

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»**

Дерябин Сергей Андреевич

Модели и методы оценки и анализа архитектур для построения автономно функционирующих
горнопромышленных систем

2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных
систем управления федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС» Темкин Игорь Олегович

Москва – 2026

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В последние годы в мире решается нетривиальная задача проведения Цифровой Трансформации (ЦТ) промышленных предприятий в парадигме концепции «Индустрия 4.0». Как правило, под цифровой трансформацией подразумевается переход к качественно иному способу организации и управления технологическими процессами с целью повышения их интегральной эффективности посредством комплексного применения современных информационных технологий, включая роботизацию оборудования, Индустриальный Интернет Вещей, интеллектуальный анализ данных, Цифровые Двойники и др. При этом в научной и практических сферах в настоящий момент не существует консенсуса по вопросу формализации данного процесса, в частности: выбора инвариантных критериев, разработки методов оценки и анализа результатов подобной деятельности, а также формирования требований к конечным виду и форме структурно-функциональной организации производств. Тем не менее, при аналитическом обобщении известных стандартов и фреймворков в данной области, таких как, например, TOGAF 10 и RAMI4.0, можно сделать вывод, что разработчики этих стандартов видят суть ЦТ в реорганизации архитектур предприятий для построения автономно функционирующих индустриальных систем. В контексте настоящего исследования под автономно функционирующими индустриальными системами понимаются системы, реализующие все технологические процессы без участия человека и обладающие способностями к самоорганизации и саморегуляции. Таким образом суть решения задачи ЦТ может быть сведена к процессу замещения в архитектуре предприятия персонала на программные системы, интегрированные в единую кибер-физическую производственную среду с четко формализованной моделью структурно-функциональной организации деятельности на базе онтологического представления априорных знаний.

Цифровая трансформация горнопромышленных предприятий, на фоне других индустриальных сфер, представляется одной из наиболее сложных задач, что связано, с особенностями горного производства: пространственной распределённостью и нестационарностью геотехнической производственной среды; наличием множества разнотипных специализированных автоматизированных систем с низкой степенью интеграции; отсутствием подходов к унифицированному модельному представлению гетерогенных компонент архитектуры предприятия. Учитывая подобные специфические условия, определено, что существующие подходы цифровой трансформации являются малопригодными для горнопромышленных предприятий, характеризующихся в настоящем исследовании как сложные крупномасштабные пространственно-распределенные геотехнические системы с открытым типом производственных сред. В ещё большей степени задача эффективной трансформации

систем подобного типа осложнена отмеченным ранее отсутствием формальных критериев и методов количественной оценки состояний архитектур, инвариантных различным этапам ЦТ. Существующие подходы имеют преимущественно экспертно-аналитический характер и не обеспечивают строгой формализации, воспроизводимости и количественного сопоставления различных вариантов архитектурных решений. Таким образом, разработка формальных моделей представления, количественных критериев оценки качества, алгоритмов конфигурирования и анализа архитектур автономно функционирующих кибер-физических пространственно-распределенных геотехнических промышленных систем является актуальной научно-исследовательской и научно-практической задачей.

Степень разработанности темы исследования. Фундаментальные теоретические основы в области автоматизации производств заложены в работах Я.З. Цыпкина, А.А. Красовского, Л.С. Понтрягина и В.М. Глушкова, а современные проблемы создания автономно функционирующих кибер-физических промышленных систем рассматривались L. Monostori, J. Lee, P. Leitão. Применительно к горнодобывающей отрасли большой вклад внес Н. Durrant-Whyte, реализовавший концепцию автономных горнотранспортных систем, а также отечественные учёные: Л.А. Пучков, Н.И. Федунец, Д.К. Потресов, внесшие вклад в развитие теории построения АСУ в горной отрасли, и И.О. Темкин, формализовавший и систематизировавший методологические аспекты применения элементов теории Искусственного Интеллекта для комплексного решения широкого спектра задач управления горнодобывающими производствами.

Понятие архитектуры предприятия как системного описания структуры впервые формализовано J.A. Zachman, что получило дальнейшее развитие в методологии стандарта TOGAF одноименного международного консорциума и стандарте RAMI 4.0 для промышленных систем Индустрии 4.0 консорциума Plattform Industrie 4.0. Среди отечественных исследователей вопросы архитектурного проектирования предприятий в контексте цифровой трансформации рассматривались в работах Г.Б. Клейнера, А.А. Ковалёва, С.Д. Бодрунова. Теоретические основы архитектур программного обеспечения заложены в работах D. Parnas, систематизированы M. Shaw, D. Garlan, L. Bass, P. Clements, R. Kazman и развиты в работах S. Newman, M. Fowler и R. Richards. Однако сегодня сохраняется разрыв между понятиями архитектуры предприятия и архитектуры программного обеспечения, а все предложенные модели ориентированы преимущественно на визуально-аналитическое описание и не предоставляют формального аппарата для количественного сопоставления архитектурных решений.

Фундаментальные основы современной инженерии онтологий, как способа формального представления знаний о системах, разработаны Т. Gruber, N. Guarino и Т. Т. Berners-Lee. В отечественной научной школе вопросы инженерии знаний и онтологического моделирования

разрабатывались А.С. Клещёвым, Т.А. Гавриловой, В.Ф. Хорошевским, Д.А. Пospelовым. Теоретические основы дескрипционной логики систематизированы F. Baader, D. Calvanese, D. McGuinness, D. Nardi и P. Patel-Schneider. Существенный вклад в развитие языка дескрипционной логики OWL внесли I. Horrocks, B. Motik, U. Sattler. Применение онтологического моделирования, в том числе на языке OWL, для описания отдельных технологических процессов и объектов горнопромышленных систем известно по работам B. Zhang, R.M. Stanković, L. Kolonja, Л. Власенко и др. Примеры комплексного применения онтологий и дескрипционной логики для создания моделей архитектур горнопромышленных систем в настоящий момент в научной литературе не представлены.

Широко известны методы экспертно-аналитической оценки качества архитектур программных систем (Architecture Tradeoff Analysis Method), разработанные R. Kazman и развитые M. Klein, P. Clements, С.В. Зыковым; а также количественные метрики качества программного кода, включая: цикломатическую сложность Маккейба (T.J. McCabe), метрики Халстеда (M.H. Halstead) и объектно-ориентированные метрики Чидамбера и Кемерера (S.R. Chidamber, C.F. Kemerer). Однако несмотря на разработанность и относительную развитость данных методов, их применение для количественной оценки архитектур сложных промышленных систем практически невозможно.

В области теоретико-информационного анализа можно отметить работы N. Rashevsky, A. Mowshowitz и M. Dehmer, предложивших использовать энтропийные критерии оценки для анализа графовых структур сложных систем; а также работы H. Bunke и K. Riesen, определяющих концепцию расстояния редактирования графов как меры различия двух структур. Совмещение энтропийной оценки сложности графа с оценкой стоимости операций редактирования создаёт теоретическую основу для формирования комплексного критерия управления жизненным циклом цифровой трансформации архитектуры, однако перенос данных подходов с уровня абстрактных графовых структур на уровень архитектуры промышленной системы, включая горнопромышленные предприятия, остается нерешенной задачей, что подтверждается отсутствием соответствующих публикаций.

Целью настоящего исследования является обеспечение процессов цифровой трансформации горнопромышленных предприятий посредством разработки формальных критериев, моделей и алгоритмов оценки и анализа архитектур на всех этапах построения автономно функционирующих кибер-физических пространственно-распределенных геотехнических промышленных систем.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Сформулировать критерии и формализовать задачи управления цифрой трансформацией архитектур сложных крупномасштабных пространственно-

распределенных геотехнических предприятий для их приведения к виду автономно функционирующих кибер-физических промышленных систем.

