

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Уфимский университет науки и технологии

на правах рукописи



КОНЕВ Константин Анатольевич

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ
СИТУАЦИОННО-ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

Специальность: 2.3.1 Системный анализ,
управление и обработка информации, статистика

Диссертация, на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант –
доктор технических наук, доцент
Антонов В. В.

Уфа - 2026

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Анализ проблем обеспечения качества и состояния методов интеллектуальной поддержки принятия решений.....	17
1.1 Анализ современных подходов в сфере обеспечения качества промышленных предприятий и их ограничений	17
1.2 Анализ инструментов для решения выявленных проблем	29
1.3 Постановка задачи исследования	37
1.4 Выводы по главе. Постановка задачи	50
Глава 2. Методологические основы ситуационно-онтологического подхода к поддержке принятия решений.....	52
2.1 Ситуационно-онтологический подход к поддержке принятия решений в сфере обеспечения качества на промышленном предприятии.....	52
2.2 Механизмы анализа и оценки в ситуационно-онтологическом подходе ..	74
2.3 Анализ соответствия и эффективности СОП на основе качественного и количественного сравнения с известными подходами	80
2.4 Выводы по главе	83
Глава 3. Разработка методов проектирования адаптивных инструментов СППР для работы с типовыми, нетиповыми и кросс-уровневыми ситуациями	85
3.1 Проектирование модульной архитектуры СППР как основы адаптивных инструментов для интеграции разнородных данных и знаний	85
3.2 Разработка метода подбора ИИ-алгоритма.....	95
3.3 Интеллектуальная подсистема СППР.....	102
3.4 Разработка метода согласования онтологий уровней принятия решений	105
3.5 Разработка адаптированного метода нечёткого вывода.....	112
3.6 Выводы по главе	119
Глава 4. Разработка и внедрение методологии интеллектуальной поддержки принятия решений в сфере обеспечения качества на основе СОП	120
4.1 Практическая реализация СОП в промышленной СППР	121
4.2 Повышение объяснимости решений через визуализацию и семантическую интерпретацию	124
4.3 Механизмы обратной связи и самообучения в СППР	131
4.4 Интеграция уровней управления	137
4.5 Комплексная оценка эффективности методологии ИППР	145

4.6 Выводы по главе	159
Глава 5. Разработка комплексного метода интеграции СОП-моделей в бизнес-процессы предприятия.....	161
5.1 Семантическое сопоставление онтологий и нормативов	161
5.2 Формализация правил принятия решений через онтологическую декомпозицию	169
5.3 Поддержание актуальности модели через цифровой след и самообучение	176
5.4 Метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО	186
5.5 Выводы по главе	191
Глава 6. Апробация и достоверность разработанной методологии интеллектуальной поддержки принятия решений.....	193
6.1 Методы подтверждения достоверности и апробации.....	193
6.2 Прототип СППР на основе СОП	195
6.3 Апробация результатов исследования на предприятиях.....	216
6.4 Апробация прототипа СППР в учебном процессе	222
6.5 Выводы по главе	225
Заключение	227
Глоссарий и аббревиатуры	231
Список литературы	235
Приложение А. Пример ситуаций, требующих принятия решений в сфере обеспечения качества.....	260
Приложение Б. Методы обеспечения качества, интегрированные на основе СОП в СППР	261
Приложение В. Примерный перечень измерительно-прогнозных показателей оценки эффективности СППР	262
Приложение Г. Результаты расчёта ключевых метрик.....	265
Приложение Д. Построение онтологических моделей в прототипе интеллектуальной СППР.....	268
Приложение Е. Настройка решателя в прототипе интеллектуальной СППР	274
Приложение Ж. Анализ эффективности прототипа интеллектуальной СППР на примерах ситуаций.....	279
Приложение И. Акты внедрения результатов диссертационной работы.....	287
Приложение К. Расширенный обзор связи задач и результатов исследования	293

Введение

Актуальность темы исследования

В практике обеспечения качества на промышленных предприятиях наблюдается противоречие: оперативные задачи требуют экспертных знаний, а аналитика необходима не через день, а в режиме реального времени. Притом у исполнителя нет ни времени, ни достаточных компетенций для принятия адекватного решения, в то время как руководитель перегружен оперативными данными. А для сохранения конкурентоспособности, уровень качества продукта (услуги) должен соответствовать всё более высоким ожиданиям потребителя. Современный подход к обеспечению качества включает не только сам физический продукт (услугу), но и процесс его (её) создания и систему (см. п. 31 Глоссария), в рамках которой этот процесс функционирует. Уровни различаются по задачам, скорости реакции и требованиям к специалистам. Значительно выросла цена ошибки при принятии решений в данной предметной области, поскольку сфера обеспечения качества (см. п.15 там же) – это баланс между числом и глубиной проверок и их стоимостью.

Условия работы современного предприятия связаны с большим объёмом данных для обработки, дефицитом времени для вывода продукта на рынок, усложнением решений в связи с развитием технологий, вариабельностью операций без возможности стандартизации, необходимостью учёта динамических факторов.

Для задач, где опыт позволяет использовать онтологические модели, но требуется учёт времени, вводятся три типа ситуаций (см. п. 25 Глоссария): типовые (см. п. 29 там же), нетиповые (см. п. 14 там же) и кросс-уровневые (см. п. 8 там же). Наиболее сложными из них в сфере обеспечения качества являются кросс-уровневые ситуации, в которых решение вопроса невозможно в рамках компетенций специалистов одного уровня. В таких ситуациях необходимы интегральные инструменты для поддержки решений.

Принятие решений сопряжено с обработкой разнородной информации из разных функциональных источников. Большой объём данных повышает требования к компетенциям и системному мышлению. Высокие риски последствий решений ведут к значительным затратам на их верификацию и валидацию, что требует дополнительных

контуров контроля и усложняет управление. Как отмечает Ю. П. Адлер [90], рост затрат на контроль качества не всегда приводит к снижению рисков.

Традиционные подходы к принятию решений при обеспечении качества имеют системные ограничения. Установление соответствия стандарту – универсальный, но часто неприменимый метод для многих практических задач [93]. Цикл PDCA декларативен, не даёт конкретных инструментов и неэффективен в оперативных ситуациях [221]. Менеджмент качества на основе ГОСТ Р ИСО 9001-2015, как показано в §1.1.3, в условиях цифровой трансформации также теряет эффективность [135, 225]. При этом ряд авторов связывает повышение результативности обеспечения качества с цифровизацией управленческих функций [137, 158, 197], а аналогичные запросы фиксируются и в области технического контроля [202]. Таким образом, необходима разработка новых или усовершенствование существующих методов поддержки решений, что подтверждается запросом как со стороны управления, так и со стороны технических служб.

Многие решения в сфере обеспечения качества требуют оперативности, но контролёры на уровне продукта, как правило, не имеют навыков для принятия нестандартных решений. Значит актуальна разработка теоретических основ интеллектуальной поддержки решений, а дефицит времени [309] обуславливает необходимость автоматизации подготовки решений.

В качестве технического инструмента для реализации методов поддержки решений в типовых, нетиповых и кросс-уровневых ситуациях выступают системы поддержки принятия решений (СППР). Наибольшие перспективы открывают интеллектуальные СППР, основанные на методах искусственного интеллекта (Microsoft Power BI (США) [67], IBM SPSS [40]).

В данном исследовании решается задача разработки аналитического аппарата для ситуационно-онтологического моделирования управленческой практики на уровнях продукта, процесса и системы, а также создания методов интеграции интеллектуальных СППР в бизнес-процессы для преодоления указанного когнитивного дисбаланса. Используются методы системного анализа, ситуационного

и онтологического моделирования, нечёткая логика и другие интеллектуальные подходы.

Степень разработанности темы исследования

Основоположники системологии (К.Л. Бераланфи, А.А. Богданов, Н. Винер и др. [94, 245]) сформировали основные положения теории систем. Фундаментальные основы обеспечения качества заложены в работах Э. Деминга [138], К. Исикавы [151], Ф. Кросби [22], А.Б. Фейгенбаума [246] и др. среди зарубежных авторов, Г.Г. Азгальдова, Ю.П. Адлера [91], А.В. Гличева [128] и др. среди российских исследователей.

Возможности использования искусственного интеллекта при решении задач обеспечения качества рассматривали П. Синонкель и Р. Бишопс и отечественные авторы Е.А. Боргардт, Н.Н. Гоглев, К.Х. Зоидов [72, 112, 145, 244].

Значительный вклад в теорию принятия решений внесли: Р.Э. Беллман (нечёткие условия), Э. Мулен (кооперативное принятие решений), Т. Саати (метод анализа иерархии), Дж. фон Нейман (теория игр), П. Фишберн (теория полезности), Н.Н. Моисеев (математические методы оптимизации), О.И. Ларичев (искусственный интеллект), В.В. Подиновский (многокритериальный анализ), И.Ф. Шахнов (согласование решений) [216, 223, 252].

Применение теории принятия решений при управлении потребовало создания систем поддержки принятия решений (СППР). Согласно Терелянскому [239], в СППР применяются: информационный поиск, интеллектуальный анализ данных, поиск знаний, рассуждения на основе прецедентов [116], имитационное моделирование, нейронные сети, генетические алгоритмы, ситуационный и когнитивное моделирование. Развитие данных систем описано в трудах Г. Саймона, А. Ньюэлла, С. Мортон, Дж. Литла, П. Г. Кина, Р. Спрага и Е. Карлсона, Г. Хенка, Кодда, Г. Маркаса [14, 20, 68]. В отечественной литературе О.И. Ларичев, И.С. Масич, А.Б. Петровский [64].

Ситуационный подход к управлению был введен Р. Моклером. В отечественной науке понятие «модельное управление» популяризовали В.Н. Пушкин и Д.А. Поспелов, а также Ю. И. Клыков, Г. В. Коренев и др. [177, 206, 213].

Сегодня ситуационный подход рассматривается в различных сферах применения, его исследованию посвящено множество работ (см. например [102, 126, 148, 206, 207, 213] и множество других).

В конце XX века под влиянием системного подхода методология ситуационного управления трансформировалась, расширив свои границы за пределы организационных систем [148].

Большой вклад в моделирование систем управления внесла уфимская научная школа [70, 148, 173, 189, 207, 258, 260, 261]. В 2000–2010-х годах активно развивались онтологические модели (OWL [63]) и интеллектуальные методы принятия решений. Исследования по интеграции онтологий в бизнес-процессы велись Б.Я. Швединым [253], П.О. Скобелевым [231] и продолжаются в работах Удальцовой [242].

Концепция семантической сети, предложенная Тимом Бернерс-Ли в 1998 году [10, 25], стала основой для развития языка OWL и выхода методов онтологического моделирования за рамки интернет-программирования. В современных исследованиях онтологического моделирования значительный вклад внесли: Н.М. Боргест [113], В.А. Виттих [121], Л.В. Массель [203], С.В. Смирнов Л.Р. [226], Черняховская [250] и многие другие.

Фундаментальные основы искусственного интеллекта (ИИ) заложены такими учеными как Дж. Маккарти (введший термин «ИИ» в 1956 г.), а также У. Маккаллоком, Т. Кохоненом, А. Тьюрингом и Э. Хантом [47, 241].

Интеллектуальные методы моделирования и поддержки принятия решений: Т.А. Гаврилова [123], А.В. Затонский [144], А.В. Лапко [194], Ю.Ф. Тельнов [238], Филимонов Н. Б. [141] и многие другие.

Среди уфимских учёных в данной области знания помимо упомянутых ранее можно отметить В.И. Васильева [119], Б.Г. Ильясова [120], Е.А. Макарову [243], Д.В. Полупанова [205] и многих других.

Для учета неопределенности в работе применяется аппарат теории нечётких множеств (Л. Заде), адаптированный для задач качества в трудах Р. А. Алиева [4], Л. С. Берштейна [106], Н.А. Корневского [178].

При раскрытии темы искусственного интеллекта следует кратко упомянуть наиболее близкие направления переднего края науки, которыми на середину 2020-х годов являются дополненный искусственный интеллект и адаптивные методы машинного обучения, проработанные E. Turban [81], V. Prikshat [69], J. Shi [74], Г.Ю. Силкиным [228] и другими. Серьёзный вклад в исследования в сфере адаптивного машинного обучения вносят G. Hulten [38], R. Anand [6], N. Gautier [19], V. Botu [11].

В вопросах интеграции управления организацией (уровень системы), управления бизнес-процессами (уровень процесса) и оперативного уровня управления качеством (уровень продукта) преобладают публикации зарубежных авторов, которые в основном только указывают на наличие данной проблемы. Так в работе [5] описаны проблемы согласования стратегических и операционных целей, в [51] проблемы управления в многоуровневых организациях. В целом в современной научной литературе комплексного подхода к проблеме взаимодействия между уровнями управления не прослеживается. Авторы либо предлагают идти от стратегических целей к операционным сверху вниз, либо концентрируются на конкретном уровне управления, пытаясь решить частную проблему.

Недостатки современных СППР в сфере обеспечения качества включают методологические ограничения, недостаточную гибкость, слабую системность, отсутствие динамической адаптации и технологический консерватизм. Основной парадокс заключается в том, что СППР, предназначенные для обеспечения качества, страдают от системных недостатков, связанных с качеством своей архитектуры. Необходим новый подход, сочетающий строгую методологию, гибкие адаптивные механизмы и глубокую интеграцию цифровых технологий, при сохранении баланса между автоматизацией и ролью экспертного суждения.

Таким образом, развитие новых подходов к принятию решений в сфере обеспечения качества с использованием современных достижений науки и технологий является актуальной задачей, решение которой способствует повышению конкурентоспособности предприятий за счет улучшения качества продукции и эффективности управления качеством.

Объектом исследования является процесс принятия решения при реализации деятельности по обеспечению качества на промышленном предприятии.

Предметом исследования являются методы интеллектуальной поддержки принятия решений при реализации деятельности по обеспечению качества на промышленном предприятии.

Цель и основные задачи работы

Целью исследования является разработка ситуационно-онтологического подхода к поддержке принятия решений в сфере обеспечения качества промышленных предприятий, объединяющего методы ситуационного анализа, онтологического моделирования и теоретико-множественного формализма, с последующей реализацией в виде интеллектуальной СППР.

