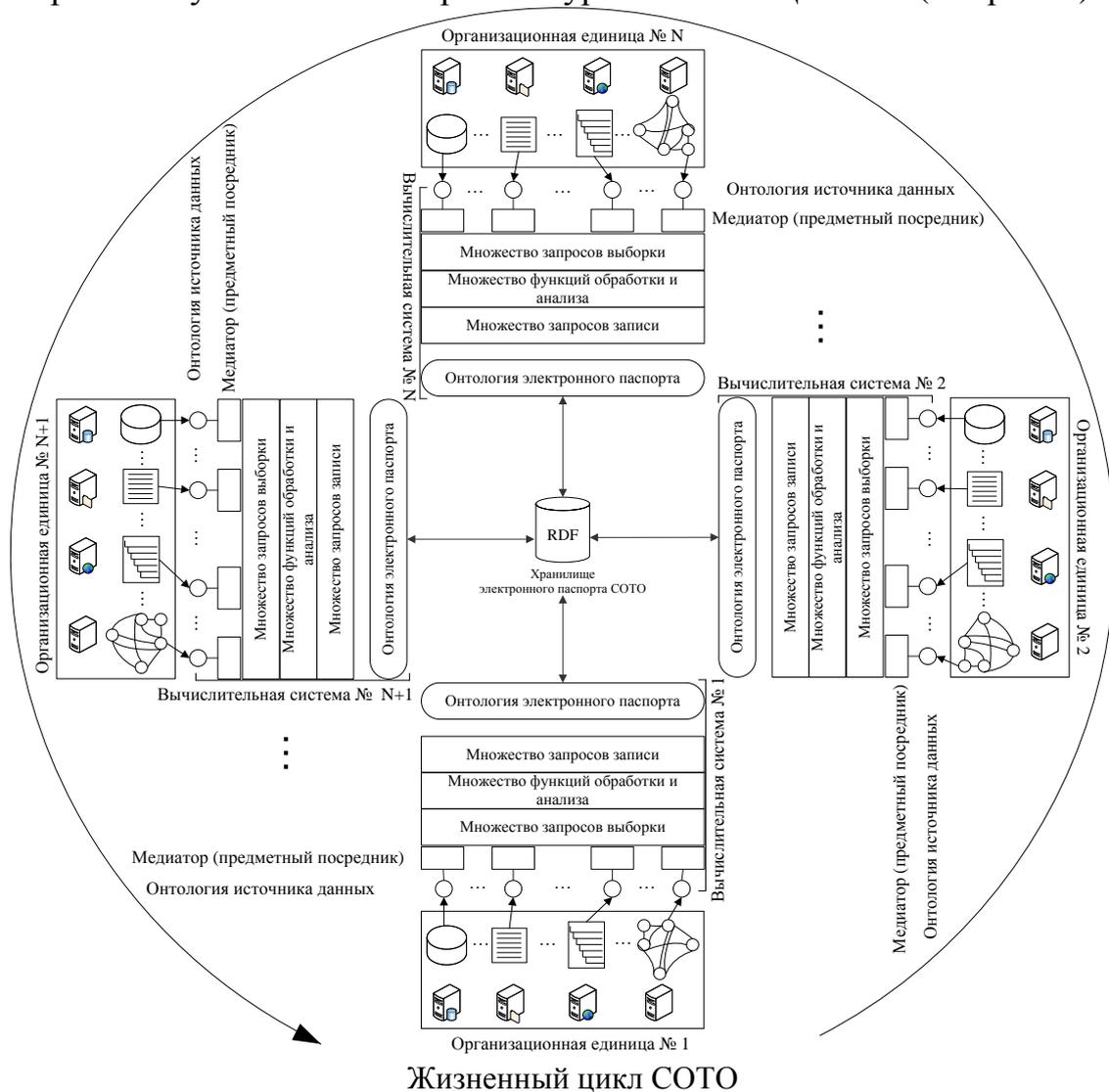


Рис. 5. Схема архитектуры предлагаемой системы информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО

В разделе 3 исследованы различные аспекты квалиметрии полученных в ходе исследования моделей, разработаны алгоритмы их верификации, разработана методика оценивания функциональной эффективности СИАП ЖЦ СОТО.