2. Разработать модели представления знаний о структурно-функциональной организации пространственно-распределенных геотехнических промышленных систем, обеспечивающих необходимую вычислительную инструментальную основу самоорганизации и саморегуляции на базе современных средств онтологического моделирования.
3. Разработать унифицированные критерии количественной оценки и механизмы анализа архитектур инвариантно их состояниям на отдельных этапах жизненного цикла цифровой трансформации.
4. Разработать формальные правила и алгоритмические процедуры модификации структурно-функциональной организации архитектур, обеспечивающих возможности определения оптимальных планов конфигурационных изменений в целях построения автономно функционирующих кибер-физических промышленных систем.
5. Осуществить моделирование для апробации и верификации разработанных критериев, моделей и алгоритмов на примере реальных технологических процессов и архитектур горнопромышленных предприятий по открытой добыче полезных ископаемых.

Основная идея работы заключается в комплексном применении современных средств логико-семантического моделирования на базе дескрипционной логики с использованием языка OWL и методов алгебры множеств в сочетании с теоретико-графовым подходом к оценке информационной сложности архитектур горнопромышленных предприятий для формализации и разработки критериев, моделей и алгоритмов, обеспечивающих возможность решения задач цифровой трансформации для построения автономно функционирующих кибер-физических систем.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. В комплексном применении современных средств онтологического моделирования и дескрипционной логики, а также механизмов логико-семантического вывода в виде строгого комбинаторного перебора допустимых предикативных высказываний, обеспечивающих непротиворечивость, полноту и точность вывода априорных экспертных знаний для формирования метамодели архитектуры промышленной системы.
2. В формализации представления компонент промышленной системы, которая позволяет описать взаимосвязь атомарных функциональных задач управления, агентов управления и физических узлов размещения и согласовать понятия архитектуры предприятия с архитектурами программных систем.

3. В предложении универсального энтропийного критерия оценки сложности логической конфигурации архитектуры промышленной системы, обеспечивающего возможность количественного сопоставления состояний системы, независимо от этапов жизненного цикла.
4. В разработке набора формальных операций модификации логической конфигурации архитектуры с эвристической метрикой стоимости структурных изменений графа в виде петель модификации и правила допустимости таких операций, позволяющих осуществлять количественное сопоставление вариантов архитектуры для выбора оптимального на каждом следующем этапе трансформации.
5. В разработке и экспериментальном подтверждении инструментальной основы решения задач по управлению жизненным циклом цифровой трансформации горнопромышленных предприятий и созданию автономно функционирующих киберфизических пространственно-распределенных геотехнических промышленных систем.

Основные **научные положения**, выносимые на защиту:

1. Алгоритм формирования метамодели архитектуры на базе онтологического моделирования и комбинаторных механизмов логико-семантического вывода априорных знаний, обеспечивающий точность, полноту и непротиворечивость результатов формального построения структурно-функциональной конфигурации пространственно-распределенной геотехнической промышленной системы.
2. Теоретико-множественная модель представления архитектуры, включающая графоаналитическое описание компонент и критерии оценки их структурной сложности на базе информационных индексов, реализующих унифицированный подход к анализу логической конфигурации сложных крупномасштабных пространственно-распределенных геотехнических промышленных систем для приведения их к автономно функционирующему виду.
3. Метод конфигурирования и модификации архитектуры с использованием механизмов количественной оценки структурных преобразований графа на основе петель модификации, обеспечивающий количественное сопоставление состояний промышленной системы инвариантно этапам жизненного цикла и возможность планирования оптимальных стратегий её цифровой трансформации.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии основ системного анализа архитектур сложных крупномасштабных пространственно-распределенных геотехнических промышленных систем в части: формализации понятия архитектуры как графовой структуры; установления фундаментального компромисса между минимизацией структурной сложности

архитектуры и минимизацией сложности её модификации; формализации связи между онтологическим моделированием знаний о системе и количественной оценкой качества её архитектуры.

Практическая ценность результатов определяется тем, что разработан набор программных инструментов, которые:

- реализуют алгоритмические процедуры формализации знаний о структурно-функциональной организации систем в ходе составления модели и планировании цифровой трансформации;
- позволяют количественно оценивать и сопоставлять варианты архитектурных решений в целях выбора оптимальных стратегий в соответствии с конкретными этапами жизненного цикла систем;
- обеспечивают возможность выявлять критические элементы архитектуры в целях глубинного анализа качества функционирования пространственно-распределенных геотехнических промышленных систем;
- предоставляют информацию для обоснования выбора путей модификации архитектуры на основе баланса структурной сложности и стоимости процедур модификации.

Результаты работы востребованы, в первую очередь, крупными ИТ-компаниями, участвующими в цифровой трансформации горнопромышленных и других пространственно-распределенных геотехнических промышленных систем, а также непосредственно горнодобывающими предприятиями.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается: корректным применением теории и методов системного анализа, графовых моделей, а также теоретико-информационных подходов к оценке сложности систем для математической формализации представления архитектур горнопромышленных систем. Верификацией консистентности и когерентности разработанной онтологической модели инструментальными средствами среды Protégé для доказательства истинности и непротиворечивости заложенных аксиом с использованием специализированных механизмов – «рассуждателей» (HermiT) с доказанной вычислительной разрешимостью. Соответствием результатов моделирования работы механизмов логико-семантического вывода с теоретическими оценками предела комбинаторного перебора. Экспериментальным моделированием работы алгоритмов конфигурирования и анализа архитектуры и получением воспроизводимых количественных результатов.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих международных и отечественных научных конференциях:

- XXXIV Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2026». г. Москва, НИТУ МИСИС, 2-6 февраля 2026 г.
- XXX Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2022». г. Москва, НИТУ МИСИС, 1-4 февраля 2022 г.
- The 24-th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems «KES 2020». онлайн, 16–18 сентября 2020 г.
- XXVIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2020». г. Москва, НИТУ МИСИС, 27 января – 31 января 2020 г.
- The 5-th International Conference on Fuzzy Systems and Data Mining «FSDM 2019». г. Китаюси, Япония, 18-21 октября 2019 г.
- The 23-rd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems «KES 2019». г. Будапешт, Венгрия, 4-6 сентября 2019 г.
- The 2019 International Conference on Cooperation and Integration of Industry, Education, Research and Application. г. Харбин, КНР, 14-16 июня 2019 г.
- 1-ая Международная научно-практическая конференция «Шаг в будущее: Искусственный Интеллект и Цифровая Экономика». г. Москва, ГУУ, 4-5 декабря 2017 г.

Научные положения и ряд основных научно-практических результатов, полученные автором, использованы при выполнении в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» следующих грантовых проектов и хозяйственно-договорных работ:

1. Грант РФФИ №23-11-00197 «Гибридные подходы для анализа деятельности и визуализации функционирования сложных многомерных систем», 2023-2025 гг., исполнитель.
2. Грант РФФИ № 17-11-01353 «Разработка моделей и методов для анализа деятельности и визуализации поведения сложных многомерных объектов», 2021-2022 гг., исполнитель.
3. Грант РФФИ №19-17-00184 «Разработка методов построения и моделей функционирования цифровой платформы управления транспортно-технологическими процессами при добыче минерального сырья», 2019-2021 гг., основной исполнитель.
4. Грант РФФИ №16-07-01197 «Разработка и исследование вычислительных моделей для построения механизма управления роботизированными объектами горно-транспортного комплекса», 2016-2018 гг., исполнитель.