Для достижения главной цели были поставлены следующие **задачи**:

1) на основе анализа известных методологий и проблем предметной области разработать методологические основы ситуационно-онтологического подхода (СОП) для формализации взаимодействия уровней управления (продукт, процесс, система) через онтологические модели и теоретико-множественные отношения при описании процесса поддержки принятия решений при управлении в сфере обеспечения качества промышленного предприятия;

2) на основе СОП разработать методы проектирования адаптивных инструментов СППР, реализующих полный цикл принятия решений с учётом типовых, нетиповых и кросс-уровневых ситуаций, для обеспечения гибкой настройки модулей системы под конкретные условия, повышения объяснимости выводов и реализации механизмов актуализации модели знаний;

3) разработать методологию ИППР в сфере обеспечения качества в промышленности, объединяющую формальные ситуационно-онтологические модели, гибридные методы искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа данных, методы цифрового следа и обратной связи для самообучения, а также модульную трёхуровневую структуру СППР (продукт, процесс, система);

4) разработать комплексный метод интеграции ситуационно-онтологических моделей или её компонентов в бизнес-процессы и документооборот промышленного

предприятия, как составляющую часть методологии интеллектуальной поддержки принятия решений, обеспечивающую двунаправленное преобразование между OWL-онтологиями и ситуационно-онтологической моделью и между OWL-онтологиями и нормативными документами;

5) разработать методику оценки эффективности методологии ИППР в сфере обеспечения качества на промышленных предприятиях, объединяющую количественные и качественные показатели в сфере обеспечения качества на промышленных предприятиях.

Научная новизна полученных результатов

1) новизна СОП заключается в том, что впервые предложена систематизированная теория принятия решений в сфере обеспечения качества, объединяющая ситуационный анализ, онтологическое моделирование и теоретико-множественный формализм. Главное отличие от существующих подходов: нормативного (основанного на жёстких стандартах), PDCA (циклического управления), классического ситуационного (без формальной семантики), а также работ Шведина (онтологии для проектирования), Скобелева (мультиагентные системы) и Удальцовой (семантический анализ), СОП обеспечивает сквозную согласованность решений между уровнями принятия решений за счёт формализованных переходов через механизм множественных отображений, дифференцированную обработку ситуаций благодаря введённой таксономии (типовые, нетиповые, кросс-уровневые), привязку к производственному контексту через дискретизацию ситуаций на основе теории расписаний, адаптацию к неопределённости за счёт интеграции нечёткой логики и машинного обучения для анализа сложных зависимостей между параметрами, критериями и внешними условиями, динамическое управление качеством через адаптацию цикла PDCA к условиям непрерывного потока данных и цифрового следа;

2) новизна методов проектирования адаптивных инструментов для интеграции данных и знаний, заключается в том, что впервые предложена модульная архитектура с динамической заменой компонентов без остановки системы, метод выбора ИИ-алгоритма по типу ситуации через многокритериальную оценку,

гибридная подсистема обработки данных, адаптированный нечёткий вывод с онтологической интерпретацией функций принадлежности и механизм кросс-уровневого согласования онтологий через трёхуровневую верификацию. В отличие от прецедентных моделей (статичные базы знаний), чистого машинного обучения («чёрные ящики») и нечёткой логики (без онтологической привязки), они обеспечивают согласованность, объяснимость и устойчивость к неопределённости в условиях промышленного производства;

3) новизна разработанной методологии ИППР заключается в первом применении СОП для обеспечения качества в промышленности. В отличие от экспертных систем (ручное обновление знаний) и классических СППР (фокус на одном уровне), методология впервые обеспечивает сквозную согласованность решений на уровнях продукта, процесса и системы за счёт самообучающейся модели на основе цифрового следа, многоуровневой иерархической модели управления и двунаправленной интеграции с ERP-системами;

4) новизна комплексного метода интеграции СОП-моделей заключается в реализации двунаправленного преобразования между OWL-онтологиями, этими моделями и нормативными документами. В отличие от классического онтологического моделирования (односторонняя экспортная модель), данный метод обеспечивает строгое согласование действий на всех уровнях управления и минимизирует противоречия при интеграции знаний за счёт Трёхуровневой проверки и механизмов поддержания актуальности;

5) новизна методики оценки эффективности методологии ИППР заключается в первом применении нечётких переменных для агрегации показателей и комбинированной оценке количественных и качественных данных. В отличие от многокритериального анализа (точные данные), экспертного анализа (субъективность) и квалиметрии (фиксированные шкалы), предложенная методика снижает субъективность оценок за счёт интеграции апостериорного, измерительно-прогнозного и оценочно-субъективного методов.

Количественная оценка эффективности предложенных результатов, подтверждающая научную новизну и практическую значимость подтверждена расчётами и актами внедрения.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании СОП к поддержке принятия решений в сфере обеспечения качества промышленных предприятий. Впервые предложена интеграция ТММ ситуаций, решений и сценариев с онтологическим моделированием на языке OWL, что обеспечивает системность анализа и формализацию знаний на уровнях продукта, процесса и системы. Разработаны теоретико-множественные модели классификации решений и формализации правил. Предложен метод кросс-уровневого согласования онтологий и Трёхуровневая проверка (синтаксис-семантика-прагматика), расширяющие научные основы интеграции знаний. Введены метрики эффективности увязанные с результатами исследования, обеспечивающие количественную оценку объяснимости, согласованности и воспроизводимости выводов. Они способствуют развитию теории поддержки принятия решений, увязывая ситуационный анализ, онтологии и системный подход.

Практическая значимость определяется возможностью использования разработанной методологии ИППР на промышленных предприятиях и в проектных организациях. Методология даёт рост качества управления за счёт автоматизации анализа нетиповых и кросс-уровневых ситуаций, уменьшения ошибок интерпретации нормативов и снижения времени реакции на проблемы. Реализованная модульная архитектура СППР даёт возможность адаптировать систему под специфику предметной области. Метод ДНП OWL ↔ СОП и интеграция с ERP-системами поддерживают соответствие нормативным требованиям и устойчивость к изменениям. А метод автоматической генерации документации и поддержание её актуальности позволяет сокращать трудозатраты. Наконец, использование цифрового следа и самообучения модели способствуют непрерывному улучшению показателей системы. Результаты апробированы на промышленных предприятиях и в проектных фирмах, что подтверждено актами внедрения. Методология применима при

внедрении ERP, реинжиниринге бизнес-процессов и обеспечении соответствия требованиям ГОСТ, что повышает экономическую эффективность и конкурентоспособность организаций.

Результаты исследования внедрены в организациях.

Соответствие паспорту научной специальности. Работа соответствует п.п. 1, 2, 4, 5, 8, 10, 11, 13 паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»:

– Методологические основы СОП

п. 1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта

– Методы проектирования адаптивных инструментов

п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

п. 5 Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

Методология поддержки принятия решений на основе СОП

п. 10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах

– Комплексный метод интеграции ситуационно-онтологических моделей в бизнес-процессы предприятия.

п. 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта

п. 8. Теоретико-множественный и теоретико-информационный анализ сложных систем.

– Методика оценки эффективности СППР

п. 11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов.

п. 13. Методы получения, анализа и обработки экспертной информации, в том числе на основе статистических показателей.

Методология и методы исследования:

- методы системного анализа применялись для декомпозиции процессов обеспечения качества и выявления кросс-уровневых разрывов между продуктом, процессом и системой;
- ситуационное и онтологическое моделирование легли в основу разработки СОП, обеспечив формализацию знаний и семантическую интероперабельность на всех уровнях управления;
- математическое моделирование и теоретико-множественный формализм использовались для описания ситуаций, решений и сценариев, а также для разработки механизмов согласования и выбора алгоритмов;
- методы нечёткой логики и машинного обучения применялись для обработки неопределённых данных и повышения точности выводов в нетиповых ситуациях;
- теория принятия решений легла в основу разработки гибридных ИИ-подходов, выбора критериев и оценки эффективности.

Положения, выносимые на защиту

- 1) методологические основы ситуационно-онтологического подхода для формализации взаимодействия уровней управления (продукт, процесс, система);
- 2) методы проектирования адаптивных инструментов;
- 3) методология поддержки принятия решений на основе ситуационно-онтологического подхода, включая методы проектирования адаптивных инструментов, включающая модель модульной архитектуры СППР и методы интеллектуальной поддержки принятия решений, ориентированные на управление кросс-уровневыми ситуациями;
- 4) комплексный метод интеграции ситуационно-онтологических моделей в бизнес-процессы (БП) предприятия;
- 5) методика оценки эффективности методологии ИППР в сфере обеспечения качества на промышленных предприятиях.

Детально результаты исследования, вынесенные на защиту, описаны в заключении.

Реализация и внедрение результатов исследования. Результаты работы внедрены и активно используются на предприятиях ПАО «ОДК-УМПО», АО «АЙПЛ-Консалтинг», ООО «Газпромнефть – Цифровые решения», а также в учебный процесс ФГБОУ ВО УУНиТ.

Степень достоверности и апробация работы

Изложенные в диссертационном исследовании положения, выводы и рекомендации являются достоверными, что обеспечивается корректностью использования признанных методов разработки систем поддержки принятия решений. Выполненные автором эксперименты с применением разработанной СППР при обеспечении качества на промышленном предприятии подтверждают работоспособность предложенных методов. Обоснованность разработанных моделей, методов и алгоритмов поддержки принятия решений подтверждена исследованиями, проведенными на реальных данных, что подтверждается актами внедрения.

Основные результаты диссертации и материалы исследования обсуждались на следующих конференциях: международных конференциях ITIDS, Уфа, Россия (2014, 2018, 2021); международной научно-технической конференции DSPTech (2015), Уфа, Россия; международной научно-практической конференции «ИНФОРИНО» (2016), Москва, Россия; международном семинаре «Критические инфраструктуры: управление в чрезвычайных ситуациях, интеллектуальные, агентные, облачные вычисления и кибербезопасность» (IWCI) (2019), Иркутск, Россия; международной научно-технической конференции «Мавлютовские чтения», Уфа, Россия (2021); заседании Башкирского отделения Научного Совета РАН по методологии искусственного интеллекта, Уфа, Россия (2023, 2024).

По теме диссертации получено 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и 1 свидетельство о регистрации базы данных.

По теме диссертации получены акты внедрения от ПАО «ОДК-УМПО», АО «АЙПЛ-Консалтинг», ООО «Газпромнефть – Цифровые решения» и акт внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО УУНиТ.

Связь исследований с научными программами. Исследование выполнялось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках основной части государственного задания высшим учебным заведениям №№ FEUE-2020-0007, FEUE-2023-0007 и действующей № FRRR-2026-0006.

Личный вклад соискателя

Все исследования, результаты которых изложены в диссертации, получены лично соискателем в процессе научных исследований и экспериментов. Из совместных публикаций в диссертацию включен только тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 44 основных научных работ, в том числе 15 статей в рецензируемых печатных изданиях из перечня, утвержденного ВАК (6 изданий – К1, из них 4 изданий, входит в перечень RSCI, 4 статьи опубликованы автором единолично, 7 изданий – К2); 5 свидетельств о государственной регистрации программ и баз данных для ЭВМ, 2 монографии.

Структура и объем диссертационной работы

Объем диссертационной работы составляет 296 страниц, включая 50 рисунков и 108 таблиц (без учёта рисунков и таблиц приложений). Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, глоссария, включающего 33 термина, списка использованных источников, включающего 261 наименование, в дополнение к работе приводятся 9 приложений.

Глава 1. Анализ проблем обеспечения качества и состояния методов интеллектуальной поддержки принятия решений

Глава посвящена анализу проблем, связанных с принятием решений при обеспечении качества на промышленном предприятии с позиций системного подхода, подходов и методов для решения этих проблем, и их ограничений, а также обоснованию основных задач по преодолению этих ограничений.

1.1 Анализ современных подходов в сфере обеспечения качества промышленных предприятий и их ограничений

1.1.1 Системный анализ задач обеспечения качества на уровнях продукта, процесса и системы

Термин «принятие решений» многогранен и требует уточнения в контексте обеспечения качества. Для этого проводится классификация задач, основанная на системном подходе, которая охватывает взаимосвязи между уровнями продукта, процесса и системы как единой структуры управления. Классификация выделяет три ключевых области: продукт, процесс и система (см. таблицу 1.1) и отражает принципы системного анализа, рассматривая обеспечение качества как интегрированную систему взаимосвязанных подсистем. Каждая подсистема обладает своими целями, ограничениями и механизмами влияния на другие уровни. Она служит основой для последующего выбора и адаптации методов интеллектуальной поддержки принятия решений, разрабатываемых в работе.

Таблица 1.1 Классификация задач принятия решений по уровням обеспечения качества

Уровень	Задачи принятия решений	Аналог в теории управления
Продукт	Контроль характеристик изделия, соответствие стандартам, устранение дефектов [214]	Операционный уровень (оперативное управление)
Процесс	Оптимизация технологических цепочек, минимизация дефектов, рост производительности	Тактический уровень управления
Система	Распределение ресурсов, управление рисками [34], стратегическое планирование	Стратегический уровень управления

Согласно ГОСТ ИСО 9000:2015, обеспечение качества (quality assurance) – это часть менеджмента качества, направленная на создание уверенности в выполнении

требований [134]. В рамках диссертации под этим термином понимается комплекс взаимосвязанных практических задач, возникающих на всех стадиях жизненного цикла, для решения которых требуется сбор, анализ и интерпретация данных.

Анализ особенностей и ограничений на каждом уровне:

- На уровне продукта (объект-результат) доминируют формальные процедуры технического контроля по ГОСТ Р 55753-2013 [131]. Ситуации и задачи, связанные с оценкой и контролем соответствия конечной продукции или услуги установленным требованиям. Фокус на анализе данных о свойствах и параметрах результата. Ключевые задачи: технический контроль, испытания, приёмка, экспертиза продукции [165].

- Уровень процесса (технологический и операционный контур) направлен на оптимизацию технологий, минимизацию дефектов и повышение производительности. Согласно ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [135] здесь рассматриваются ситуации и задачи, связанные с управлением и оптимизацией хода работ для гарантированного получения результата. Фокус на анализе данных о ходе, стабильности и эффективности процессов. Ключевые задачи: управление параметрами процессов, анализ отклонений, корректирующие действия в операционном контуре. На уровне процесса наблюдается слабая интеграция стратегических решений и операционной практики [114].

- На уровне системы (организационно-стратегический контур) рассматриваются ситуации и задачи, связанные с планированием, управлением рисками [34], организацией и стратегическим развитием деятельности по качеству в целом. Фокус на анализе информации для формирования политики, распределения ресурсов и оценки эффективности инвестиций. Ключевые задачи: стратегическое планирование в сфере обеспечения качества, аудит системы, оценка инвестиционных решений.

Рассмотрим особенности принятия решений (см. таблицу 1.2).