В рамках разработанной методики расчета частных показателей функциональной эффективности информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО предлагается выполнение следующих её шагов. Шаг 1: применение разработанного алгоритма проверки согласованности спецификаций требований, показатель которой может быть рассчитан по формуле:

$$C^{cs} = C^f \wedge C^{exp}, \quad (5)$$

где C^f – показатель выполнимости (полноты и непротиворечивости) системы фактов \mathcal{A} , в рамках которой определены спецификации бизнес-процессов и СВЗ, относительно множества терминологических аксиом \mathcal{T} , рассчитываемый посредством табло-алгоритма дескрипционных логик, $C^{exp} = \overline{C^{деф}} \wedge \overline{C^{неразл}} \wedge \overline{C^{экв}} \wedge$

$\overline{C^{изб}}$ \wedge $\overline{C^{неодн}}$ – показатель онтологической выразительности, рассчитываемый на основе частных показателей соответственно дефицита, неразличимости, эквивалентности, избыточности и неоднозначности спецификаций требований. В рассматриваемом контексте этот показатель имеет многофункциональную роль: он отражает, с одной стороны, выразительность моделей относительно правил используемых нотаций, а с другой – наличие взаимного соответствия по структуре и составу модели бизнес-процессов и СВЗ-моделей. **Шаг 2:** проверка корректности программ, показатель которой может быть рассчитан по формуле:

$$V_k^{ias} = w_1 * V^{непр} + w_1 * V^{копп} + w_1 * V^{акт} \quad (6)$$

на основе его частных показателей соответственно непротиворечивости, корректности и активности схем программ в виде G-сетей, качественные характеристики которых связаны с традиционными свойствами, присущими для разновидностей сетей Петри. Причем $0 \leq w_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^N w_i = 1$, где w_i – весовой коэффициент важности, получаемый в результате экспертного опроса. Порядок расчета частных показателей приведен в тексте диссертационной работы. **Шаг 3:** расчет показателя достоверности результатов функционирования СИАП по формуле:

$$Ver^{ias} = w_1 \frac{\sum_{i=1}^p Ver_i^{in}}{p} + w_2 \frac{\sum_{j=1}^p C_j^{in}}{\sum_{j=1}^p C_j^{full}} + w_3 \frac{\sum_{k=1}^p V_k^{ias}}{p} + w_4 C^{cs}, \quad (7)$$

где Ver_i^{in} – показатель достоверности каждого набора исходных данных для каждой программы СИАП, C^{in} – показатель объема исходных данных, представленных исходными фактами о ПрО, определяемыми в результате исполнения запросов выборки в виде кортежей $\langle c_1, c_2, c_3 \rangle$, где c_1, c_2, c_3 – полученные значения, C^{full} – показатель объема данных, подлежащих учету в СИАП, V^{ias} – корректность программ в количестве p единиц, C^{cs} – показатель согласованности спецификаций. Причем $0 \leq w_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^N w_i = 1$, где w_i – весовой коэффициент важности, получаемый в результате экспертного опроса. **Шаг 4:** расчет показателя оперативности информационно-аналитической поддержки по формуле:

$$Eff^{ias} = \frac{T^{max} - (T^{ias} + T^{in})}{T^{max} - T^{min}}, \quad (8)$$

где T^{max} , T^{min} – показатели максимально и минимального допустимого времени получения результатов информационно-аналитической поддержки соответственно, T^{in} – временной ресурс ввода исходных данных, T^{ias} – временной показатель функционирования СИАП, порядок расчета которого приведен в тексте диссертационной работы. **Шаг 5:** расчет показателя уровня информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО по формуле:

$$Q^{ias} = w_1 * Ver^{ias} + w_2 * Eff^{ias}, \quad (9)$$

где $0 \leq w_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^N w_i = 1$, w_i – весовой коэффициент важности показателя. **Шаг 6:** расчет показателя реализуемости ЕИП в рамках функционирования СИАП ЖЦ СОТО по формуле:

$$F^{ds} = w_1 * F^{пр} + w_2 * F^{инт} + w_3 * F^{неизм} + w_4 * F^{хрон}, \quad (10)$$