5. Договор оказания услуг с АО «МХК «ЕвроХим» от 10.01.2022 г. №8000433216 «на проведение работ по изучению конъюнктуры рынка программно-технических комплексов для построения систем позиционирования, оповещения и поиска, а также других смежных систем в условиях подземных рудников», основной исполнитель.
6. Договор оказания услуг с АО «Электронная Москва» от 01.09.2020 г №32009357453 «по апробации технологии цифрового дублирования операционной деятельности работников на объектах Комплекса градостроительной политики и строительства г. Москвы», основной исполнитель.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты диссертационного исследования внедрены и используются в деятельности ряда отечественных IT-компаний, специализирующихся на разработке и интеграции программных продуктов для автоматизации технологических процессов в различных секторах производства:

1. Общество с ограниченной ответственностью «ПРАЙМ ГРУП».
2. Общество с ограниченной ответственностью «Экспасофт».
3. Общество с ограниченной ответственностью «Брайт Софт».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 8 в периодических научных изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, 2 из которых включены в «белые списки журналов» РЦНИ, 1 в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 в сборниках трудов отечественных научных конференций. По результатам работ в составе коллектива авторов получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 191 странице машинописного текста, содержит 60 рисунков, 25 таблиц. Список использованных источников включает 142 наименования. Работа содержит 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, теоретическая и практическая значимость работы, определены цель, и задачи исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён комплексный анализ современных архитектурных проблем горнопромышленных систем в условиях их цифровой трансформации. По результатам

установлены основные ограничения существующих подходов к оценке и анализу архитектур и обоснована необходимость разработки нового методологического инструментария.

В разделе 1.1 Дана характеристика современных горнодобывающих предприятий:

1. Пространственная распределенность геотехнологической среды с непрерывно изменяющимися границами и состояниями типовых инфраструктурных объектов.
2. Высокая механизация труда и применение широкого спектра мобильного и стационарного технологического оборудования.
3. Применение большого числа разнотипных специализированных программных систем для автоматизации ряда технологических процессов и операций.

Рассмотрена история автоматизации горнодобывающих предприятий и определено, что ключевой проблемой цифровой трансформации является необходимость формирования единой модели архитектуры, декларирующей и объясняющей взаимосвязь разнотипных элементов: бизнес-процессов, физических объектов технологической среды, информацию и управляющих компонент.

В разделе 1.2 проведён анализ существующих моделей представления и задач управления архитектурами систем. Даны определения понятиям архитектуры предприятия, модели архитектуры предприятия, цифровой трансформации и автономно функционирующему предприятию. Проведено аналитическое сравнение задач жизненного цикла архитектур предприятий и программных систем, показавшее их принципиальную общность при различии в уровнях абстракции, что подчеркивает актуальность и обоснованность поиска единого подхода к оценке и сопоставлению.

В разделе 1.3 проведён обзор существующих методов оценки и анализа архитектур. В части методов оценки архитектур предприятий установлено, что доминирующим подходом является экспертный анализ на основе сопоставления моделей «as is» и «to be» с использованием каталогов, матриц и диаграмм. Показано, что такой подход влечёт риски неполноты, противоречивости и неоднозначности семантических конструкций, а критерий соответствия моделей не является строго формализованным. Обоснована возможность применения онтологического моделирования на языке OWL с использованием механизмов дескрипционной логики и «рассуждателей» (англ. – reasoner) для формальной верификации полноты, непротиворечивости и точности моделей архитектуры предприятия.

Рассмотрены теоретико информационные подходы к анализу сложных систем с позиций их применимости для формирования методов оценки качества архитектур сложных крупномасштабных индустриальных систем для:

- представления архитектуры в виде графа с динамической структурой, модифицируемой в рамках цифровой трансформации с учётом требований, условий и ограничений функционирования конкретного предприятия;
- оценки сложности как исходной структуры такого графа, так и вариантов его модификаций, а также сложности самих процессов модификации и поддержки, т.е. сложности жизненного цикла.

Отмечено, что совмещение энтропийной оценки сложности конфигурации с оценкой стоимости операций редактирования создаёт основу для формирования комплексного критерия управления жизненным циклом архитектуры, однако перенос данных подходов с уровня кода на уровень архитектуры системы в существующей литературе не осуществлён.

На основании проведённого анализа в разделе 1.4 сформулирована постановка задачи исследования. Определён разрыв между потребностью в формальной количественной оценке качества архитектуры на всех этапах жизненного цикла и отсутствием соответствующего инструментария. Введены понятия агента управления и атомарной функциональной задачи как базовых компонентов модели архитектуры. Конкретизированы требования к качеству архитектуры в терминах стандарта ISO/IEC 25010 – функциональная пригодность, модульность, модифицируемость, масштабируемость и расширяемость. Сформулирован экспертный критерий оптимизации: обеспечение полноты функционального покрытия при размещении агентов управления на физических узлах за минимальную стоимость жизненного цикла архитектуры.

Во второй главе разработаны формальные модели представления и критерии оценки процессов конфигурирования архитектур для построения автономно функционирующих кибер-физических пространственно-распределённых геотехнических промышленных систем в условиях управления их цифровой трансформации.

В разделе 2.1 сформулированы формальные определения и введены ключевые понятия архитектуры предприятия как совокупности четырёх взаимосвязанных групп компонентов: технологических процессов и операций C^1 , физических объектов C^2 , агентов управления C^3 и информации C^4 :

$$A = \langle C^1, C^2, C^3, C^4 \rangle, \quad (1)$$

Задача управления архитектурой $F(A)$ определена как выбор такой её конфигурации, при которой оптимизируется интегральный показатель эффективности предприятия $\Pi_\Sigma(A')$, а цифровая трансформация представлена как непрерывный процесс недетерминированных во времени замен агентов управления на более эффективные программные компоненты $C_i'^{3,j=0}$:

$$\begin{aligned}
\Pi_{\Sigma}(A') &= \sum_{i=1}^I j_i \rightarrow \min \\
F(A): \{C_i^{3,j}\} &\rightarrow \{C_i'^{3,j=0}\} \\
Eff_{C_i'^{3,j}} &= \frac{Acc_{C_i'^{3,j=0}}}{Rsr_{C_i'^{3,j=0}}} \geq Eff_{C_i^{3,j}} = \frac{Rsr_{C_i^{3,j=0}=\sum_{i=1}^I Acc_{C_{i,k}^{3,j}}}}{Perf_{C_i^{3,j=0}=\sum_{i=1}^I Perf_{C_{i,k}^{3,j}}}} \\
i &= \overline{1, I}, j \in \{0; 1\}
\end{aligned} \tag{2}$$

Обоснована необходимость представления компонентов архитектуры в виде каталогов атомарных функциональных задач управления Φ , агентов управления $C_i^{3,j}$, их экземпляров $C_{i,k}^{3,j}$, физических узлов размещения Y и их экземпляров U , а отношения между ними в виде «множественных отображений» – « $\rightarrow$ », формирующих шесть двудольных графов описательной метамодели структурно-функциональной конфигурации архитектуры Θ . Определено, что набор графов $\Theta = \langle g_1, \dots, g_6 \rangle$ определяет условия конфигурации всей архитектуры индустриальной системы A , которая может быть также представлена в виде некоторого графа $G(A)$ и процедуры конфигурации F_{cnfg} . Сформулированы три критерия оценки качества архитектуры, отражающие подход экспертно-аналитической оптимизации архитектуры.

В разделе 2.2 предложена концептуальная схема структуры управления автономно функционирующей кибер-физической индустриальной системы (Рисунок 1).

Формализована задача онтологического моделирования архитектуры индустриальной системы как способа представления гетерогенных компонентов в виде абстрактных понятий, связанных формальными логическими правилами. Определены четыре ключевые требования к получаемому перечню атомарных функциональных задач управления: достаточная степень атомизации без избыточной декомпозиции, полнота охвата производственной деятельности предприятия, точность определения взаимосвязи компонентов архитектуры и непротиворечивость описания задач. На основании данных требований предложено использование онтологической модели как инвариантного инструмента построения метамodelей архитектуры на отдельных этапах её жизненного цикла.