Таблица 1.2 Ключевые особенности уровней принятия решений в сфере обеспечения качества

Уровень управления	Характеристики	Основные задачи	Предпочитаемые инструменты
Продукт	- Время реакции: секунды-минуты - Влияние: локальное (на изделие) - Аналитика: минимальная, шаблонная - Формализация: высокая, стандартизированная - Данные: точные, измеримые	Обеспечение соответствия изделия требованиям качества. Работа с типовыми ситуациями и единичными дефектами	Правила "ЕСЛИ–ТО", жёсткие алгоритмы, контрольные карты, автоматические решения
Процесс	- Время реакции: минуты–часы - Влияние: среднее (на производство) - Аналитика: средняя, требует причинного анализа - Формализация: частично формализованные данные - Данные: смешанные (точные + экспертные)	Оптимизация технологических операций, минимизация отклонений, стабилизация процессов	Нечёткая логика, методы причинности, анализ временных рядов, цифровой след
Система	- Время реакции: часы–дни - Влияние: системное, долгосрочное - Аналитика: глубокая, комплексная - Формализация: слабо формализуемая информация - Данные: разнородные, кросс-уровневые	Стратегическое планирование, управление рисками, распределение ресурсов, соответствие стандартам	Гибридные ИИ-подходы, PDCA, оценка по метрикам, экспертные совещания

Из анализа таблицы 1.2 следует, что каждый уровень управления (продукт, процесс, система) имеет существенные различия по целому ряду значимых параметров, поэтому методы принятия решений не могут быть напрямую масштабированы с одного уровня на другой.

Три уровня управления (продукт, процесс, система) рассматриваются как элементы единой структуры. Их взаимодействие порождает эмерджентные свойства (см. рисунок 1.1), что составляет основу для поддержки решений с учётом межуровневых связей. Предметная область исследования – задачи, охватывающие все три уровня и требующие интеграции разнородных данных.



Рисунок 1.1 – Связь между уровнями принятия решений в сфере обеспечения качества и уровнями управления предприятия

1.1.2 Ситуационный анализ обеспечения качества

На объекте управления (процессы обеспечения качества) могут возникать существенно различные ситуации. Формализуем классификацию ситуаций [98] и связанных с ними методов принятия решений для обеспечения эффективности принятия решений в сфере обеспечения качества на всех уровнях управления на промышленных предприятиях (см. таблицу 1.3).

Таблица 1.3 Классификация типов ситуаций

Тип ситуации	Описание	Признаки	Примеры
Типовая	Ситуации с известными решениями, высокой повторяемостью и низкой неопределённостью	Повторяемость, чёткие критерии идентификации, низкий уровень неопределённости	превышение диапазона температур в техпроцессе или отклонение диаметра отверстия в детали
Нетиповая	Нестандартные ситуации без готовых алгоритмов, требующие анализа и адаптации решений	Новизна по каким-либо аспектам, требуется адаптация инструментов, высокий уровень неопределённости, требуется нестандартный подход при ограниченном времени	внезапное увеличение объёмов брака изделий без явных причин или выявление нового типа дефекта, не описанного в нормативной документации
Кросс-уровневая	Ситуации, затрагивающие несколько уровней управления (продукт, процесс, система)	Связаны с несколькими уровнями управления, имеют многофакторную структуру, требуют изменения механизмов согласования между уровнями	вынужденная остановка производства из-за системного дефекта в продукции требует пересмотра материалов

Рассмотрим схему, визуализирующую ситуации разных типов во взаимоотношении с различными уровнями управления (см. рисунок 1.2).

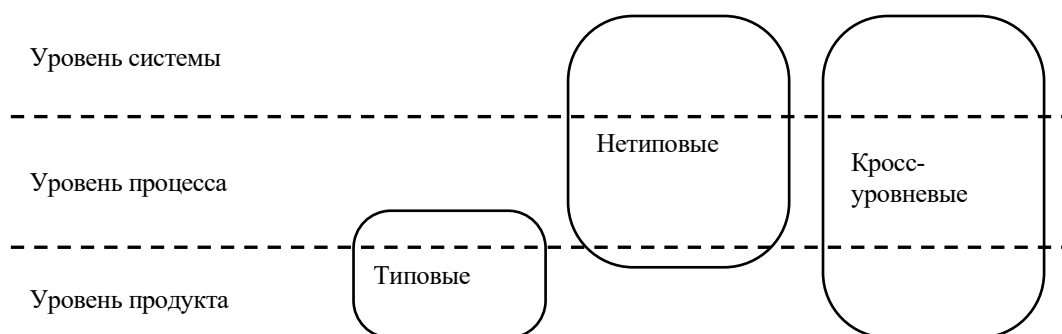


Рисунок 1.2 – Визуализация ситуаций во взаимосвязи с уровнями управления

Типовые ситуации больше характерны для уровня продукта, реже происходят на уровне процесса. Нетиповые более характерны для уровней системы и процесса и достаточно редки на уровне продукта. Кросс-уровневые охватывают все уровни и поэтому наблюдаются на всех уровнях управления (аудит качества [94, 133]).

Нечёткость границ между ситуациями ведёт к тому, что при небольшом изменении обстоятельств ситуация может изменить свой тип. Например, типовая

ситуация – тип дефекта «ошибка исполнителя» может стать нетиповой, если ошибка вызвана внутренними факторами процесса: мало времени на операцию или неудобный инструмент.

В таблице 1.4 показаны свойства для определения типа ситуации.

Таблица 1.4 Классификация ситуаций принятия решений в сфере обеспечения качества

Тип ситуации	Количество затронутых уровней	Степень неопределённости данных	Необходимость адаптации методов	Временные ограничения	Ресурсная обеспеченность
Типовая	Один уровень	Низкая	Нет	Жёсткие	Высокая
Нетиповая	Один уровень	Высокая	Полная	Умеренные	Средняя
Кросс-уровневая	Два или три уровня	Средняя или высокая	Частичная или полная	Гибкие	Низкая

В зависимости от временного характера выделяют два типа ситуаций:

– реактивные, возникающие как следствие уже произошедшего события (принятие решения по дефекту);

– проактивные, связанные с потенциальным событием, которое может произойти в будущем, и задачей ЛПР является его либо предотвратить, либо спровоцировать (предотвращение отказа оборудования).

Данные различия влияют на выбор стратегии анализа: в реактивной ситуации основной целью является точная и объяснимая диагностика, в проактивной – прогнозирование и управление рисками.

В рамках анализа видов ситуаций в сфере обеспечения качества проведён анализ известных из стандартов и практики примеров ситуаций. Примеры таких ситуаций, требующих принятия решений при обеспечении качества на предприятии, показаны в приложении А.

1.1.3 Анализ проблем существующих подходов при обеспечении качества

Сложность обеспечения качества на промышленных предприятиях во многом обусловлена дисбалансом между формализованными и эвристическими подходами на разных уровнях управления [234].

Ограничения традиционных подходов к обеспечению качества [22, 66, 138, 151, 198, 254], представлены в таблице 1.5:

Таблица 1.5 Ограничения традиционных подходов к обеспечению качества

Ограничение	Описание	Последствия
Субъективность	Зависимость от компетенций контролёра	Ошибки в оценке качества, пропуск дефектов
Неполный охват	Невозможность проверить каждый элемент	Риск пропуска скрытых дефектов
Снижение скорости производства	Проверка требует остановки процесса	Увеличение времени производства, снижение производительности
Высокие затраты	Контроль не добавляет ценности, но требует ресурсов	Рост себестоимости продукции
Реактивный подход	Действия начинаются только после выявления дефектов	Задержки в устранении проблем, рост затрат на исправление

Решить проблемы традиционных подходов был призван менеджмент качества (стандарты серии ИСО 9000), который отчасти закрепил разделение методов управления качеством по уровням (продукт, процесс, система). Но чёткого разделения этих уровней в нём не предлагается, нет категоризации инструментов обеспечения качества по этим уровням. Более того, механизмы, предложенные стандартами серии ИСО 9000, становятся неэффективными в условиях активной цифровизации и появления новых методов обработки информации [158, 251].

Выяснилось, что внедрение систем менеджмента качества по стандартам ИСО серии 9000 часто увеличивает бюрократию, не всегда повышая эффективность управления, что отчасти подтверждается трендом снижения втрое за 5 лет числа сертифицированных в РФ СМК по ГОСТ Р ИСО 9001, показанным на рисунке 1.3.

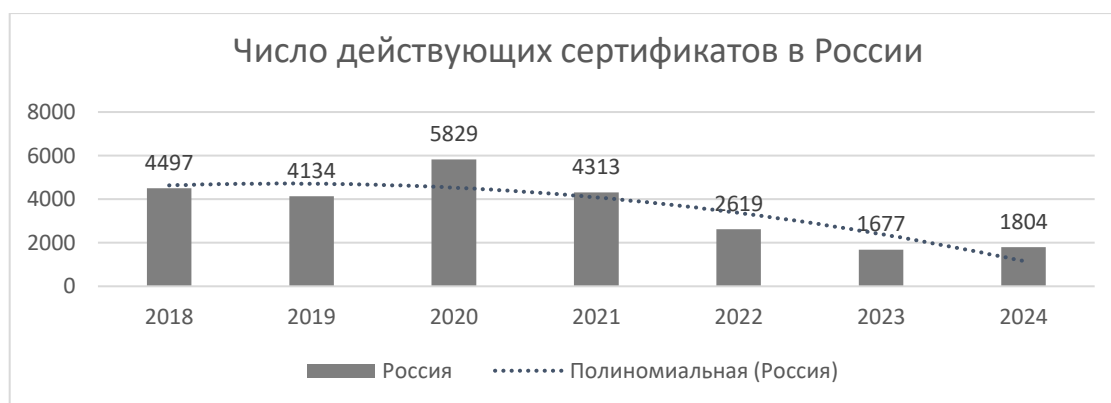


Рисунок 1.3 – Тренды изменения числа действующих сертификатов соответствия СМК требованиям стандартов ИСО 9001 в мире и в России

Данные для рис. 1.3 взяты из отчётов ISO Survey за 2022 – 2024 г.г., переведённых и опубликованных на сайте ООО «Интерсертифика» [233] и сайте РИА «Стандарты и качество» [42].

Сложность принятия решений возрастает из-за различных подходов к управлению на уровнях продукта, процесса и системы. Интеграция всех уровней требует многостороннего подхода, который учитывал бы их специфику, поэтому возникает необходимость разработки адаптивных инструментов для поддержки принятия решений в области качества.

Следовательно, несистемное использование технического контроля, менеджмента качества и экспертных оценок создаёт «информационные разрывы». Данные нормативного контроля не преобразуются в стратегические знания, а компетенции персонала ограничены, что мешает охватить полный цикл «данные-анализ-действие», что в итоге снижает эффективность управления и усиливает риски запаздывания при решении кросс-уровневых проблем (см. рисунок 1.4).

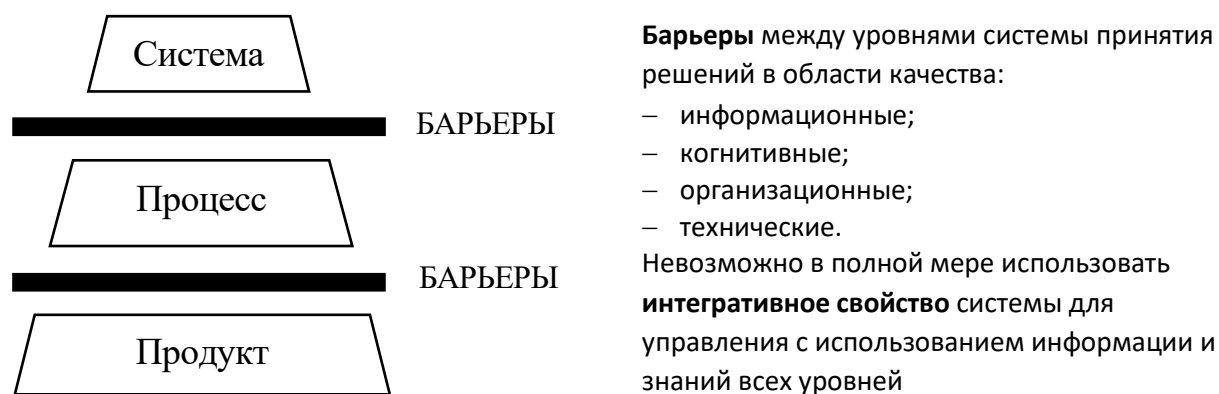


Рисунок 1.4 – Проблема информационных разрывов в системе управления при обеспечении качества на промышленном предприятии

В результате информационных (кросс-уровневых) разрывов система управления предприятием в той части, которая касается обеспечения качества не может в полной мере использовать свои эмерджентные свойства, поскольку уровни управления функционируют замкнуто, оторваны от других.

Обобщая эти недостатки можно сформулировать единую проблему: традиционные подходы плохо справляются с нетиповыми и кросс-уровневыми ситуациями, которые становятся всё более частыми в условиях быстро меняющейся внешней среды и роста сложности производственных систем.

С позиций системного подхода у проблемы недостаточной эффективности существующих подходов к обеспечению качества выделим следующие причины:

1. Отсутствие интеграции между уровнями управления

Ключевой проблемой является несогласованность решений между уровнями. Например, сокращение бюджета на уровне системы может снизить качество продукта из-за недостатка ресурсов для контроля. Необходим интегральный подход для учёта взаимосвязи уровней и уменьшения системных противоречий.

Взаимовлияние уровней принятия решений в сфере обеспечения качества создаёт риски, обусловленные несогласованностью решений, недостатком интеграции данных и отсутствием системного подхода. Обобщённо взаимовлияние уровней и связанные с этим риски показаны в таблице 1.6.

Таблица 1.6 Взаимовлияние уровней и оценки рисков

Уровень	Влияние на другие уровни	Риски
Продукт	На процесс: изменение технологических параметров для устранения дефектов; на систему: необходимость пересмотра бюджета на контроль качества	Рост затрат, задержки в производстве
Процесс	На продукт: внедрение новых методов контроля, влияющих на качество продукции; на систему: корректировка стратегических планов из-за изменений в процессах	Несоответствие продукции стандартам, снижение качества
Система	На продукт: утверждение бюджета на модернизацию оборудования, влияющее на качество; на процесс: изменение производственных процессов из-за новых стратегических приоритетов	Неэффективное использование ресурсов, снижение рентабельности

Отсутствие учёта этих взаимосвязей приводит к неэффективному управлению, потерям ресурсов и увеличению числа ошибочных решений. Например, дефект на уровне продукта может потребовать изменений на уровне процесса, что, в свою очередь, вызовет необходимость корректировки стратегических целей предприятия.

2. Фрагментация данных и форматов хранения информации

Управление промышленным предприятием требует сбора и обработки больших объёмов данных на разных уровнях. Верхние уровни содержат метамодель предприятия (бизнес-процессы, ресурсы, стратегии, культура). Функциональные уровни охватывают БП, ситуации и алгоритмы решений. Нижние уровни содержат документы, данные и ресурсы, которые оцениваются с помощью статистических и интеллектуальных методов [209].