где $F^{пр}$ – показатель предметной ориентированности программ СИАП ЖЦ СОТО, $F^{инт}$ – показатель интегрированности информационных ресурсов и программ информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО, $F^{неизм}$ – показатель

неизменчивости хранилища электронного паспорта, $F^{хрон}$ – показатель поддержки хронологии изменения ТС СОТО в рамках хранилища электронного паспорта, $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^N w_i = 1, w_i$ – весовой коэффициент важности показателя. Алгоритмы расчета частных показателей приведены в тексте диссертационной работы. **Шаг 7:** расчет обобщенного показателя функциональной эффективности информационно-аналитической поддержки ЖЦ СОТО по формуле:

$$E^{ias} = w_1 * Q^{ias} + w_2 * F^{ds}, \tag{11}$$

где $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^N w_i = 1, w_i$ – весовой коэффициент важности показателя.

В разделе 4 рассматриваются аспекты практического применения разработанного модельного-алгоритмического комплекса СИАП ЖЦ КСр на примере РН «Союз-2». Проводится анализ изменения значений показателя функциональной эффективности её применения при решении задач информационно-аналитической поддержки для следующих этапов ЖЦ: формирование конфигурации изделия (проектирование), подготовка конструкторской и проектной документации, этап производства изделия, проведение итоговых испытаний и формирование заявления о соответствии изделия требованиям заказчиков. В качестве входных данных для СИАП была использована организационно-техническая и технологическая информация, в частности, представленная в виде электронных документов и их метаданных. В результате внедрения СИАП ЖЦ РН «Союз-2» при решении задачи формирования электронного паспорта изделия для указанных выше этапов ЖЦ были проведены экспериментальные расчеты по оцениванию функциональной эффективности информационно-аналитической поддержки ЖЦ РН «Союз-2», результаты которых представлены на рис. 6.