Введены уравнения, определяющие непрерывный процесс цифровой трансформации как последовательность дискретных шагов модификации архитектуры $\xrightarrow{DT}$ от состояния «as is» A^0 к состоянию «to be» A^* :

$$F: A^0 \xrightarrow{DT} A^1 \xrightarrow{DT} \dots \xrightarrow{DT} A^*, \tag{3}$$

с обязательной проверкой сохранения функциональной пригодности системы на каждом шаге t :

$$\begin{cases} \Theta^{t-1} \Leftrightarrow \Theta^t \Leftrightarrow \Theta^{t+1} \\ (\Phi^t \rightarrow \Upsilon^t) \in \Theta^t \\ \Phi^{t-1} \Leftrightarrow \Phi^t \Leftrightarrow \Phi^{t+1}, \forall t \geq 1 \\ \Upsilon^{t-1} \Leftrightarrow \Upsilon^t \Leftrightarrow \Upsilon^{t+1} \end{cases} \quad (4)$$

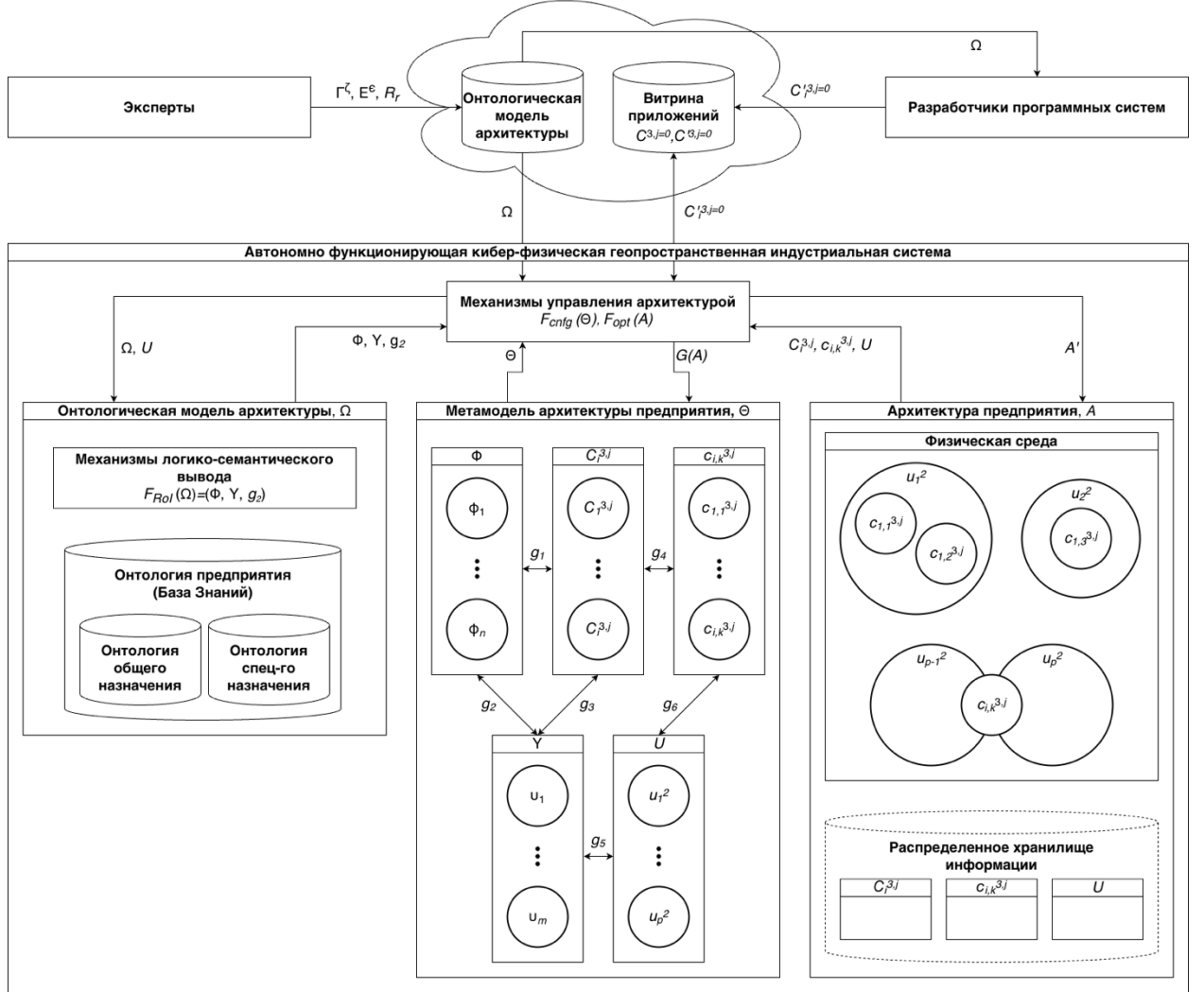


Рисунок 1. Концептуальная схема структуры управления автономно функционирующей кибер-физической промышленной системы

Установлено, что достижимость (выводимость соответствия $\Phi^t \rightarrow \Upsilon^t$) механизма логико-семантического вывода каталогов компонентов архитектуры и их графов связи из онтологии обеспечивается только при условии консистентности и когерентности онтологической модели, понимаемых как истинность и непротиворечивость всех заложенных аксиоматических высказываний:

$$F_{Rol}(\Omega) = g_2(\Phi^t, \Upsilon^t), \quad (5)$$

где F_{ROI} – правила механизма логико-семантического вывода каталогов атомарных функциональных задач управления, типовых физических узлов размещения и их графа связи из онтологической модели архитектуры Ω .

В разделе 2.3 разработана двухкомпонентная онтологическая модель архитектуры горнопромышленной системы на языке OWL в соответствии с принципами дескриптивной логики, включающая в себя:

1. Онтологию общего назначения, предопределяющей набор базовых инвариантных концептов кибер-физической пространственно-распределенной геотехнической индустриальной системы с открытым типом производственной среды в виде иерархии классов и отношений между ними.
2. Онтологию специального назначения, предопределяющую структуру унифицированной горнопромышленной системы на примере предприятия по открытой добыче полезных ископаемых в виде конечного набора индивидов иерархии классов.

Приведен общий алфавит онтологии общего назначения на базе языка дескрипционной логики OWL:

$$R_0(\Gamma^{\zeta}, \Gamma^{\zeta\zeta}) \in \Omega, \quad (6)$$

где Γ^{ζ} – абстрактное понятие (концепт), являющийся суперклассом (родительским концептом) для понятия $\Gamma^{\zeta\zeta}$, а R_0 – предикат иерархии классов типа «SubclassOf».

$$R_r(\forall \Gamma^{\zeta}, \exists \Gamma^{\zeta\zeta}) \in \Omega, \quad (7)$$

где R_r – множество ролевых отношений между концептами Γ^{ζ} , квантификатор «всеобщности» $\forall$ – обозначает указание распространения роли на все субконцепты и индивиды, а квантификатор «существования» $\exists$ – распространение на некоторые (не все, какие-либо) субконцепты и индивиды. При этом запись $R_r(\forall \Gamma^{\zeta}, \exists \Gamma^{\zeta\zeta})$ означает, что для любого элемента $x^{\zeta} \in \Gamma^{\zeta}$ существует такой $x^{\zeta\zeta} \in \Gamma^{\zeta\zeta}$, что между ними выполнено отношение $R_r(x^{\zeta}, x^{\zeta\zeta})$.