Управление реализуется через информацию, поэтому информационные разрывы являются одним из основных признаков кросс-уровневых разрывов между уровнями управления. Причины информационных разрывов показаны в таблице 1.7.

Таблица 1.7 Причины и непосредственные последствия кросс-уровневых информационных разрывов

Причина разрыва	Описание	Системное последствие
Отсутствие единой системы сбора данных	Данные собираются и обрабатываются независимо на каждом уровне	Неполная картина состояния качества, несогласованность решений, риск ошибок
Несовместимость представления данных и семантическая несогласованность при преобразовании между форматами	Данные выражены в разных семантических моделях: от неформализованных описаний до структурированных онтологий	Потеря контекста, снижение объяснимости решений, низкая согласованность действий между уровнями управления
Недостаточная координация между подразделениями	Отсутствие чётких процессов обмена информацией между отделами	Стратегические решения принимаются без учёта реальных проблем, снижается эффективность межфункционального взаимодействия
Низкая степень автоматизации кросс-уровневого обмена данными	Передача информации осуществляется вручную или через полуавтоматизированные процессы	Задержки в принятии решений, высокая вероятность потери данных, снижение точности анализа

Информационные разрывы вызывают несогласованность решений, увеличивают затраты и снижают качество продукции. Системные последствия на уровне предприятия показаны в таблице 1.8.

Таблица 1.8 Системные последствия кросс-уровневых информационных разрывов на уровне предприятия

Последствие	Описание	Пример
Задержки в принятии решений	Несогласованность уровней управления замедляет стратегические решения и снижает адаптивность	Данные о браке с производства долго доходят до руководства
Повышенные операционные затраты	Отсутствие интеграции ведёт к дублированию, ручному сбору данных и перерасходу ресурсов	Повторяющиеся дефекты из-за отсутствия обмена данными между цехами
Снижение качества продукции	Недостаток или задержка данных приводит к пропуску дефектов и нарушению целостности управления	Брак не учитывается при планировании, синергия уходит

Информационные разрывы приводят к снижению устойчивости, синергетического эффекта, целостности и адаптивности системы. Данные проблемы указывают на необходимость интеграции данных и создания единой системы сбора и анализа информации.

3. Необходимость системного подхода и комплексной методологии

Учитывая вышеизложенное, становится очевидной необходимость развития системного подхода, позволяющего:

- интегрировать данные с уровней управления (продукт, процесс, система);
- адаптироваться к изменениям внешней среды и внутренним условиям;
- обеспечивать объяснимость и последовательность принимаемых решений.

Традиционные подходы рассматривают уровни изолированно и не дают необходимой интеграции данных [128, 211, 221]. Большую проблему составляет управление нетиповыми ситуациями, требующее адаптивности и интеграции знаний с разных уровней. Также осложнён сбор данных, если требуется не только решение, но и анализ последствий на уровне процесса и системы. Часто данную информацию необходимо получить оперативно, в темпе производства.

Кросс-уровневые разрывы усиливают неопределённость и риски в многоуровневых системах. Организационные системы имеют стохастичный характер из-за человеческого фактора [240]. Для снижения рисков необходимы интегральные подходы [15, 33, 73, 143, 147, 160, 207, 237, 261]. В данной работе акцент делается на дискретные производства.

Идентификаторами проблем могут служить показатели функционирования БП: дефекты, сбои, срывы сроков, жалобы клиентов, указания надзорных органов и другие. В кросс-уровневых ситуациях эти показатели взаимосвязаны, что требует их комплексного анализа для выявления причин.

Системный подход при обеспечении качества позволяет использовать данные с одного уровня управления для корректировки решений на другом (адаптивность), объединять разрозненные методы в единый контур (устойчивость) и согласовывать действия между продуктом, процессом и системой (синергия).

Выявлено три системных барьера, не преодолеваемых традиционными подходами: несогласованность решений между уровнями, информационные разрывы и отсутствие адаптивных механизмов для нетиповых и кросс-уровневых ситуаций. Преодоление этих барьеров требует не столько автоматизации существующих процедур, сколько методологии, обеспечивающей сквозную интеграцию данных и единую семантику на всех уровнях управления.

1.1.4 Категоризация проблем для различных ситуаций и уровней управления

Выше рассмотрено несколько проблем и их связи с разными типами ситуаций на разных уровнях управления. Их формальное описание в виде множества затрудняет понимание и дальнейший анализ. Для систематизации проблемы сгруппированы по двум основаниям: типу ситуации (типовая, нетиповая, кросс-

уровневая) и характеру управления – корректирующие (реактивные) и предупреждающие (проактивные) действия, согласно классификации по ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Соответствие ситуаций, уровней управления и возникающих проблем показано в таблице 1.9.

Таблица 1.9 Категоризация проблем

№	Ситуация	Уровни управления	Пример	Проблема	Общая проблема
Корректирующие действия (реактивное управление)					
1	Типовая	Уровень продукта	Дефект идентифицирован как ошибка исполнителя	Отсутствие гибкости в применении типовых решений при изменяющихся условиях; отсутствует механизм анализа повторяемости ошибок (отслеживание цифрового следа)	Актуализация данных/моделей
2	Нетиповая	Уровень продукта	Дефект идентифицирован как поломка инструмента	Исключение субъективного фактора при выборе причины поломки; сложности с интерпретацией нестандартной ситуации без четкой модели знаний	Неполные, недостоверные данные
3	Нетиповая кросс-уровневая	Продукт + Процесс	Дефект идентифицирован как поломка оборудования	Согласование мнений экспертов разных уровней и сфер деятельности; отсутствие единой онтологии для согласованного анализа причин и последствий	Согласование мнений экспертов и ЛПР
4	Нетиповая кросс-уровневая	Продукт + Процесс + Система	Дефект идентифицирован как окончательный выход из строя дорогого оборудования	Сложность объяснения руководству причин аварии; необходимость прогнозирования подобных событий на основе исторических данных (цифрового следа); дезорганизация БП из-за межуровневых противоречий	Объяснимость решений / Согласование мнений экспертов и ЛПР
Предупреждающие действия (проактивное управление)					
1	Типовая	Уровень продукта	Предсказание дефектов на основе исторических данных	Недостаточная точность прогноза из-за устаревших или неполных данных; необходимость пополнения цифрового следа	Неполные, недостоверные данные
2	Нетиповая	Уровень процесса	Оценка риска внедрения нового оборудования	Недостаток опыта в аналогичных ситуациях; сложность моделирования неопределённости	Неполные, недостоверные данные
3	Нетиповая кросс-уровневая	Продукт + Процесс	Прогнозирование влияния изменения параметров производства на качество продукции	Несо согласованность моделей на разных уровнях; отсутствие общей методики оценки воздействия изменений	Согласование мнений экспертов и ЛПР
4	Нетиповая кросс-уровневая	Процесс + Система	Прогнозирование нагрузки на систему качества при увеличении объема производства	Недостаточная адаптивность показателей системы качества к масштабированию; необходимость динамической актуализации метрик	Актуализация данных/моделей
5	Нетиповая кросс-уровневая	Продукт + Процесс + Система	Требуются инвестиции для развития бренда продукции с акцентом на качество	Отсутствие четкой модели оценки влияния качества на рыночные показатели; сложность согласования стратегий между уровнями управления; недостаток данных о долгосрочных эффектах от инвестиций в качество	Согласование мнений экспертов и ЛПР / Неполные, недостоверные данные

В таблице 1.9 проблемы, возникающие в различных ситуациях, сгруппированы на 4 категории:

1. Согласование мнений экспертов и ЛПР разных уровней управления

Проблема возникает при необходимости принятия согласованного решения в условиях разногласий или непонимания между экспертами разных уровней управления. На уровне продукта могут быть свои интерпретации дефектов, на уровне процесса требуется учитывать особенности диагностики оборудования, понимания конструкции изделий, технологического процесса и т.д., а на уровне системы – нормативные, политические, экономические требования или стратегические цели.

В нетиповых и кросс-уровневых ситуациях отсутствует единая терминология, а шкалы и критерии оценки различаются – одна из причин информационных разрывов (см. табл. 1.7). Как итог – дублирование действий, задержки и ошибки (см. табл. 1.8). Устранение подобных эффектов требует онтологической модели и двустороннего согласования знаний между уровнями управления.

2. Неполные, недостоверные или некорректные данные

Неполнота, устаревание и противоречивость данных о параметрах продукции, процессов или системы (см. табл. 1.7) обусловлены отсутствием регламентов сбора в нетиповых ситуациях и распределённостью данных между разными системами и форматами в кросс-уровневых случаях. Недостаток достоверных данных снижает точность прогнозов, увеличивает неопределённость при выборе решения и повышает риск человеческой ошибки. Для типовых ситуаций это может выражаться в устаревших правилах вывода, а для нетиповых – в отсутствии достаточной статистики для обучения ИИ-моделей. Необходимы методы обработки нечёткой информации, интеграции данных и автоматического пополнения знаний через цифровой след [227].

3. Недостаточная объяснимость решений

Решения, принимаемые СППР, особенно на основе сложных моделей искусственного интеллекта, часто оказываются недоступны для понимания ЛПР, что снижает доверие к системе, особенно в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях, где требуется объяснить руководству причины аварии, отказа или изменения технологии, инвестиций в дорогостоящие системы. Проблема усложняется тем, что на разных уровнях управления (продукт, процесс, система) требуются разные уровни детализации и формы представления вывода: от технической интерпретации на

уровне процесса до стратегического обоснования на уровне системы. Решение требует разработки методов визуализации ПСС, генерации текстовых отчётов и использования лингвистических переменных для повышения интерпретируемости.

4. Необходимость актуализации данных / моделей

Модели знаний, используемые в СППР, со временем устаревают из-за изменений в нормативной базе, технологиях, оборудовании и персонале, что особенно критично в условиях динамичной внешней среды, когда требуется оперативное обновление правил, функций принадлежности, весовых коэффициентов и самой структуры онтологической модели. Проблема особенно заметна в кросс-уровневых и нетиповых ситуациях, где стандартные процедуры обновления не работают. Требуется внедрение механизмов самообучения, основанных на цифровом следе, и двунаправленного преобразования между онтологиями и нормативными документами, чтобы поддерживать соответствие реальным условиям и требованиям документооборота (ДО).

Проведём обзор методов, пригодных для решения выявленных проблем.

1.2 Анализ инструментов для решения выявленных проблем

1.2.1 Анализ методов принятия решений для решения задач

Выявленные проблемы (см. таблицу 1.9) требуют методов, адаптивных к типу ситуации и уровню управления. В научной литературе приведено множество методов и подходов к управлению производственными системами (см. например [79, 84, 127, 162, 166, 168] и многие другие). Однако высокая степень неопределённости процессов делают многие традиционные методы недостаточно эффективными. Для успешного решения задач принятия решений в предметной области необходимо учитывать, и типовые, и нетиповые, и кросс-уровневые ситуации, требующие интеграции данных с разных уровней управления.

Рассмотрим различные классы современных методов.

1. Методы сбора информации:

На сегодняшний день кроме классических методов, таких как интервью, наблюдение, эксперимент и экспертиза [171], большую популярность приобрели

методы автоматического парсинга информации [53], позволяющие получать информацию из текстового документа, видеоряда или веб-страницы.

2. Методы анализа данных

Такие методы, как одномерный анализ [159], многомерный факторный анализ [185], кластерный анализ [236] предназначены для упрощения данных, выявления их структуры и зависимостей и ограничены недостаточной точностью, сложностью интерпретации и чувствительностью к качеству исходных данных.

3. Методы принятия решений

Делятся на три классических типа:

- Количественные методы: максимаксное, максиминное, минимаксное решения [223], правила с учётом вероятностей [216].
- Неформальные методы: эвристические подходы [193].
- Коллективные методы: экспертные оценки [32].

Служат для оптимизации выбора вариантов и характеризуются разнообразием подходов и степенью формализации. Ограничены недостатком информации, неопределённостью внешней среды, субъективизмом оценок экспертов и ограниченными вычислительными возможностями.

4. Методы прогнозирования (наиболее популярные представители):

Рассмотрим три категории:

- Качественные методы: экспертные методы [32], прогнозирование по аналогии, морфологический анализ, мозговой штурм [115].
- Количественные методы: дерево решений, линейная регрессия, метод скользящей средней [115].
- Гибридные методы: машинное обучение и нейронные сети [12, 222], нечёткая логика [49, 105], генетические алгоритмы [58], экспертные системы [26], методы на основе нечётких лингвистических переменных [105], гибридные ИИ-подходы [43].

Методы прогнозирования служат для предвидения будущего состояния системы. Они характеризуются использованием исторической информации и математических моделей. Ограничены неопределённостью внешних условий и качеством исходных данных. Анализ таких методов приведён в §1.2.3.

Ещё одним из подходов к классификации методов принятия решений является их разделение на эвристические и математические.

Эвристические методы основаны на интуиции и опыте специалистов, что делает их гибкими, но менее формализованными и, соответственно, точными.

Математические методы включают [99]: аналитические, формирующие зависимости между условиями и результатами; статистические, использующие данные реальных экспериментов или моделирования; методы математического планирования, оптимизирующие распределение ресурсов, а также теоретико-игровые, используемые в неопределённых ситуациях, подходящих под определение той или иной игры в теории игр [46, 124].

Современные методы принятия решений при обеспечении качества сталкиваются с рядом ограничений. Ключевыми проблемами являются слабая интеграция данных между уровнями управления (продукт, процесс, система), что затрудняет решение кросс-уровневых задач, ограниченная адаптивность традиционных подходов, таких как экспертные оценки или одномерный анализ, непригодных для нетиповых ситуаций. Субъективность и зависимость от квалификации экспертов снижают надёжность таких методов в условиях неопределённости. Важным недостатком перечисленных методов является их **узость**, т.е. применение их для решения конкретного класса задач.

1.2.2 Анализ методов принятия решений, связанных с обеспечением качества

В современных условиях обеспечения качества традиционные методы часто достигают своих пределов, особенно в ситуациях высокой неопределённости и сложности [131, 132, 135]. Рассмотрим эти подходы:

– Цикл PDCA (Деминга) [211] предлагает общие принципы непрерывного улучшения на основе циклического процесса, включающего этапы: Plan (планирование), Do (выполнение), Check (проверка), Act (корректировка). Применяется при обеспечении качества на предприятии, улучшении БП, внедрение систем менеджмента качества.

– Квалиметрия представляет собой методологию, позволяющую оценивать сложные объекты с помощью количественных показателей, но её эффективность во многом зависит от наличия и надёжности исторических данных [91].

– Нормативный подход [128] строится на сравнении объекта с эталоном, определённым в нормативной документации.