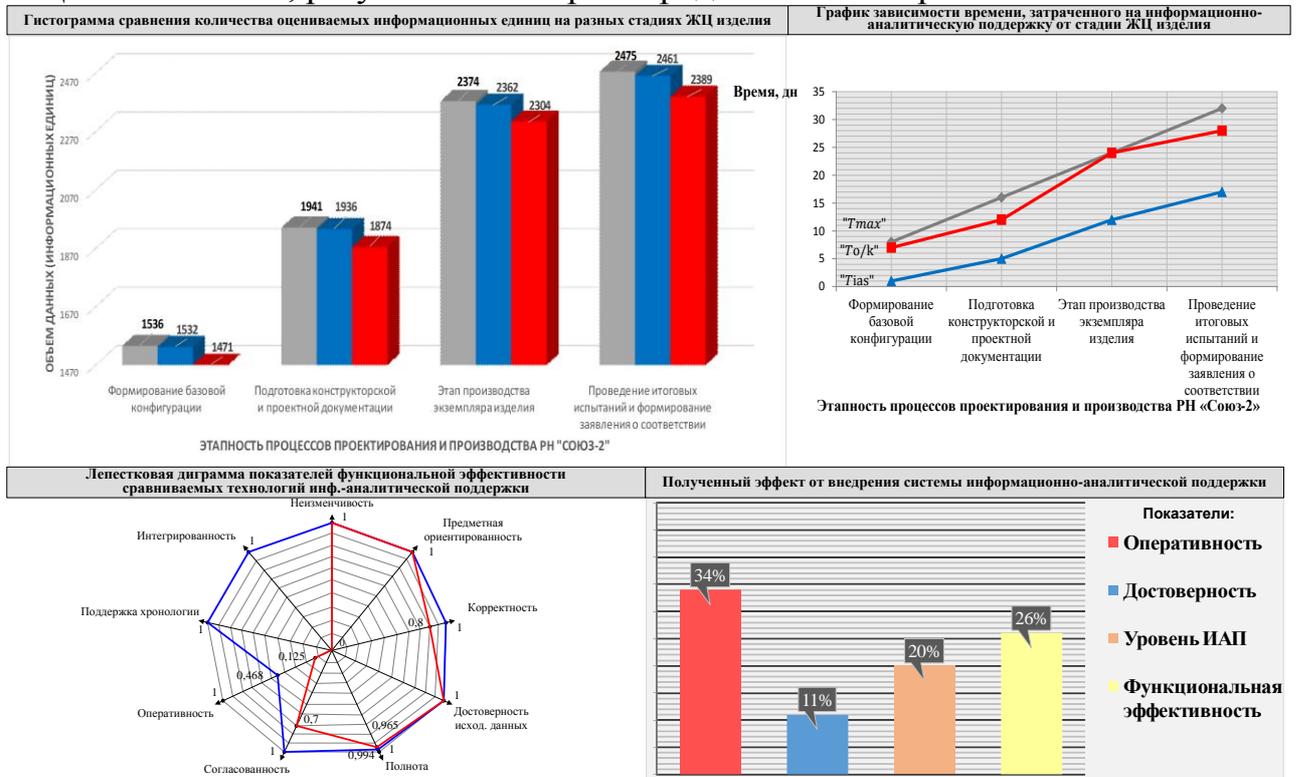


Рис. 6. Иллюстрация результатов оценивания функциональной эффективности применения СИАП ЖЦ КСр на примере РН «Союз-2»

В нижней части рисунка приведены итоговые расчетные значения обобщенных показателей функциональной эффективности информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр на основе разработанного программного комплекса.

В **заключении** сформулированы основные итоги, представленные теоретическими и практическими результатами и выводами, полученными в ходе диссертационного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная и важная научно-техническая задача разработки модельно-алгоритмического комплекса автоматизированной информационно-аналитической поддержки процессов создания и применения КСр. Полученные результаты имеют существенное значение для совершенствования системы информации о ТС и надежности КК и входящих в их состав изделий в ракетно-космической отрасли РФ. Были получены следующие результаты, составляющие **итоги** исследования:

- **разработана онтологическая система**, позволяющая на конструктивной основе специфицировать и совместно учитывать информационные, поведенческие и функциональные требования, предъявляемые к облику СИАП ЖЦ КСр;
- **разработана онтологическая МПЗ о бизнес-процессах информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр**, позволяющая формализовать разноаспектные знания аналитиков и экспертов ПрО об особенностях реализации этапов ЖЦ КСр;
- **разработана онтологическая МПЗ о СВЗ**, позволяющая уточнять спецификации бизнес-процессов в виде сценариев интеграции данных на основе семантических онтологических отображений и порядка их обработки и анализа с использованием принципов OLAP-систем, ETL и OBDA;
- **разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза ВМ** в виде G-моделей, обеспечивающий в автоматизированном режиме переход от специфицирования требований к конструктивизму задания отношений вычислимости и получению схем программ, управляющая и информационная структура которых позволяет организовать параллельные потоковые и асинхронные вычисления по ним;
- **разработан алгоритмический комплекс верификации** предложенных моделей и связанная с ним методика, позволяющие оценить согласованность онтологических моделей, реализуемость ЕИП, корректность программ СИАП, функциональную эффективность информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр.

Результаты диссертационного исследования позволяют получить следующий практический эффект при решении задачи автоматизации информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр:

- **повышение функциональной эффективности** информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр до **26%** и совместно с ним повышение оперативности информационно-аналитической поддержки до 34% и достоверности её результатов до 11%;

- **повышение уровня автоматизации проектирования уже на этапе постановки задачи** и конструктивная декомпозиция этапов разработки ПО с последовательным уточнением моделей без перехода на алгоритмический уровень;
- **повышение степени соответствия** разрабатываемого ПО исходным требованиям и постановке задачи, а также достоверности результатов его функционирования на основе формальных спецификаций;
- **потенциальное снижение стоимости, сроков разработки и сложности масштабирования и модифицирования ПО** информационно-аналитической поддержки ЖЦ КСр;
- **конструктивизация процессов извлечения и представления экспертных знаний** на основе использования графических нотаций, совместного представления бизнес-процессов, декомпозиции процесса проектирования, использования полимодельного и многоязычного принципов, комплекса средств верификации моделей.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Совершенствование и разработка новых методов комплексного моделирования экспертных знаний на основе комбинированных моделей с использованием онтологий и синтеза оптимальных программ при решении прикладных задач автоматизации управления ЖЦ СОТО в условиях неопределенности, а также существенной структурной динамики исследуемых объектов.