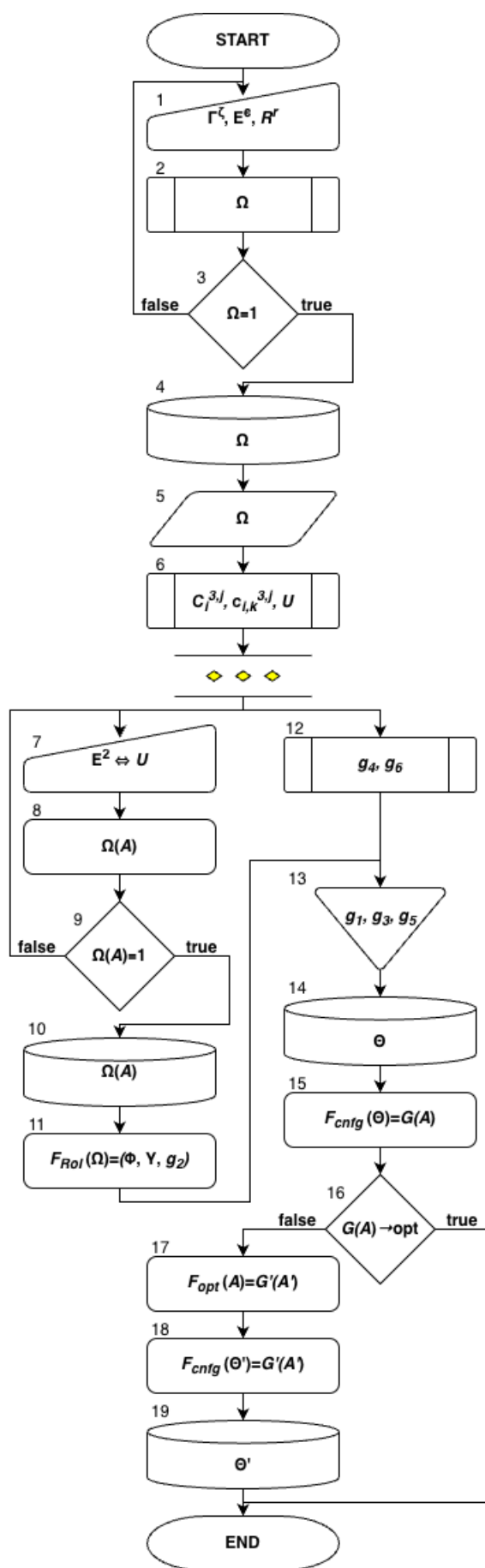


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма формирования метамодели архитектуры автономно функционирующей кибер-физической пространственно-распределенной геотехнической индустриальной системы

В соответствии с алгеброй-алфавитом сформирована иерархия из сорока концептов по четырём основным ветвям – «Технологический процесс» Γ^1 , «Физический объект» Γ^2 , «Агент управления» Γ^3 и «Информация» Γ^4 – с глубиной детализации до пяти уровней вложенности в ветви «Физический объект». Введены пятьдесят два ролевых отношения, задающих семантические связи между концептами. На основе введённых концептов и ролей получены аксиоматические формулы, формирующие дескриптивно-логическую базу онтологии общего назначения и обеспечивающие возможность вывода явных определений для отдельных компонентов архитектуры. Введено шестьдесят три индивида (экземпляра конечных классов иерархии) с явно определёнными ролевыми отношениями. Для каждого индивида аксиоматически определены наборы ролевых отношений с другими индивидами, что позволяет задать формальную структурно-функциональную конструкцию архитектуры с возможностью логических исчислений для проверки истинности и непротиворечивости.

В разделе 2.4 разработаны алгоритмические механизмы формирования метамодели архитектуры на основе онтологической модели $F_{Rol}(\Omega) = (\Phi, Y, g_2)$. Обоснованы ограничения применения стандартных средств логического вывода на языке OWL и запросов SPARQL для построения каталогов атомарных функциональных задач управления, связанные с невозможностью декларирования составных семантических триплетов и принципиальной неполнотой онтологической модели по известным теоремам (Теорема о неполноте, Open-World Assumption).

Введена строгая формальная логико-семантическая конструкция атомарной функциональной задачи управления как сложного предикативного выражения с вложенностью φ_n . Сформулированы механизмы логико-семантического вывода каталога атомарных функциональных задач управления Φ и каталога физических узлов Y с учетом формальных эвристических правил. При этом сам механизм $F_{Rol}(\Omega) = (\Phi, Y, g_2)$ представляется как комбинаторный перебор всех допустимых сочетаний индивидов онтологии, обеспечивающий получение проиндексированного каталога со строгой уникальной конфигурацией каждой задачи.

Разработан алгоритм формирования метамодели архитектуры автономно функционирующей кибер-физической пространственно-распределенной геотехнической промышленной системы, представленный в виде блок-схемы (Рисунок 2).

В третьей главе разработаны математические модели представления и оценки логической конфигурации архитектуры, формальные операции и правила её модификации, критерии и механизмы решения задач цифровой трансформации, а также алгоритмы конфигурации и анализа архитектур в состояниях «as is» и «to be», обеспечивающие возможность количественного сопоставления различных вариантов архитектурных решений.

В разделе 3.1 предложена формализация модели представления атомарной функциональной задачи управления $\varphi_n = \langle x^p, x^b, x^c, x^s \rangle$ в виде вектора из четырёх логических классов: представления x^p , бизнес-логики x^b , вычисления x^c и хранения x^s ; организуемых по аналогии с классами слоев архитектуры программных систем и унифицирующая вид задач инвариантно типу агентов управления $C_i^{3,j=[0,1]}$. А также обоснована звёздная топология интерфейсов с центральной ролью класса бизнес-логики, определяющая три типа рёбер: y^{pb} между классами x^p, x^b ; y^{bc} – между классами x^b, x^c ; y^{bs} – между классами x^b, x^s ; представляющих совместно атомарную функциональную задачу управления в виде простого неориентированный графа $G(\varphi_n)$ (Рисунок 3) и формализующих логическую конфигурацию её архитектуры:

$$G(\varphi_n) = (X, Y) = (\{x^p, x^b, x^c, x^s\}, \{y^{pb}, y^{bc}, y^{bs}\}), \quad (8)$$

где логические классы $X = \{x^p, x^b, x^c, x^s\}$ – вершины или ноды графа, а интерфейсы $Y = \{y^{pb}, y^{bc}, y^{bs}\}$ – рёбра.

Показано, что совокупность векторов для всех атомарных функциональных задач управления образует матрицу смежности, формирующую граф логической конфигурации архитектуры $G(A)$ с учётом размещения на физических узлах u_m и реализации агентом управления $C_i^{3,j}$:

$$\begin{aligned} A(\varphi_N) &= (\{\varphi_n\}, G(\varphi_N)) \\ \varphi_n &= \langle x^p | u_m, x^b | u_m, x^c | u_m, x^s | u_m, C_i^{3,j} \rangle, \\ G(\varphi_N) &= (\{x^p, x^b, x^c, x^s\}, \{y^{pb}, y^{bc}, y^{bs}\}) \end{aligned} \quad (9)$$

Введены правила размещения классов на физических узлах, регламентирующие распределение между локальными и серверными компонентами в зависимости от исходного состояния архитектуры:

$$\varphi_n = \langle x^{lp} \vee x^{sp}, x^{lb} \vee x^{sb}, x^{lc} \vee x^{sc}, x^{ls} \vee x^{ss} \rangle, \quad (10)$$

где l – указание на «локальный» физический узел, а s – «серверный».

Приведены примеры аналитической процедуры конфигурирования архитектур систем A :

$$F_{cnfg}(\Theta) = G(A), \quad (11)$$

для двух атомарных функциональных задач управления φ_1, φ_2 одного агента управления $C_1^{3,j}$ на одном локальном физическом узле u_1^l при минимальном и максимальном количестве логических классов, а также с учётом добавления атомарной функциональной задачи управления интеграционным взаимодействием $\varphi^\phi = \langle x^{\phi p}, x^{\phi b}, x^{\phi c}, x^{\phi s} \rangle$, как обязательного требования по взаимосвязи со всеми атомарными функциональными задачами управления архитектуры в состоянии «to be» A^* .

Введен и обоснован универсальный критерий качества архитектур систем в виде оценки сложности логической конфигурации:

$$H(G(A)) = \sum_1^\alpha \log_2 \deg(x_\alpha), \quad (12)$$

где $\deg(x_\alpha)$ – степень ноды, рассчитываемая по числу инцидентных рёбер (интерфейсов) и обуславливающая структурную сложность логического класса x_α , $H(G(A))$ – сложность логической конфигурации архитектуры.