– Анализ рисков основан на идентификации, оценке и управлении рисками, используя эвристические методы. Ограничен субъективностью оценок, полнотой информации об угрозах, трудностью точной оценки последствий риска и требованием постоянного обновления данных для поддержания актуальности выводов [136, 183].

Обобщённо данные методы показаны в таблице 1.10.

Таблица 1.10 Сравнение методов поддержки принятию решений

Подход	Особенности	Область применения	Достоинства	Недостатки
Нормативный	Сравнение с эталоном из стандарта	Испытания, аудит, контроль качества	Простота, чёткость критериев	Ограниченность в новых ситуациях, затратность для сложных объектов
Цикл PDCA	Циклический процесс: Plan-Do-Check-Act	Управление качеством, оптимизация процессов	Универсальность, простота, ориентация на улучшение	Отсутствие конкретных инструментов, необходимость адаптации
Квалиметрия	Количественная оценка через квалиметрические показатели	Оценка сложных систем, сравнение решений	Объективность, возможность оценки сложных объектов	Зависимость от данных, субъективность в выборе критериев
Анализ рисков	Идентификация, оценка и управление рисками [34]	Управление проектами, инвестиции, качество	Учёт неопределённости, прогнозирование рисков	Субъективность, ресурсоёмкость, ограниченность в динамичных условиях

Традиционные методы не справляются с неполными или неструктурированными данными, что ограничивает их применение в нетиповых и кросс-уровневых задачах. Адаптивные подходы более эффективны в динамичных условиях за счёт использования гибких методов анализа и вывода. Машинное обучение обеспечивает автоматическое обнаружение скрытых закономерностей, нечёткая логика – интерпретацию качественных оценок и работу с неопределённостью, а экспертные системы – формализацию знаний и интеграцию в нормативную базу [26, 32].

1.2.3 Анализ адаптивных интеллектуальных методов принятия решений

Для обеспечения качества на промышленных предприятиях применяется несколько классов интеллектуальных методов поддержки принятия решений [2, 13, 29, 156]. Каждый из них имеет свои достоинства, ограничения и область применения. Выбор метода зависит от типа ситуации и уровня неопределённости (см. таблицу 1.11).

Таблица 1.11 Интеллектуальные методы поддержки принятия решений

Класс методов	Представители	Достоинства	Недостатки
Прецедентные методы (CBR)	Case-Based Reasoning [1, 9, 118], модель CASE [142], онтологическая интеграция [63]	Высокая объяснимость, воспроизводимость решений, применимость к типовым ситуациям	Зависит от полноты базы прецедентов, ограниченная гибкость в нетиповых случаях
Методы машинного обучения	Деревья решений, SVM, ансамблирование [19, 247],	Высокая точность прогноза, способность обрабатывать большие данные, автоматизация вывода	Требует больших данных и экспертов по настройке, сложен в интерпретации, уязвим к дрейфу данных
Нейронные сети	Нейросети [24, 37, 47, 222], адаптивное обучение [71, 86]	Высокая адаптивность, способность к сложному моделированию, обработка неструктурированных данных	Требует больших вычислительных ресурсов, "чёрный ящик", риск переобучения
Методы нечёткой логики	Нечёткие множества [и лингвистические переменные [3, 23, 57, 83]	Работает с качественными и недостоверными данными, обеспечивает гибкость и частичную автоматизацию	Сложна в формализации правил, требует настройки функций принадлежности, менее точна в типовых ситуациях
Генетические алгоритмы	Эволюционные алгоритмы, генетическое программирование [222]	Гибкость, глобальный поиск решений, применимость к оптимизации сложных систем	Высокие вычислительные затраты, медленная сходимость, нет гарантии оптимальности
Байесовские сети	Вероятностные графические модели, байесовский вывод [16]	Учёт неопределённости, интерпретируемость, сочетание экспертных знаний и данных	Сложность при большом числе переменных, требует априорных вероятностей

Проанализируем применимость этих методов в классической форме для решения поставленных задач, специфичных для принятия решений в кросс-уровневых и нетипичных ситуациях (см. таблицу 1.12).

Таблица 1.12 Сопоставление и оценка соответствия методов и проблем

Метод	Согласование мнений экспертов и ЛПР	Неполные / недостоверные данные	Недостаточная объяснимость	Актуализация данных/моделей
Прецедентные методы (CBR)	Хорошо (онтологии и аналогии)	Средне (зависит от базы прецедентов)	Хорошо (объяснимость на примерах)	Плохо (требует ручного обновления)
Методы машинного обучения	Плохо (чёрный ящик)	Средне (требует достоверных данных)	Плохо (сложная интерпретация)	Средне (нужны механизмы дообучения)
Нейронные сети	Плохо (нет прозрачности)	Средне (устойчивы к шуму, но нужны данные)	Плохо (чёрный ящик)	Средне (адаптивное обучение возможно)
Нечёткая логика	Хорошо (лингвистические правила)	Хорошо (работает с неопределённостью)	Хорошо (понятные правила)	Средне (настройка функций вручную)

Метод	Согласование мнений экспертов и ЛПР	Неполные / недостоверные данные	Недостаточная объяснимость	Актуализация данных/моделей
Генетические алгоритмы	Средне (оптимизация без объяснений)	Средне (глобальный поиск, но медленно)	Плохо (нет интерпретации)	Средне (может адаптировать параметры)
Байесовские сети	Хорошо (учёт экспертных знаний)	Хорошо (вероятностный подход)	Средне (частичная интерпретируемость зависимостей)	Плохо (требуется пересчёта вероятностей при изменениях)

Ни один из рассмотренных методов не способен полностью решить все ключевые проблемы поддержки принятия решений в сфере обеспечения качества, особенно для специфики кросс-уровневых и нетипичных ситуаций. Каждый имеет свои сильные стороны, но и существенные ограничения, что делает их применимыми лишь для узкого круга задач. Для совмещения достоинств нескольких методов необходим гибридный метод.

1.2.4 Анализ структурно-ситуационного, онтологического и ситуационно-онтологического подходов к управлению бизнес-процессами на промышленных предприятиях

1. Структурно-ситуационный подход как основа системного управления

Процессы принятия решений тесно связаны с понятиями «ситуационное моделирование» [92] и «управленческая ситуация» [122]. Управленческая ситуация рассматривается как совокупность состояний и взаимосвязей компонентов предприятия, таких как функции, ресурсы, правила и связанные объекты.

Сформировавшийся в конце XX века структурно-ситуационный подход стал ответом на ограничения адаптивных методов управления [107, 207, 220, 260, 261] и др. Ключевые особенности метода:

- интеграция структурно-семантического моделирования и системного анализа обеспечивает понимание динамики сложных систем [100, 148, 170, 230];
- схема «вход–состояние–выход» позволяет прогнозировать поведение системы в различных условиях [174, 195];
- иерархическое ситуационное моделирование даёт возможность учитывать микро- и макро-состояния системы [260].

Однако подход не был лишён существенных ограничений:

- сложность практического применения из-за громоздкости моделей;
- отсутствие инструментов для оперативного принятия решений;
- недостаточная формализация знаний о системе.

2. Онтологический подход к формализации знаний для принятия решений

Развитие онтологического моделирования [63] позволило перейти к более структурированному представлению знаний о БП. Основные достижения: экспериентологический подход [253], предполагающий использование онтологий для моделирования предприятия и формализация правил и опыта для поддержки принятия сложных решений, требующих учёта множества факторов.

Ранние онтологические модели не учитывали динамическую природу БП, оставаясь в рамках статического представления и лучше подходили для процессов, в которых оперативная составляющая либо отсутствует, либо имеет малую важность [113]. Онтологии обеспечивают формальную семантику, необходимую для интеграции с интеллектуальными системами.

Описанные методологии имеют недостатки [218]:

- недостаточно раскрыты особенности отношений структурно-ситуационной части модели БП предприятия с параметрическими (вычислительными) методами, применяющимися для выбора релевантного решения в точке принятия решения, т.е. выбор сценария решения;
- комплексное моделирование предметной области для построения СППР обычно не сопровождается созданием методики оценки последствий, которые влекут за собой принимаемые решения;
- большая номенклатура и разнообразие подходов и методов разработки СППР создают известные трудности при проектировании реальных систем;
- проработка методов подбора интеллектуальных методов для поддержки принятия решений недостаточна;
- слабо учитываются особенности нетиповых и кросс-уровневых ситуаций;
- недостаточно ориентированы на интеграцию управления на уровнях продукт, процесс и система.

3. Многоагентный онтологический подход

Идея объединения ситуационного и онтологического подходов впервые была предложена П.О. Скобелевым [231, 232]. В его работах ситуационное управление предприятием предполагает принятие решений в режиме реального времени на основе общей картины происходящих процессов, т.е. впервые предложено объединить ситуационный и онтологический подходы в виде трёхуровневой структуры: онтология описывает общий терминологический словарь отрасли, модель предприятия фиксирует стабильные элементы организации (организационная структура, инфраструктура), а сцена отражает конкретные факты и события текущего момента, характеризуя ситуацию параметрами.

Однако его работы, ориентированные на стратегическое планирование, не затрагивали нижний, операционный уровень управления, что ограничивало их применение в реальных БП.

Эволюция подходов к управлению БП прошла путь от структурно-ситуационного анализа через онтологическую формализацию к ситуационно-онтологическому синтезу. Хотя идея интеграции была предложена Скобелевым, её полноценная реализация возможна только при учёте операционного уровня управления, что открывает новые возможности для промышленных предприятий.

Ситуационный подход обеспечивает анализ текущих ситуаций и предлагает решения для типовых (по шаблонам) и нетиповых случаев (с адаптацией), например, при выявлении дефектов. Онтологическое моделирование формализует знания о ситуациях, обеспечивая понимание их влияния на уровни управления (продукт, процесс, система). Объединение ситуационного и онтологического подходов создаёт общий контур: первый определяет тип реакции, а второй реализует аналитическую основу для выбора. Как следует из табл. 1.13, СОП – единственный подход, работающий во всех трёх типах ситуаций.

Таблица 1.13 Сравнение СОП с существующими подходами

Подход	Типовая ситуация	Нетиповая ситуация	Кросс-уровневая ситуация
Нормативный	Да	Нет	Нет
Структурный	Да	Нет	Частично
Ситуационный	Частично	Да	Да
Онтологический	Да	Частично	Да
Ситуационно-онтологический	Да	Да	Да

Для применения разработанной методологии требуется инструментарий – СППР. Её разработка должна учитывать специфику предметной области, описанную в §1.1, и обеспечивать интеграцию ситуационного и онтологического подходов. Наиболее распространёнными технологиями, используемыми в СППР для анализа и формирования вариантов решений, являются следующие [124, 239]: информационный поиск, интеллектуальный анализ данных, поиск знаний в базах данных, рассуждение на основе прецедентов, когнитивное моделирование, основанное на распознавании образов [7, 146, 200] и др.

1.3 Постановка задачи исследования

1.3.1 Методологическое обоснование постановки задач

Анализ проблем в сфере обеспечения качества и инструментария для этого позволяет предложить основные шаги научного исследования:

1. Для решения актуальных задач по обеспечению качества в промышленности требуется новый СОП, который учтёт специфику реальных производственных условий и обеспечит согласованность действий на уровнях продукта, процесса и системы (§1.3.2 и глава 2).

2. Методы проектирования адаптивных инструментов СППР решают две задачи: выбор ИИ-алгоритма по типу ситуации и динамическую адаптацию модели – корректировку параметров и актуализацию данных при изменении условий (§1.3.3 и глава 3).

3. Для практической реализации СОП необходима методология ИППР. Она обеспечивает объяснимость выводов и снижает субъективизм экспертов. Её ядром является теоретико-множественная модель (ТММ), обеспечивающая воспроизводимость выбора (§1.3.4 и глава 4: §§4.1 – 4.4).

4. Комплексный метод интеграции СОП-моделей в БП и ДО предприятия нацелен на устранение противоречий между онтологиями, нормативами и документацией, обеспечивая практическую внедряемость СОП (§1.3.5 и глава 5).

5. Методика оценки эффективности СППР служит для объективной оценки решений и актуализации знаний через цифровой след и обратную связь, позволяя системе самообучаться и повышать точность (§1.3.6 и глава 4: §4.5).

Проведём анализ связи между основными категориями проблем и предложенными задачами (см. таблицу 1.14).

Таблица 1.14 Связь с проблемой задач научного исследования

№	Категория проблемы	Задачи	Пояснения
1	Согласование мнений экспертов (разные термины, критерии, уровни)	Разработать методологию поддержки принятия решений на основе СОП	Единая онтология и ТММ обеспечивают семантическую совместимость экспертных оценок на всех уровнях управления
2	Неполные, недостоверные данные (отсутствие стандартов сбора, распределённость по системам)	Разработать методы проектирования адаптивных инструментов СППР	Выбор ИИ-алгоритма по типу ситуации и нечёткая логика позволяют работать с неполными и противоречивыми данными без потери точности
3	Недостаточная объяснимость решений (ЛПР не понимает логику вывода)	Разработать методологию поддержки принятия решений на основе СОП	Визуализация ПСС, адаптация интерфейсов под уровень управления и текстовое обоснование выводов дают интерпретируемость решений
4	Неактуальность данных и моделей (устаревание нормативов и правил)	Разработать методологию интеграции СОП-моделей в БП предприятия	Двунаправленное преобразование OWL ↔ нормативные документы и цифровой след обеспечивают синхронизацию модели с нормативами и производственными условиями
5	Все четыре проблемы	Разработать методику оценки эффективности методологии ИППР	Нечёткие переменные и комбинация количественных и качественных показателей позволяет измерять прогресс по каждой из четырёх проблем

Рассмотрим краткое теоретическое обоснование задач исследования.

1.3.2 Теоретико-методологические основы СОП к поддержке принятия решений

Проблема комплексного подхода к обеспечению качества на уровнях продукта, процесса и системы – разнородность методов и инструментов, применяемых на каждом из этих уровней. На основе анализа выявлено, что существующие подходы не обеспечивают сквозную интеграцию ситуационного анализа и нормативного базиса. Отсюда необходимость разработки подхода к описанию процесса принятия решений СОП, функционального на всех уровнях [188, 219]. Поэтому требуется интеграция ситуационного анализа (уровни продукта и процесса) с аналитическими методами (уровень системы) [48]. Такую интеграцию возможно реализовать только с использованием интеллектуальных методов обработки информации и поддержки принятия решений.

Функциональная роль характеристик СОП показана в таблице 1.15.