Соответствие паспорту специальности. Исследование выполнено по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации», и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: «7. Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем», «8. Теоретико-множественный и теоретико-информационный анализ сложных систем», «10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах», «13. Методы получения, анализа и обработки экспертной информации».

Список основных научных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Охтилев П. А. Интеллектуальный комплекс автоматизированного проектирования систем информационно-аналитической поддержки жизненного цикла сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 11. С. 963—971.
2. Охтилев П.А., Бахмут А.Д., Крылов А.В., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Подход к оцениванию структурных состояний сложных организационно-технических объектов на основе обобщенных вычислительных моделей // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 73–82.
3. Охтилев П.А., Автамонов П.Н., Бахмут А.Д., Крылов А.В., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Применение технологии поддержки принятия решений на различных этапах жизненного цикла космических средств в составе системы информации о техническом состоянии и надёжности // Вестник Самарского университета. Аэро-космическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 3. С. 173-184.

4. *Охтилев. П.А., Бахмут А.Д., Крылов А.В.* Полимодельное описание интеллектуальной системы мониторинга технического состояния ракеты-носителя «Союз-2» // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Вып. 664. – СПб: ФГБВОУ ВО ВКА им. А.Ф. Можайского МО РФ, 2018. С. 10-19.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах научного цитирования Scopus и Web of Science:

1. *Paschhenko A., Okhtilev P., Potrysaev S., Ipatov Y., Sokolov B.* Methodology and Structure Adaptation Algorithm for Complex Technical Objects Reconfiguration Models // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol.574. Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference, 2017. Vol 2. P.319-328.

2. *Pavel A. Okhtilev, Aleksey D. Bakhmut, Aleksey V. Krylov, Michael Yu. Okhtilev, Boris V. Sokolov.* Application of decision-making support technology for management of space vehicle life cycle // 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS). IEEE Publ, 2017, P.41-44.

3. *Aleksey D. Bakhmut, Alexander A. Kljucharjov, Aleksey V. Krylov, Michael Yu. Okhtilev, Pavel A. Okhtilev, Anton V. Ustinov, and Alexander E. Zyanchurin.* Models, Algorithms and Monitoring System of the Technical Condition of the Launch Vehicle “ Soyuz-2 ” at All Stages of Its Life Cycle // Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019 R. Silhavy (Ed.): CSOC 2018, AISC 764, 2019. pp. 288–297.

4. *Aleksey D. Bakhmut, Aleksey V. Krylov, Margaret A. Krylova, Michael Yu. Okhtilev, Pavel A. Okhtilev, and Boris V. Sokolov.* Proactive Management of Complex Objects Using Precedent Methodology // Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019 R. Silhavy (Ed.): CSOC 2018, AISC 764, 2019. pp. 298–307.

5. *Aleksey D. Bakhmut, Vladislav N. Koromyslichenko, Aleksey V. Krylov, etc.* (2019) Methods of Conceptual Modeling of Intelligent Decision Support Systems for Managing Complex Objects at All Stages of Its Life Cycle / Aleksey D. Bakhmut, Vladislav N. Koromyslichenko, Aleksey V. Krylov, Michael Yu. Okhtilev, Pavel A. Okhtilev, Boris V. Sokolov, Anton V. Ustinov, and Alexander E. Zyanchurin // In: Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Sukhanov A. (eds) Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI'18). ITI'18 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 875. Springer, Cham pp. 171-180.

Также опубликовано 20 печатных работ в трудах международных, всероссийских и ведомственных конференций. Зарегистрировано 4 программы для ЭВМ. Ссылки приведены в тексте диссертационной работы.

Подписано в печать " ____ " _____ 2019 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 2,0. Тираж 100 экз.

Заказ №