В разделе 3.2 разработан набор базовых операций и правил модификации логической конфигурации архитектуры, формализованных по аналогии с операциями редактирования графов. Для каждой операции определена формальная процедура преобразования матрицы смежности графа с указанием изменений множества вершин, рёбер и петель модификации y^{mod} . Введена эвристическая метрика стоимости модификации в виде петель на диагонали матрицы смежности, каждая из которых увеличивает степень соответствующей вершины на единицу, что позволяет учитывать стоимость проведённых операций в рамках единого критерия сложности.

Сформулированы отдельные критерии качества архитектур в виде оценок сложности процедур модификации:

$$H^{mod}(G'(A')) = \sum_1^\alpha \log_2 \deg^{mod}(x'_\alpha), \quad (13)$$

и суммарной сложности модифицированной конфигурации, объединяющие статическую структуру графа и стоимость операций модификации:

$$H'(G'(A')) = \sum_1^\alpha \log_2 \deg'(x'_\alpha), \quad (14)$$

где $deg'(x'_\alpha) = deg(x'_\alpha) + deg^{mod}(x'_\alpha)$.

Определены строгие правила допустимости операций модификации с учётом исходной структурной конфигурации архитектуры:

$$\rho^{rmp} \left((\varphi_n \multimap C_i^{3,j}) \rightarrow (\varphi'_n \multimap C_i^{3,j}) \right) = p^{dlt} \wedge p^{add}, \quad (15)$$

где ρ^{rmp} – правило замены агентов управления из числа «Персонал» на «Программные системы» в архитектуре.

В разделе 3.3 сформулированы условия конфигурирования архитектуры для состояний «as is» $F_{cnfg}(\theta^0)$ и «to be» $F_{cnfg}(\theta^*)$. Для состояния «as is» определено условие, регламентирующее представление атомарных функциональных задач управления, реализуемых персоналом, в виде отдельных не интегрированных логических классов без возможности слияния:

$$\begin{cases} \rho^{mrg} = \emptyset \mid \{\varphi_n\} \multimap \{C_i^{3,j=1}\} \\ \gamma^{\phi pb} = \emptyset \mid \{\varphi_n\} \multimap \{C_i^{3,j=1}\} \end{cases} \quad (16)$$

Для состояния «to be» определено формальное условие, требующее замены всех агентов из числа персонала на программные агенты с перераспределением атомарных функциональных задач управления, обязательной общей соинтеграцией и сохранением инвариантности каталогов атомарных функциональных задач управления и физических узлов:

$$\begin{cases} C_i^{3,j=1} = \emptyset \\ \rho^{rmp} \mid \{\varphi_n\} \multimap \{C_i^{3,j=0}, C_{i+1}^{3,j=0}\} \\ \rho^{add} \mid \varphi^\phi \\ \gamma^{\phi pb} \mid \{\varphi_n\} \multimap \{C_i^{3,j=0}, C_{i+1}^{3,j=0}\} \\ (\Phi, \Upsilon, g_2)^0 \Leftrightarrow (\Phi, \Upsilon, g_2)^* \end{cases}, \quad (17)$$

Предложен формальный критерий оптимизации логической конфигурации архитектуры, основанный на минимизации сложности модификации по множеству допустимых путей редактирования графа, удовлетворяющих условиям конфигурирования и правилам модификации:

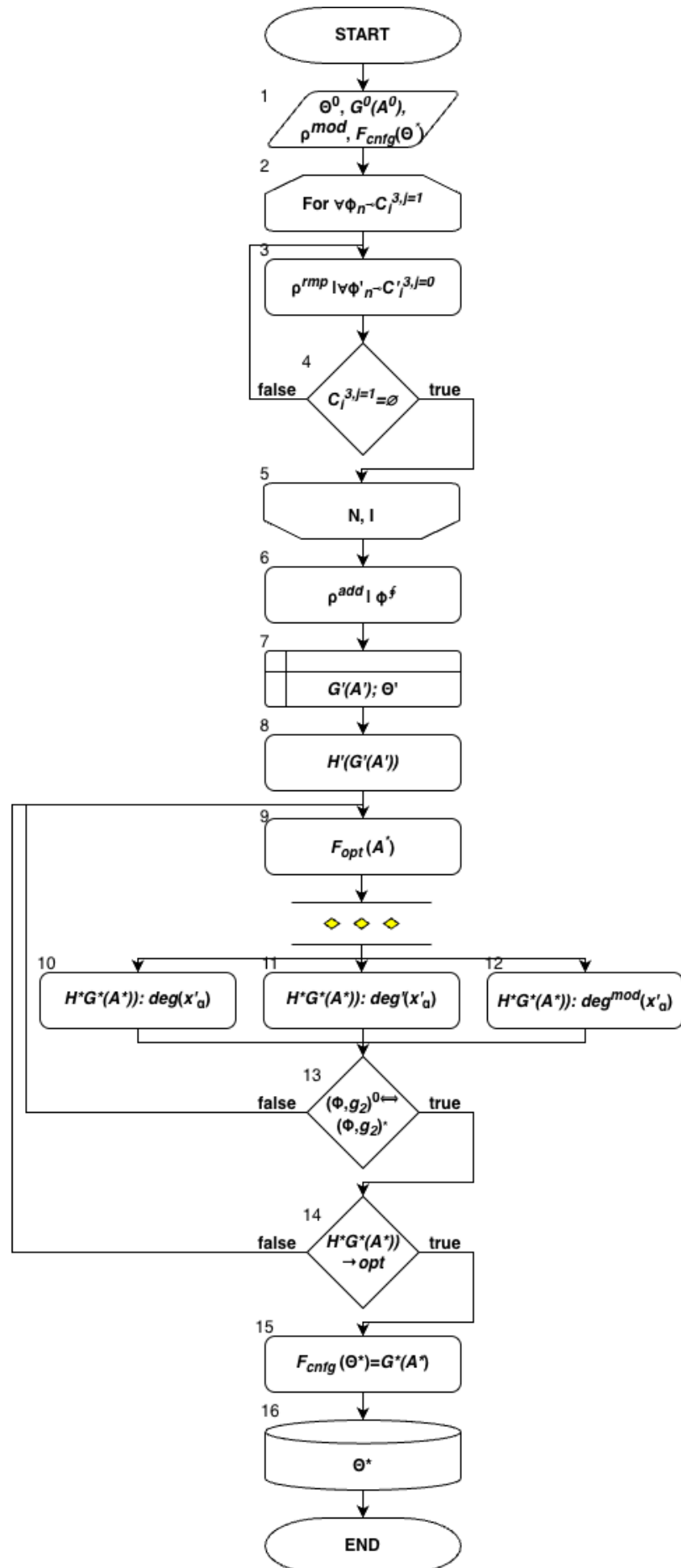


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма процесса конфигурирования и анализа архитектуры «to be»

$$F_{opt}(A^*): GED\left(G(A), F_{cnfg}(\Theta^*)\right) = \min_{\rho^{mod} \in \mathcal{P}(G(A), G^*(A^*))} H^*(G^*(A^*)), \quad (18)$$

где $\rho^{mod} = \{\rho^{add}, \rho^{del}, \rho^{mrg}, \rho^{sprt}, \rho^{updt}, \rho^{rmp}\}$ – множество применяемых операций модификации, $\mathcal{P}(G(A), G^*(A^*))$ – набор путей модификации логической конфигурации архитектуры.

В соответствии с предложенными формальными моделями и процедурами в разделе 3.4 разработаны алгоритмы конфигурирования и анализа архитектур для состояний «as is» и «to be» (Рисунок 3).

В четвертой главе осуществлено экспериментальное моделирование разработанных моделей и алгоритмов на примере предприятия по открытой добычи полезных ископаемых. На основании результатов экспериментального моделирования сделано заключение, что предложенные модели, критерии и алгоритмы прошли верификацию и валидацию, а также доказали свою потенциальную применимость для решения реальных задач цифровой трансформации горнопромышленных систем.