Таблица 1.15 Функциональная роль характеристик СОП

Характеристика	Функциональная роль в СОП
Трёхуровневая структура «ситуация – решение – сценарий» в связке с уровнями БП и предприятия	Обеспечивает системность анализа за счёт последовательной трансляции контекста в действие и исполняемый план
Использование онтологических моделей для формализации знаний о предметной области	Создаёт единое семантическое пространство для интеграции нормативов, практики и данных
Учёт временных и пространственных факторов при описании ситуаций на языке онтологии	Обеспечивает адаптивность модели к динамическим изменениям в производственной среде
Разделение на типовые, нетиповые и кросс-уровневые ситуации	Позволяет дифференцировать методы принятия решений и выбирать адекватный алгоритм для каждой категории
Применение теоретико-множественного аппарата для формализации отношений между компонентами модели	Гарантирует строгую математическую основу и воспроизводимость выводов
Интеграция нормативных документов (правил) в процесс принятия решений	Обеспечивает соответствие выводов СППР требованиям ГОСТ, СТО и другим нормативам
Ориентация на решение практических задач обеспечения качества в промышленности	Обеспечивает практическую применимость и готовность к внедрению в реальные БП

В теоретическую основу СОП положены исследования, выполненные при изучении специфики принятия решений в сфере обеспечения качества в промышленности:

- анализ естественной эволюции познавательных задач в контексте подходов к поддержке принятия решений [104, 164];
- метод применения семантических мер для формирования задачи в процессе принятия решений [98, 108, 181, 182];
- адаптация архитектурной модели Захмана для систем поддержки принятия решений на предприятии [76, 85, 129, 175];
- анализ таксономии различных ресурсов предприятия [41, 97, 162, 167].

На основе системного подхода и современных требований к ИППР выделены следующие принципы СОП (см. таблицу 1.16).

Таблица 1.16 Принципы СОП и их связь с системным подходом

Принцип СОП	Описание	Принцип системного подхода
Иерархичность	Знания и действия организуются по уровням сложности и влияния (продукт, процесс, система)	Иерархичность
Целостность	Требуется учёт всех связей между компонентами системы для обеспечения её устойчивости и согласованности	Целостность
Адаптивность	Модель способна изменять параметры и поведение в зависимости от внешних и внутренних условий	Адаптивность
Строгая формализация	Действия, правила и связи описываются чётко, однозначно и воспроизводимо, что обеспечивает корректность выводов	Формализация / точность

Принцип СОП	Описание	Принцип системного подхода
Практическая направленность	Подход ориентирован на решение реальных задач обеспечения качества в промышленности, включая типовые, нетиповые и кросс-уровневые ситуации	Практическая реализуемость
Объяснимость	Каждое решение снабжено интерпретируемым обоснованием через онтологию, цифровой след и привязку к нормативам	Прозрачность / контролируемость

Принципы легли в основу СОП, представленного в главе 2, в которой разработаны его основные модели и алгоритмы. Они обеспечивают системный подход к моделированию и управлению процессом принятия решений в условиях неопределенности и многокритериальности.

Онтологии выбраны как средство обеспечения семантической интероперабельности, объяснимости и возможности логического вывода. Онтологическое моделирование используется как средство формализации знаний о предметной области и обеспечивает единую терминологию, интерпретируемость и структурированный обмен данными между уровнями управления. Онтологии в работе имеют 4 типа (см. таблицу 1.17).

Таблица 1.17 Типы онтологий, используемые в исследовании

Тип онтологии	Описание	Назначение в работе	Связь с уровнями управления
Онтология предприятия	Модель структуры, процессов и ресурсов организации	Обеспечивает единую основу для интеграции данных и согласованности между подразделениями	Связывает все уровни управления
Онтология ситуации	Формализация контекста принятия решений по модели ситуации	Классифицирует ситуации и инициирует выбор метода решения	Поддерживает адаптацию решений на уровне продукта, процесса и системы
Онтология нормативных документов	Формализованные требования из ГОСТ, СТО, инструкций	Обеспечивает соответствие между документацией и системой	Связывает нормативы с операционными действиями на всех уровнях управления
Онтология ПСС	Модель зависимостей между параметрами, дефектами и решениями	Обеспечивает прозрачность анализа и поддержку объяснимости выводов	Устанавливает кросс-уровневые зависимости между причинами и решениями

В отличие от корпоративных методологий (TOGAF [80], Zachman [76, 85]), СОП впервые интегрирует ситуационный анализ, онтологическое моделирование и ТММ в единую систему, обеспечивающую объяснимость, воспроизводимость и самообучение на основе цифрового следа. Специфика каждой ситуации определяется семантикой её тезауруса – правильным пониманием терминов экспертами и ЛПР

[140]. Новизна заключается в трёхуровневой структуре, адаптированной под динамические условия принятия решений в сфере обеспечения качества.

Формализуем архитектуру модели СОП [96]. На основе подходов к моделированию процессов принятия решений, описанных в ряде публикаций ([95, 162]) определим уровни управления на предприятии. Переход от рассмотренной в [162] (см. рисунок 1.10) пятиуровневой архитектуры предприятия (организационный, функциональный, ситуационный, сценарный, оценочный) к трёхуровневой (ситуация, решение, сценарий) обусловлен переходом от общетеоретических методов исследования к более прикладным, а также целевым сужением фокуса на динамических аспектах принятия решений.

При этом выполняется разделение структурных и процессных уровней:

- уровни предприятия (организационный, функциональный) и точки принятия решений описывают статическую архитектуру системы: роли, процессы, нормативы, т.е. формируют контекст и не генерируют ситуационный компонент, возникающий только в процессе функционирования системы;
- уровни ситуации, решения и сценария отражают динамику управления, где решения принимаются и реализуются.

Оценочный уровень интегрирован в этап анализа результатов сценариев и не выделяется отдельно, а организационный и функциональный уровни рассматриваются как часть нормативного базиса. Логика, полученная при изучении модели этих уровней, отражается в правилах.

Важным методологическим принципом СОП является трёхуровневая модель, устраняющая сложности, связанные с многоуровневой декомпозицией, сохраняя полноту охвата:

- уровень ситуации → входные данные (что произошло?);
- уровень решения → алгоритм выбора (как реагировать?);
- уровень сценария → план действий (как реализовать?).

Трёхуровневая модель задаёт логику принятия решений, абстрагируясь от структурной сложности предприятия, что помогает улучшить работу СППР, позволяя сосредоточиться на ключевых этапах управления, одновременно учитывая

организационные и функциональные особенности через нормы и правила. Рисунок 1.5 показывает связь уровней модели ситуации.

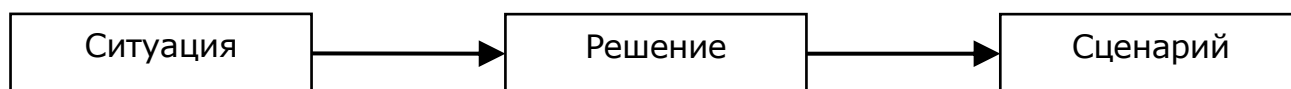


Рисунок 1.5 – Уровни модели ситуации

Рассмотрим трёхуровневую модель решения (см. таблицу 1.18).

Таблица 1.18 Трёхуровневая модель решения

Уровень	Описание	Пример
Ситуации	Характеристика контекста принятия решения, включающая параметры, определяющие предметную область: объем выпуска, важность изделия, история дефектов, доступность ресурсов. Описывается с использованием лингвистических переменных	Классификация партии как высокоприоритетной; выявление аномального роста брака; необходимость срочного контроля после изменения технологии
Решения	Множество допустимых вариантов действий, формализованных как альтернативы, оцениваемые по критериям (риск, стоимость, время), выбор осуществляется автоматически или с участием эксперта	Полный контроль, выборочный контроль (низкой/средней/высокой интенсивности), отбор по критериям важности или истории дефектов
Сценария	Детализация выбранного решения в виде исполняемого плана: последовательность операций, распределение ресурсов, ответственные лица, временные сроки, обеспечивает контроль исполнения и воспроизводимость	При выборочном контроле: отбор 10 образцов, назначение лаборанта, бронирование стенда на 2 часа, срок выполнения – до конца смены

Теоретико-методологическая основа СОП сформирована на принципах системного анализа, онтологического моделирования и ситуационного управления. На их базе в Главе 2 разработан методологический аппарат СОП, в который входят модели, правила и механизмы поддержки принятия решений в условиях неопределённости [142].

1.3.3 Системные принципы проектирования адаптивных инструментов поддержки принятия решений в обеспечении качества

Проектирование адаптивных инструментов СППР в сфере обеспечения качества требует интеграции нескольких теоретических направлений для формирования теоретико-методологической базы задачи и обеспечения возможности создания модульных, самонастраивающихся и кросс-уровневых решений.

Современные архитектурные модели СППР сочетают обработку данных, использование знаний и межуровневую интеграцию [103]. Они опираются на адаптивность как способность динамически подстраиваться под изменения внешней среды, данных и требований пользователей [152, 187, 217]. СППР с адаптивной

архитектурой должна включать подсистемы, функционирующие на базе интеллектуальных методов [95, 150] (см. рисунок 1.6). СППР характеризуются возможностью интеграции новых данных и обучением на опыте (например, в управлении рисками [247]), что обеспечивает адаптацию к изменяющимся условиям.



Рисунок 1.6 – Пример схемы СППР с адаптивной архитектурой

Подход к проектированию адаптивных инструментов СППР основан на интеграции СОП, гибридных ИИ-методов и теоретико-множественного формализма с целью обеспечения автоматической подстройки логики модулей под тип ситуации и уровень управления для повышения объяснимости, согласованности и точности решений в условиях неопределённости и динамичности процессов.

На основе СОП спроектирована трехуровневая архитектура СППР, включающая: уровень ситуации для идентификации текущего состояния и анализа неопределённости, уровень решения для выбора наиболее релевантного алгоритма или правила и уровень сценария для детализации и реализации выбранного действия. В отличие от классических СППР, предложенная трёхуровневая архитектура объединяет ситуационный анализ, онтологическое моделирование и теоретико-множественный формализм, с механизмом самообучения через цифровой след. Научная новизна заключается в методе подбора алгоритма и адаптированном

нечётком выводе, обеспечивающих объяснимость и согласованность в условиях неопределённости.

Для повышения адаптивности система должна обладать следующими свойствами: гибкость, как способность динамически изменять правила и модели без переработки СППР, масштабируемость, связанная с поддержкой добавления новых модулей или обновления существующих, объяснимость, предполагающая использование онтологических моделей и причинно-следственных графов для интерпретации решений, согласованность, как синхронизация данных между уровнями управления через трёхуровневую модель.

Значимость проектирования именно адаптивных СППР в сфере обеспечения качества определяется проблемами, выявленными в предметной области, для решения которых подходит именно данный тип архитектуры (см. таблицу 1.19).

Таблица 1.19 Связь проблем предприятия и адаптивных инструментов

Проблема	Решение на основе адаптивности инструментов (модулей СППР)	Метод проектирования адаптивных инструментов
Согласование мнений экспертов	Использование модуля группового принятия решений, реализующего адаптивные методы согласования мнений	Разработка метода подбора алгоритма принятия решений для ситуации, позволяющего выбрать способ согласования мнений на основе контекста
Неполные, недостоверные данные	Применение нечётко-логических моделей или вероятностных подходов для обработки неполной и неточной информации	Разработка адаптированного метода нечёткого вывода, обеспечивающего гибкую обработку данных с учетом неопределенности
Объяснимость решений	Внедрение прозрачных механизмов принятия решений и интерфейсов объяснения логики вывода	Разработка интеллектуальной подсистемы обработки данных с механизмами интерпретации и визуализации решений
Актуализация данных / моделей	Интеграция модулей динамического обновления данных и перенастройки моделей	Реализация модульной архитектуры СППР, которая обеспечивает гибкость и возможность быстрого обновления компонентов системы

В отличие от классических методов разработки СППР и архитектур их модулей [55, 217] в данном подходе используются гибридные ИИ-методы (например, нечёткая логика и машинное обучение), которые позволяют эффективно работать с разнородными данными и сложными взаимосвязями. Адаптивность также обеспечивается механизмами самообучения через цифровой след и обратную связь, что делает систему устойчивой к изменениям нормативов и производственных условий.

Разработка методов проектирования адаптивных инструментов СППР включает последовательные этапы: анализ онтологии БП для получения входных

данных о ситуации, классификацию ситуации по типам и уровням управления, подбор метода принятия решения и настройку в интеллектуальной подсистеме [149], реализацию самого решения и его оценку.

Оценка адаптивности методов осуществляется исходя из способности обрабатывать типовые, нетиповые и кросс-уровневые ситуации, скорости реакции на изменения и точности рекомендаций.

Таким образом, структура методов проектирования адаптивных инструментов обеспечивает комплексное решение задач управления качеством, объединяя гибкость, объяснимость и согласованность решений. Подробная проработка архитектуры, алгоритмического обеспечения и механизмов адаптации представлена в главе 3, где реализованы разработанные методы в составе модульной архитектуры СППР.

1.3.4 Основы методологии ИППР при обеспечении качества на промышленных предприятиях на базе СОП

В рамках данного исследования разработаны основы методологии ИППР в сфере обеспечения качества промышленных предприятий, основанные на СОП. Целью методологии является формирование универсального механизма принятия решений, учитывающего кросс-уровневые зависимости между уровнями принятия решений и функционирующего в условиях высокой неопределённости.

Задачи методологии, вытекающие из п. 3 §1.3.1:

- создание интегрированной СППР, обеспечивающей согласованное взаимодействие между уровнями управления качеством (см. § 1.1.3);
- обеспечение адаптивности к изменениям внешней среды через механизмы цифрового следа и обратной связи (см. § 4.3.1);
- повышение объяснимости решений через формализацию ПСС и визуализацию их графического представления (см. §4.2.1).

Основные принципы методологии включают интеграцию ситуационного и онтологического подходов (см. §1.3.2), формализацию отношений через теорию множеств (см. §2.1.2), адаптивность к изменениям (см. §§4.3.1, 4.3.2 и 5.2.3) и объяснимость решений (см. §4.2).

Методология опирается на три компонента:

- Ситуационная модель формализует контекст: состояние объекта, внешние условия и цели.
- Онтологическая модель структурирует знания о предметной области, в том числе сущности, атрибуты и связи между ними [249].
- Адаптивный механизм содержит алгоритмы и правила выбора решения в зависимости от ситуации, обеспечивая объяснимость вывода.

Интеграция знаний и данных строится на двух источниках: нормативные и экспертные знания формализованы в онтологиях и правилах, а оперативные данные служат для актуализации моделей и проверки гипотез.

Методология реализует многоэтапный процесс принятия решений (§4.1.1), в том числе анализ ситуации, формализацию знаний, выбор алгоритма, генерацию решения и его объяснение.

Научная новизна методологии заключается в разработке ТММ ситуации, метода подбора алгоритма принятия решений, методики объяснимости решений и адаптированного метода цифрового следа, обеспечивающих воспроизводимость, согласованность и самообучение системы. Предложенная методология является центральным элементом СОП и служит основой для проектирования адаптивных инструментов СППР, их интеграции в БП и оценки эффективности, обеспечивая интеграцию ситуационного анализа, онтологического моделирования и теоретико-множественного формализма. Подробная проработка методологии, включая её реализацию и оценку, представлена в главе 4 (§§4.1 – 4.4).

1.3.5 Методологические основы системной интеграции ситуационно-онтологических моделей в БП и ДО системы менеджмента качества

Ранее автором была предложена методика [188], которая заключалась в разработке системной модели предприятия [191], интегрирующей IDEF0-модели БП (реализованные в BPwin) с нормативными документами через автоматизированное преобразование свойств объектов диаграмм ("Activities definitions") в текстовые стандарты организации. Теоретической основой методики выступила структурная совместимость требований ГОСТ Р ИСО 9001-2015 с компонентной архитектурой моделей в CASE-инструментах, что было подтверждено последующими

исследованиями по трансформации IDEF0-моделей в различные организационные документы и открывает перспективы для аналогичных преобразований любых структурированных онтологических моделей.

Комплексный метод интеграции СОП-моделей в бизнес-процессы и ДО предприятия на новом уровне развивает идеи этой методики.

Целью разработанного комплексного метода является обеспечение согласованной интеграции моделей СОП в БП и ДО предприятия. Для достижения цели решаются следующие задачи, раскрывающие задачу по п. 4 §1.3.1:

- обеспечение двусторонней интеграции между онтологическими моделями и ДО предприятия;
- разработка механизмов автоматического преобразования модели в текстовые документы (стандарты, регламенты, инструкции);
- обеспечение актуализации знаний в моделях и документах на основе обратной связи и анализа изменений в бизнес-среде;
- повышение прозрачности и объяснимости решений, опирающихся на нормативные документы и БП;
- реализация гибкой интеграции СОП-моделей в существующие системы менеджмента качества (СМК), включая стандарты ISO серии 9000.

Принципы комплексного метода показаны в таблице 1.20.

Таблица 1.20 Принципы метода интеграции СОП-моделей в БП и ДО

Принцип	Описание
Формализация знаний	Использование структурированных онтологий (OWL) и моделей (IDEF0, BPMN) для единообразного представления знаний о БП, стандартах и нормативах
Двусторонняя интеграция	Обеспечение преобразования онтологических моделей в текстовые документы (стандарты, инструкции) и обратно, что гарантирует их синхронизацию и согласованность
Автоматизация ДО	Генерация регламентов, стандартов и инструкций на основе моделей с использованием программных инструментов (VBA, Python и др.)
Самоактуализация	Поддержание актуальности моделей и документов за счёт механизмов цифрового следа и обратной связи при изменениях в процессах или нормативах
Объяснимость и согласованность решений	Использование моделей и нормативных документов как источников обоснования решений, обеспечивающих прозрачность и согласованность на всех уровнях управления

Теоретико-методологическую основу комплексного метода составляют: СОП, стандартизированные методологии моделирования (IDEF0, BPMN), принципы системного анализа и аппарат квалиметрического анализа для верификации решений.

Комплексный метод интеграции СОП-моделей в БП и ДО предприятия решает четыре задачи:

- формализация знаний для модулей СППР;
- объяснимость решений через связь с нормативной базой;
- адаптивность к изменениям за счёт актуализации моделей и документов;
- интеграция с СМК, которая из инструмента контроля становится инструментом поддержки решений.

Синхронизация моделей и документов опирается на метод двунаправленного преобразования (ДНП) $OWL \leftrightarrow СОП$ (§5.1.3) и модель Трёхуровневой проверки (§5.2.2). Автоматизация ДО реализуется через метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО (§5.4.2). Самоактуализация модели строится на адаптированном методе цифрового следа (§4.3.1). Он инициирует обновление моделей и документов. Метод поддержания актуальности модели (§5.3.4) автоматически обновляет онтологии на основе фиксации решений и их последствий. В результате временные задержки между изменениями в бизнес-среде и актуализацией нормативной базы сокращаются.

Новизна метода в двунаправленной трансформации онтологических моделей и нормативных документов, а также самоактуализации знаний через цифровой след, что интегрирует СОП с требованиями стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2015.

Предложенный комплексный метод интеграции СОП-моделей в БП и ДО предприятия обеспечивает синхронизацию моделей с документацией. Подробная проработка метода, включая реализацию методов ДНП, Трёхуровневой проверки и автоматизации ДО, представлена в главе 5.

1.3.6 Анализ подходов к оценке эффективности методов проектирования СППР обеспечения качества на промышленных предприятиях

Для оценки эффективности методологии ИППР предлагается сочетание количественных метрик и экспертных оценок. Методологический выбор должен основываться на принципах соответствия предметной области, интеграции

нормативных документов, учета ситуационных факторов и использования гибридных методов, таких как нечёткая логика и машинное обучение [75].

Задача по разработке комплексной методики оценки эффективности СППР указана в п.5 §1.3.1.

Выделяются два основных направления: измерительно-прогнозный подход (количественная оценка эффектов от внедрения СППР) и оценочно-субъективный подход (анализ изменений в социально-экономической и организационной сферах). Для согласованности результатов необходимо разработать единые критерии и шкалы оценки, а также обеспечить адаптацию моделей к изменениям в нормативной базе и производственных условиях.

Рассмотрим проблемы, связанные с оценкой эффективности деятельности по поддержке принятия решений в сфере обеспечения качества на современных промышленных предприятиях (см. таблицу 1.21).

Таблица 1.21 Проблемы, влияющие на оценку эффективности решений в сфере обеспечения качества

Проблема	Обоснование	Пример
Сложность принятия решений из-за большого числа взаимосвязанных факторов	Нет интеграции между уровнями управления (продукт–процесс–система), что затрудняет согласование критериев	Решение по новому стандарту качества повышает технические показатели, но увеличивает затраты и снижает мотивацию сотрудников
Ограниченные возможности обработки больших данных	Недостаток аналитики задерживает выявление трендов, снижая оперативность реакции системы	Массовые данные о дефектах не анализируются вовремя – корректировка процесса запаздывает
Работа с неопределённостью и неполными данными	Традиционные методы требуют полной информации, отсутствие которой приводит к риску ошибочных выводов	В условиях недостоверных данных решение принимается без анализа, что вызывает неожиданные дефекты продукции
Информационные разрывы между уровнями управления	Отсутствие единой модели знаний нарушает согласованность действий и затрудняет прогноз последствий	Изменения на уровне процесса не учитывают влияние на системный уровень, что ведёт к дисбалансу управления качеством
Недостаточная интеграция формализованных и эвристических подходов	Субъективизм или чрезмерная формализация искажают баланс между опытом и моделью при выборе решений	Автоматизированные метрики показывают улучшение, но ЛПР фиксируют снижение реального контроля

Для оценки эффективности методологии ИППР предложена интеграция двух подходов: измерительно-прогнозного (оценка количественных эффектов: оптимизация процессов, снижение затрат, повышение точности решений) и оценочно-субъективного (анализ изменений в социально-экономической и организационной: улучшение условий труда, повышение гибкости управления). Первый использует объективные метрики, второй – экспертные оценки

заинтересованных сторон. Их сочетание позволяет учесть и измеримые, и слабо формализованные аспекты эффективности. Для согласованности оценок необходимы единый глоссарий (через онтологию), система весов и метод свёртки, обеспечивающие формирование достоверного интегрального показателя.

Научная новизна заключается в разработке интегрированной методики оценки, сочетающей количественные метрики (например, *RPR*, *XAI*) с субъективными экспертными оценками, и в применении цифрового следа для апостериорной оценки эффективности решений, что обеспечивает объективность и воспроизводимость.

Предложенный подход к оценке эффективности методологии ИППР обеспечивает комплексный анализ как объективных, так и субъективных параметров, устраняя информационные разрывы и обеспечивая согласованность оценок на всех уровнях управления. Подробная проработка методики комплексной оценки эффективности, включающей алгоритм апостериорной оценки и методику согласования выводов, представлена в §4.5.1–4.5.3.

1.4 Выводы по главе. Постановка задачи

Детализация задач исследования, раскрывающая методологическую организацию работы показана в таблице 1.22.

Таблица 1.22 Структура подзадач исследования

№	Задачи	Подзадачи	Реализация
1	Разработать методологические основы ситуационно-онтологического подхода	Разработка ТММ ситуации, разработка ТММ классификации решений, разработка ТММ формализации правил принятия решений, разработка метода дискретизации ситуаций на основе теории расписаний, разработка метода анализа ПСС, разработка адаптации метода PDCA для динамических условий	Реализуется для создания универсальной структуры, описывающей ситуации, решения и их последствия, а также позволяющей работать с нетиповыми и кросс-уровневыми ситуациями
2	Разработать методы проектирования адаптивных инструментов СППР	Реализация модульной архитектуры СППР, разработка метода подбора алгоритма принятия решений для ситуации, разработка интеллектуальной подсистемы обработки данных, разработка метода кросс-уровневого согласования онтологий, разработка адаптированного метода нечёткого вывода	Направлены на создание гибких и воспроизводимых компонентов СППР, способных автоматически подстраивать параметры под изменяющиеся условия

№	Задачи	Подзадачи	Реализация
3	Разработать методологию ИППР в сфере обеспечения качества на основе СОП	Разработка метода применения методологии ИППР, разработка методики объяснимости решений, разработка метода визуализации ПСС, разработка адаптированного метода цифрового следа, разработка метода самообучения модели через обратную связь, разработка иерархической модели управления, разработка методики согласования вывода СППР и ERP-системы на основе онтологической интеграции и цифрового следа	Направлен на построение единой методологии принятия решений, опирающейся на ситуационный анализ, онтологическое моделирование и теоретико-множественный формализм. Подзадачи обеспечивают согласованность уровней управления, объяснимость выводов и актуализацию знаний
4	Разработать комплексный метод интеграции СОП-моделей в БП и ДО предприятия	Разработка метода ДНП OWL ↔ модель СОП, разработка модели трёхуровневой системы проверки (синтаксис–семантика–прагматика), разработка метода поддержания актуальности модели, разработка метода двунаправленной интеграции онтологий в ДО	Решает проблему двунаправленной синхронизации между онтологиями и нормативными документами, минимизируя противоречия при переводе знаний в стандарты и ДО, обеспечивает устойчивость к изменениям внешних условий
5	Разработать методику оценки эффективности методологии ИППР	Разработка алгоритма оценки апостериорной эффективности, разработка методики согласования вывода между уровнями управления, разработка методики комплексной оценки эффективности СППР	Предназначена для количественной и качественной оценки качества принимаемых решений, точности идентификации ситуаций и согласованности действий

Анализ, проведённый в главе 1, выявил фундаментальные проблемы: разрыв согласованности между уровнями принятия решений, неспособность традиционных методов работать с неопределённостью в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях, недостаточная объяснимость решений ИИ-систем и неактуальность статичных баз знаний. Структура задач исследования, представленная в таблице 1.22, является прямым следствием системного анализа (см. §1.3). В столбце «Задачи» указаны основные задачи исследования, с их конкретизацией в столбце «Подзадачи». Сформулированные задачи охватывают все выявленные проблемы и образуют логическую структуру дальнейшего исследования.

Глава 2. Методологические основы ситуационно-онтологического подхода к поддержке принятия решений

Исследования в главе 2 фокусируются на разработке методологических основ СОП на основе ТММ, трёхуровневой модели ситуации и методов дискретизации процессов с использованием аппарата теории расписаний. Формируется подход к классификации решений, формализации правил их принятия и анализу ПСС. Для объективной оценки эффективности СОП вводится система количественных и качественных метрик. Структура подзадач исследования приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Структура подзадач главы 2

Подзадача	Назначение и функционал результата	Роль в реализации задачи
Разработка ТММ ситуации	Описывает ситуацию через множества ситуаций, решений и сценариев, а также характеристик, мер, правил и оценок	Структурирует знания и увязывает уровни управления
Разработка ТММ классификации решений	Классифицирует решения по числу шагов выбора (автоматические, однократные, двухтактные, трёхтактные)	Делает выводы объяснимыми и повторяемыми
Разработка ТММ формализации правил принятия решений	Описывает правила вывода как чёткие и нечёткие соотношения между множествами	Даёт математическую основу для выбора решений в условиях неопределённости
Разработка метода дискретизации ситуаций на основе теории расписаний	Переводит непрерывные процессы в дискретные состояния через временные и пространственные параметры (смены, участки)	Согласует уровни управления через фиксированные интервалы и локации
Разработка метода анализа причинно-следственных связей	Формализует связи между характеристиками ситуации, решениями и их последствиями через ТММ и весовые коэффициенты	Повышает объяснимость и согласованность на уровнях управления
Разработка адаптации метода PDCA для динамических условий	Внедряет цикл «планирование – выполнение – проверка – корректировка»	Гарантирует непрерывное улучшение решений и адаптивность системы

2.1 Ситуационно-онтологический подход к поддержке принятия решений в сфере обеспечения качества на промышленном предприятии

2.1.1 Структура ситуационно-онтологического подхода

На основе теоретических положений, изложенных в главе 1, формируется задача по разработке методологического аспекта СОП. ТММ ситуации, онтология предприятия и дискретизация ситуаций через временные и пространственные факторы обеспечивают строгость и системность подхода. Однако для практической реализации СОП требуется разработать методы и модели, которые позволят:

- классифицировать ситуации и связывать их с решениями;

- выбирать наиболее релевантные ИИ-подходы в зависимости от уровня неопределённости;
- обеспечить согласованность выводов между уровнями управления;
- актуализировать знания через цифровой след и обратную связь.

Данные задачи легли в основу разработки ключевых компонентов СОП, каждый из которых направлен на решение конкретного аспекта проблемы принятия решений в условиях нетиповых и кросс-уровневых ситуаций и реализует один или несколько принципов системного подхода: иерархичность, целостность, адаптивность, объяснимость, практическая применимость (см. таблицу 2.2).