Рисунок 4. Фрагмент онтологической модели в виде иерархии концептов

Реализация онтологической модели архитектуры автономно функционирующей кибер-физической пространственно-распределенной геотехнической индустриальной системы осуществлялась на языке OWL в программной среде Protégé ver. 5.6.3 (Рисунок 4) и механизмов доказательства аксиом HermiT ver. 1.4.3.456. Механизм логико-семантического вывода

реализован на языке Python 3.2 с использованием библиотек xml.etree.ElementTree, Pandas, Matplotlib, Pathlib.

Моделирование работы алгоритма конфигурирования и анализа архитектуры в состоянии «as is» продемонстрировало практическую реализацию предложенного подход по формальному представлению логической конфигурации архитектур индустриальных систем (Рисунок 5) и возможность получения численной оценки качества такой архитектуры с использованием энтропийного критерия (Таблица 1).

Таблица 1

Результат оценки структурной сложности логической конфигурации архитектуры в состоянии «as is»

$H^0(G^0(A^0))$	$N(\varphi)$	$I(C^{3j})$	$M(v)$	$\alpha(x)$	$\iota(y)$	$deg(min)$	$deg(max)$	$deg(mean)$
3 229,41	4 920	14	8	10 933	8 936	1	2 397	1,63

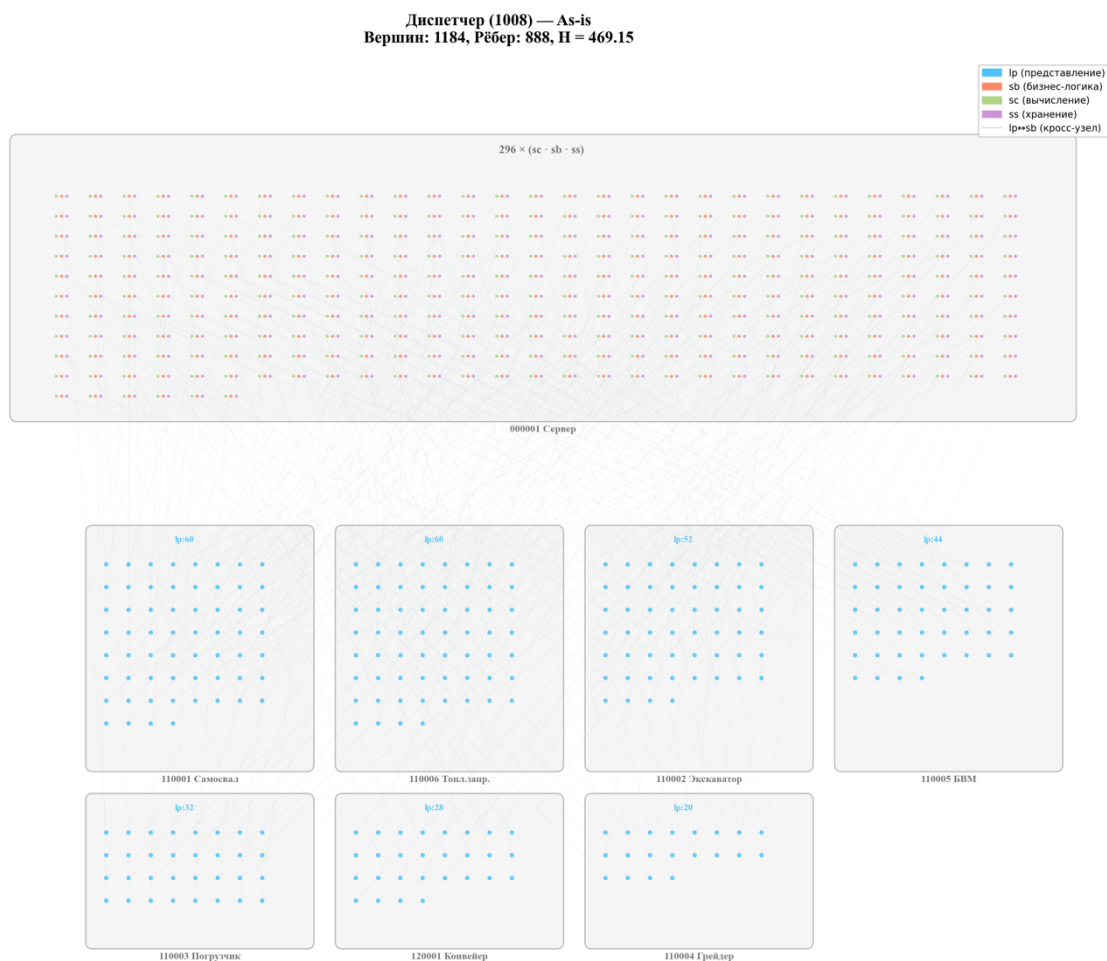


Рисунок 5. Фрагмент графа логической конфигурации архитектуры в состоянии «as is», детализированный для агента управления «Диспетчер»

Полученный граф логической конфигурации архитектуры демонстрирует практическую значимость предложенного критерия анализа, который позволяет количественно выявлять «узкие» места архитектуры – вершины с аномально высокой степенью, модификация которых затрагивает большое число смежных компонентов.

Экспериментальное моделирование работы алгоритма конфигурирования и анализа архитектуры в состоянии «to be» (Рисунок 6) показало работоспособность предложенных способов формальной модификации архитектур систем на базе операций редактирования графов, а также вариативность оценок качества в зависимости от выбранной стратегии цифровой трансформации (Таблицы 2 и Таблица 3).

Таблица 2

Сравнительные оценки сложности модификации логической конфигурации архитектуры

$H^*(G^*(A^*))$	A^0	A_1^*	A_2^*	A_3^*
$deg(x_\alpha^*)$	3 229,41	94,2	143,11	9 853,85
$deg^*(x_\alpha^*)$	-	5 058,49	2 164,77	27 350,04
$deg^{mod}(x_\alpha^*)$	-	59,05	42,31	15 084,01

Таблица 3

Параметры логических конфигураций архитектур

Параметр	A^0	A_1^*	A_2^*	A_3^*
$N(\varphi)$	4 920	4 920 + 1	4920 + 1	4920 + 1
$I(C^{3j})$	14	3 + 1	4 + 1	4920 + 1
$M(v)$	8	8	8	8
$\alpha(x)$	10 937	4 960	4 979	19 684
$\iota(y)$	8 939	4 966	4 992	19 683
$deg(min)$	1	1	1	1
$deg(max)$	2 356	2 653	2 357	4 921
$deg(mean)$	1,63	2	2,01	2
$deg(median)$	1	1	1	1
$\iota(y^{mod})$	0	5 050	2 096	34 989
$y^{mod}(min)$	0	1	0	0
$y^{mod}(max)$	0	12	11	2 916
$y^{mod}(mean)$	0	1,02	0,42	1,78
$y^{mod}(median)$	0	1	0	1

Диспетчер (1008) — Вариант 2 (→ Новый ПА)
Вершин: 309, Рёбер: 308, H = 10.84



Рисунок 6. Фрагмент графа логической конфигурации архитектуры для перераспределенных атомарных функциональных задач управления агента «Диспетчер» в состоянии «to be» для Варианта 2

В рамках моделирования рассматривались три варианта модификации: с перераспределением всех атомарных функциональных задач управления, реализуемых агентами «Персонал», только между существующими программными агентами A_1^* ; созданием одного нового программного агента управления и закреплением за ним всех атомарных функциональных задач управления от «Персонала» A_2^* ; заменой всех агентов управления на новых программных агентов, реализующих строго по одной атомарной функциональной задаче управления («микросервисный» вид архитектуры) A_3^* .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам настоящего исследования решена актуальная задача повышения эффективности процессов цифровой трансформации горнопромышленных предприятий посредством разработки моделей и методов оценки и анализа архитектур для построения автономно функционирующих кибер-физических пространственно-распределенных геотехнических индустриальных систем, включая:

1. Формализованы критерии и задачи управления цифровой трансформацией архитектур сложных крупномасштабных пространственно-распределенных геотехнических предприятий. Архитектура представлена как совокупность четырёх групп гетерогенных компонент – технологических процессов, физических объектов, агентов управления и информации, обуславливающих структурно-функциональную организацию предприятий. Сформулированы условия проведения ЦТ предприятия как процесса замещения персонала программными агентами при сохранении функциональной пригодности.
2. Предложен подход формализации априорных знаний о структурно-функциональной конфигурации предприятия для составления метамодели архитектуры посредством онтологического моделирования. В соответствии с предложенным подходом разработана двухкомпонентная онтологическая модель архитектуры на языке дескрипционной логики OWL, объединяющая универсальную таксономию концептов пространственно-распределенной геотехнической индустриальной системы с конкретизированным набором индивидов для типового горнопромышленного предприятия по открытой добычи полезных ископаемых.
3. Предложен механизм логико-семантического вывода ключевых компонентов метамодели, обуславливающих архитектуру индустриальной системы инвариантно этапам жизненного цикла цифровой трансформации. Механизм реализует строгий комбинаторный перебор допустимых аксиоматических высказываний для получения семантически точных и полных каталогов атомарных функциональных задач управления и физических узлов размещения, а также граф их взаимосвязи.

4. Разработан алгоритм формирования метамодели архитектуры индустриальной системы, обеспечивающий минимизацию рисков возникновения ошибок традиционного экспертно-аналитического подхода посредством комплексного применения средств дескрипционной логики и механизмов строгого комбинаторного перебора с доказательством непротиворечивости, полноты и точности знаний.
5. Разработаны модель представления архитектуры в виде графа логической конфигурации, согласовывающая понятия архитектуры предприятия с архитектурами программных систем через единообразное описание атомарных функциональных задач управления, и унифицированные информационно-энтропийные критерии количественной оценки качества архитектур, обеспечивающие возможность сопоставления и анализа её состояний инвариантно этапам жизненного цикла.
6. Разработан набор формальных операций модификации логической конфигурации архитектуры с эвристической метрикой стоимости в виде петель модификации и правилами допустимости, позволяющими количественно оценивать и сопоставлять варианты структурных преобразований.
7. Сформулирован критерий оптимизации в виде минимизации сложности по множеству допустимых путей редактирования графа архитектуры на базе различных вариантов энтропийных оценок, что обеспечивает возможность обоснованного выбора стратегии цифровой трансформации индустриальной системы.
8. Разработаны алгоритмы процедур конфигурирования и анализа архитектур, обеспечивающих формальную инструментальную основу решения задач управления жизненным циклом цифровой трансформации для построения автономно функционирующих кибер-физических пространственно-распределенных геотехнических индустриальных систем.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования:

1. **Дерябин С.А., Темкин И.О.** Онтологическое моделирование и управление цифровой трансформацией архитектуры горнодобывающих предприятий. Записки Горного Института, 2025, 275, 130-144 (Scopus Q1, RSCI Q1). **Вклад соискателя:** разработка онтологической модели и критериев цифровой трансформации горнопромышленной системы.
2. **Deryabin S., Temkin I., Rzaade U., Kondratev E.** Models and methods of designing data-centric microservice architectures of digital enterprises. Informatics, 2023, 10(1), DOI: 10.3390/informatics10010004 (Scopus Q1, RSCI Q1). **Вклад соискателя:** разработка моделей и методов проектирования архитектур цифровых предприятий.

3. Temkin I.O, **Deryabin S.A.**, Al-Saeedi A.A.K., Konov I.S. Operational planning of road traffic for autonomous heavy-duty dump trucks in open-pit mines. Eurasian mining, 2023, 16(13), 89-92, DOI: 10.17580/em.2024.02.19 (Scopus Q2). **Вклад соискателя:** разработка структуры информационно-управляющей среды горнодобывающего предприятия.
4. **Deryabin S.A.**, Kondratev E.I., Rzazade U.A., Temkin I.O. Digital mine architecture modeling language: methodological approach to design in industry 4.0. Mining informational and analytical bulletin, 2022, 2, 97-110, DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_97 (Scopus Q3). **Вклад соискателя:** разработка подхода к моделированию архитектуры индустриальной системы в рамках цифровой трансформации.
5. **Deryabin S.A.**, Rzazade U.A., Kondratev E.I., Temkin I.O. Metamodel of autonomous control architecture for transport process flows in open pit mines. Mining informational and analytical bulletin, 2022, 2, 117-129, DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_117 (Scopus Q3). **Вклад соискателя:** разработка формального вида метамодели архитектуры горнопромышленной системы.
6. **Deryabin S.**, Temkin I., Zykov S. About some issues of developing Digital Twins for the intelligent process control in quarries. Procedia computer science, 2020, 176, 3210-3216, DOI: 10.1016/j.procs.2020.09.128 (Scopus Q2). **Вклад соискателя:** разработка моделей представления кибер-физической технологической среды горнопромышленной системы.
7. Temkin I., **Deraybin S.**, Konov I., Kim M. Possible archticture and some neuro-fuzzy algorithms of an intelligent control systems for open pit mines transport facilities. Frontiers in atrificial intelligence and applications, 2019, 320, 412-420, DOI: 10.3233/FAIA190205 (Scopus Q3). **Вклад соискателя:** разработка алгоритмов управления автономными объектами ГТК.
8. Zykov S.V., Temkin I.O., **Deryabin S.A.** Trade-off based architecting of the software system for autonomous robotized open pit mining. Procedia computer science, 2019, 159, 1740-1746, DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.345 (Scopus Q2). **Вклад соискателя:** разработка требований к цифровой трансформации архитектур горнопромышленных систем.

Публикации в изданиях, включенных в перечень журналов ВАК:

9. Темкин И.О., Куляница А.Л., **Дерябин С.А.** Вычислительные модели взаимодействия автономных мобильных агентов транспортного комплекса горных предприятий. Информация и космос, 2017, 2, 65-71 (ВАК). **Вклад соискателя:** разработка структурно-функциональных схем информационного представления агентов ГТК.

Публикации в сборниках трудов международных и отечественных конференций:

10. Темкин И.О., **Дерябин С.А.**, Конов И.С. Нечеткие модели управления взаимодействием мобильных объектов горно-транспортного комплекса (ГТК). Шаг в будущее: Искусственный

Интеллект и Цифровая Экономика, 2017, 1, 246-253. **Вклад соискателя:** разработка алгоритмов управления автономными объектами ГТК.

Свидетельства о государственной регистрации РИД (программы для ЭВМ):

11. Темкин И.О., **Дерябин С.А.**, Конов И.С., Рзаде У.А.о. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019663713 от 22.10.2019 Программа диспетчеризации потоков данных платформы цифрового дублирования транспортно-технологических процессов при добыче минерального сырья. **Вклад соискателя:** разработка структурно-функциональных схем представления кибер-физической технологической среды горнопромышленной системы.
12. Темкин И.О., **Дерябин С.А.**, Рзаде У.А.о., Кондратьев Е.И. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019663714 от 22.10.2019 Программа цифрового дублирования процесса перемещения физических мобильных объектов в виртуальной технологической среде. **Вклад соискателя:** разработка алгоритмов взаимодействия агентов кибер-физической технологической среды горнопромышленной системы.
13. Темкин И.О., Конов И.С., Рзаде У.А.о., **Дерябин С.А.** Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2018618185 от 10.07.2018 Программа калибровки и согласования разнотипных пространственных данных телеметрии для высокоточного позиционирования мобильных объектов. **Вклад соискателя:** разработка информационных моделей представления агентов ГТК.
14. Темкин И.О., Конов И.С., Рзаде У.А.о., **Дерябин С.А.** Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2018618186 от 10.07.2018 Программа формирования оптимальных маршрутов и команд рулевого управления автономных мобильных объектов. **Вклад соискателя:** разработка алгоритмов управления автономными агентами ГТК.