Таблица 2.2 Компоненты СОП

Компоненты СОП	Назначение	Роль в СОП
Формализация ситуации через онтологическую модель	Представление ситуации как элемента множества S с характеристиками Ch^S , мерами L^S и критериями выбора Cr^S	Обеспечивает единую семантику и воспроизводимость вывода при анализе качества продукции
Дискретизация ситуаций на основе теории расписаний	Определение временных и пространственных параметров ситуаций	Повышает устойчивость модели за счёт нормализации данных и снижения влияния шума
Модель формализации правил принятия решений	Разработка функции выбора по j -му правилу $cr_j^S: (ch_i^S, l_i^S) \rightarrow s_k$, включая автоматические, нечёткие и кросс-уровневые правила	Обеспечивает гибкость и объяснимость вывода, особенно в условиях неопределённости
Классификация решений через такты и уровень неопределённости	Разработка модели переходов $S \rightarrow D^S \rightarrow P^{DS}$ и формализовать выбор решений через число шагов	Унифицирует процесс принятия решений и служит основой для автоматизации выбора алгоритма

Проработаем поставленные подзадачи.

2.1.2 ТММ ситуаций, решений и сценариев как основа ситуационно-онтологического подхода

Для описания ключевого элемента трёхуровневой модели ситуации применим теоретико-множественный подход к построению онтологии, предложенный в работе [123]. В данном контексте онтология определяется как структура $O = \langle C, R, F \rangle$, где C – конечное множество концептов (понятий), R – конечное множество отношений между ними, F – конечное множество функций интерпретации, заданных на концептах и/или отношениях онтологии O .

В системном анализе **ситуация** может быть описана как множество состояний или совокупность решений, принимаемых в различных пространственно-временных

условиях, в виде ТММ. Решения определяются свойствами объекта управления, проявляющимися в данных условиях.

Для каждого из трёх уровней (ситуация (S), решение (D^S) и сценарий (P^{D^S})) используется единая структура: множество характеристик (Ch), мер (L), критериев выбора (Cr) и оценок результативности (E). Ниже эта структура конкретизируется для каждого уровня.

1. Множество ситуаций $S \subset C$ классифицируется по шагам бизнес-процесса.

Для формализации вводятся:

– $Ch^S \subset C$ – характеристики, описывающие аспекты ситуации (например, «тип несоответствия»: документальное, физическое, технологическое; «критичность»: низкая, средняя, высокая);

– $L^S \subset C$ – меры, позволяющие количественно или качественно сравнивать ситуации (например, критичность оценивается числом от 1 до 10);

– $Cr^S \subset C$ – критерии идентификации или правила выбора ситуации из S на основе Ch^S и L^S (квалиметрические модели [169], продукционные правила «ЕСЛИ-ТО», прецедентные правила);

– $E^S \subset C$ – оценки результативности идентификации (качественные или количественные показатели).

Следовательно, для каждой ситуации $s_i \in S$:

$$S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle \quad (2.1)$$

Временной аспект учитывается через разделение на реактивные ситуации (S^R), которые возникают после события и проактивные (S^P) – связаны с возможными или вероятными событиями. Формализм $S = S^R \cup S^P$ определяет выбор ИИ-подхода: детерминированный вывод для реактивных случаев, вероятностное моделирование – для проактивных.

2. Множество решений $D^S \subset C$ содержит описания решений. Каждому решению соответствует несколько сценариев (например, устранение дефекта немедленно, в плановом порядке или после приобретения ресурсов).

Формальные компоненты:

- $Ch^{DS} \subset C$ – характеристики решений (место обнаружения, проявление дефекта, состояние изделия);
- $L^{DS} \subset C$ – меры (например, шкала повреждений $k_i \in [0, \dots, 10]$, где 0 – исправно, 5 – средняя степень повреждения, 10 – полный выход из строя);
- $Cr^{DS} \subset C$ – критерии выбора (правила отбора варианта, например, функции принадлежности);
- $E^{DS} \subset C$ – оценки результативности решений (по последствиям: доработка признаётся успешной, если изделие прошло повторный контроль).

На основе (2.1) каждое решение $d_j^S \in D^S$: $D^S = \langle Ch^{DS}, L^{DS}, Cr^{DS}, E^{DS} \rangle$.

3. Множество сценариев реализации решений $P^{DS} \subset C$ содержит планы реализации решений. Каждому решению соответствует несколько сценариев (например, устранение дефекта немедленно, в плановом порядке или после приобретения ресурсов).

Формальное представление:

$Ch^{PDS} \subset C$ – характеристики сценариев (степень оперативности, объём доступных ресурсов, значимость последствий);

$L^{PDS} \subset C$ – меры (ресурсы в рублях, трудочасах или качественно – от «очень мало» до «очень много»);

$Cr^{PDS} \subset C$ – критерии выбора сценария (например, экспертиза по методу Делфи);

$E^{PDS} \subset C$ – оценки результативности сценария (по освоенным средствам, срокам выполнения).

По аналогии с (2.1) для каждого сценария $p_k^{DS} \in P^{DS}$: $P^{DS} = \langle Ch^{PDS}, L^{PDS}, Cr^{PDS}, E^{PDS} \rangle$

Перечень всех множеств трёхуровневой модели показан в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Множества трехуровневой модели

Уровень	Множество	Описание
Ситуации	S	Множество ситуаций
	Ch^S	Характеристики ситуаций
	L^S	Меры характеристик ситуаций
	Cr^S	Функции выбора для идентификации ситуаций
	E^S	Оценки результативности идентификации ситуации

Уровень	Множество	Описание
Решения	D^S	Множество решений
	Ch^{DS}	Характеристики решений
	L^{DS}	Меры характеристик решений
	Cr^{DS}	Функции выбора для принятия решений
	E^{DS}	Оценки результативности решений
Сценарии	P^{DS}	Множество сценариев
	Ch^{PDS}	Характеристики сценариев
	L^{PDS}	Меры характеристик сценариев
	Cr^{PDS}	Функции выбора для реализации сценариев
	E^{PDS}	Оценки результативности сценариев

Процесс принятия решения включает идентификацию исходной ситуации, выбор оптимального решения и разработку алгоритма его реализации. Структурная взаимосвязь этих компонентов может быть описана через отношение обобщения: начальная ситуация (S) выступает в качестве надмножества, включающего множество возможных решений (D), каждое из которых ассоциировано с множеством конкретных планов реализации (P).

Если интерпретировать предложенный функционал для практической деятельности, то его можно представить следующей схемой (рис. 2.1):

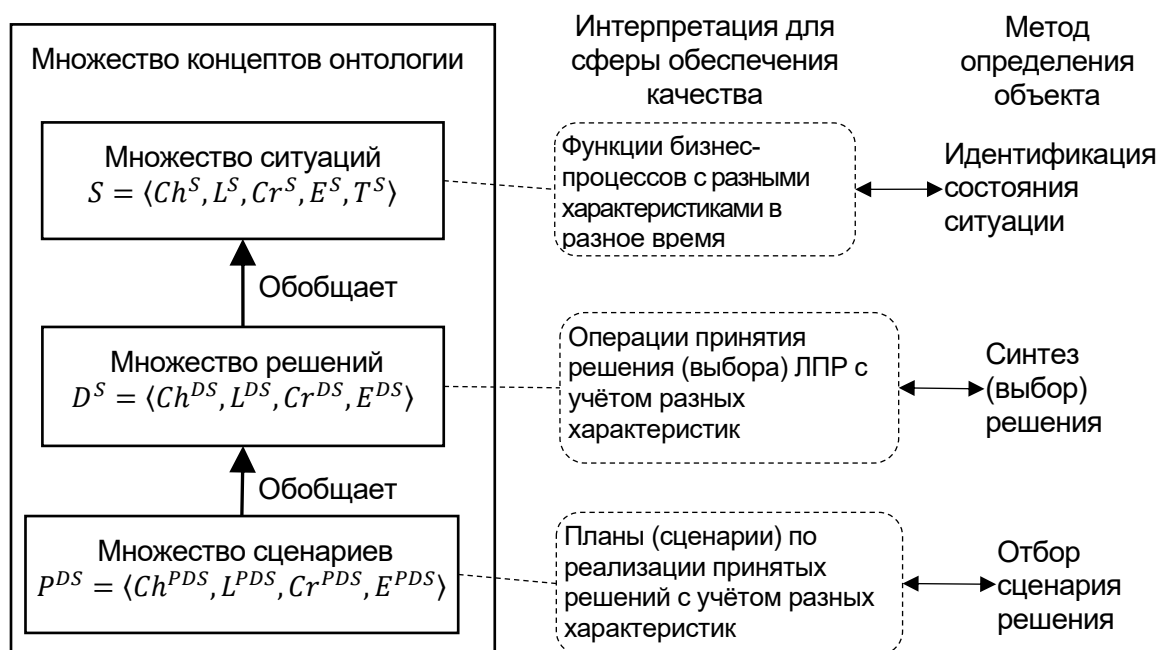


Рисунок 2.1 – Отношения между множествами концептов онтологии, построенной для процесса принятия решений

Особенности принятия решений в типовой, нетиповой и кросс-уровневой ситуациях показаны в таблице 2.4.

Таблица 2.4 Сравнение особенностей принятия решений в типовой, нетиповой и кросс-уровневой ситуациях

Особенность	Принятие решений в ситуации		
	типовой	нетиповой	кросс-уровневой
Степень определённости элем. множеств S, D^S, P^{DS} и т.д.	В основном полностью определены	Не полностью определены	Частично определены, требуется согласование между уровнями управления
Используются типы моделей	Онтологические	Комбинированные (онтологические, ситуационные)	Комбинированные (онтологические, ситуационные)
Основной метод технической реализации СППР	Экспертная система на основе базы знаний прецедентного типа	СППР на основе интеллектуальных методов	Междисциплинарные СППР с интеграцией экспертных систем и динамической адаптацией
Способ получения оценки для принятия решений	Статистические методы [59]	Лингвистические переменные	Комбинация методов (нечёткая логика, экспертные оценки и т.д.)

Отметим, что кросс-уровневые ситуации могут быть формализованы через расширенные онтологические модели, включающие связи между уровнями управления. Например, онтология для ситуации «дефект продукта» будет включать:

- концепты, например, «дефект продукта», «технологический процесс», «инвестиционная стратегия»;
- отношения, например, «влияет на», «требует изменения», «зависит от»;
- функции интерпретации, например, правила, связывающие дефекты продукта с параметрами процесса и стратегическими целями.

Такой подход позволяет автоматизировать анализ межуровневых связей и генерировать рекомендации для всех уровней. Подробно рассмотрен в главе 5.

ТММ ситуаций, решений и сценариев служит фундаментом СОП. Она обеспечивает:

- системность за счёт единой структуры на всех уровнях;
- объяснимость через интерпретацию характеристик и критериев;
- адаптивность благодаря возможности актуализации множеств.

Интеграция модели с онтологией предприятия O позволяет унифицировать знания и снизить влияние неопределённости, особенно в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях. Модель – основа для инструментов, реализованных в главах 3-5.

2.1.3 Метод дискретизации ситуаций на основе теории расписаний

Реальные процессы на промышленных предприятиях непрерывны, но для анализа и управления их нужно представлять дискретно. Ситуация рассматривается как срез системы в момент времени и формализуется через подмножество концептов онтологии предприятия. Для этого используется теория расписаний [8], которая структурирует временные и пространственные параметры процессов.

Зададим конечное множество временных интервалов, характеризующих все множество ситуаций $T^S \subset C$. Причём множество временных интервалов определяет разновидность ситуаций, выделяя временной промежуток, для которого актуальна ситуация. Для полностью статичных ситуаций T^S будет иметь единственный элемент. Для ситуаций реального времени множество T^S может стать слишком большим ($T^S \rightarrow \infty$). Но в сфере обеспечения качества промышленного предприятия дискретного производства таких ситуаций очень мало и ими можно пренебречь. Примером, таких интервалов времени может быть «час», «смена», «рабочий день», «квартал», «вахта», «год» и т.д.

На уровне продукта дискретной единицей времени может быть рабочая смена, что связано с тем, что в течение смены сохраняется стабильность условий производства, таких как состав исполнителей, оборудование и задачи. Тогда множество временных интервалов $T^S \subset C$ может быть определено:

$$T^S = \{\text{"утренняя смена"}, \text{"вечерняя смена"}\}$$

Местоположение операций также можно формализовать через множество участков $M \subset C$, на которых выполняются работы, например:

$$M = \{\text{"участок сборки"}, \text{"участок контроля"}\}$$

Теория расписаний представляет собой научную дисциплину, раздел дискретной математики, в которой исследуются задачи определения порядка [65]. Для дискретного производства процесс выполнения множества работ $J = \{J_1, \dots, J_N\}$, имеющих множество характеристик по их длительности $V = \{V_1, \dots, V_M\}$, может быть выполнен на множестве единиц оборудования (или рабочих центрах) $M = \{M_1, \dots, M_K\}$, на которых работы должны выполняться в соответствии с некоторым порядком в течение времени, определяемого заданными

характеристиками. При такой постановке задачи имеем множество состояний J , заданных в обстоятельствах времени V и места M .

Теория расписаний структурирует динамические модели ситуаций, организуя временные и пространственные параметры (например, привязку к сменам и участкам цеха), что позволяет формализовать ситуацию через теорию множеств. Время представляется как координатный отрезок с начальной точкой, интервальностью и упорядоченностью, образуя относительную шкалу для алгебраических преобразований. Интервалы рассматриваются как объекты, описывающие производство через множество временных интервалов (например, рабочих смен).

Связь компонентов онтологической модели с временной шкалой реализуется через функцию принадлежности множеству, учитывающую динамику изменений характеристик в течение производственного цикла (см. рисунок 2.2).

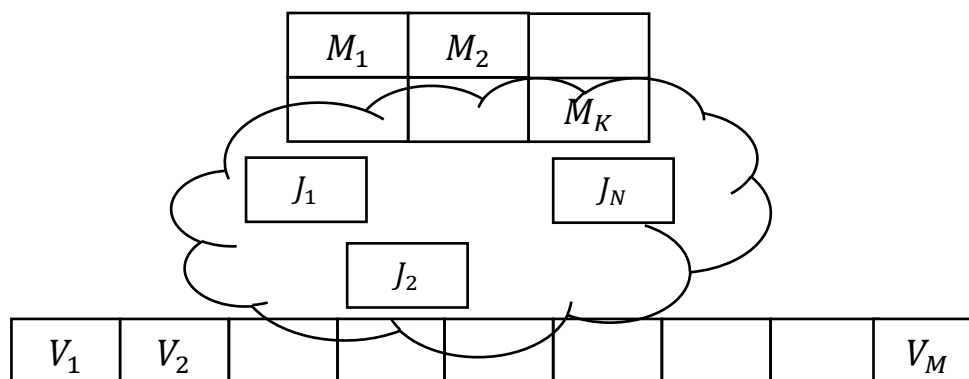


Рисунок 2.2 – Интеграция работ, интервалов времени и рабочих центров

Для дискретного производства в реальном техпроцессе единицей дискретизации может быть что угодно: от секунды до дня. В процессах, связанных с обеспечением качества стабильность обстоятельств, таких как один и тот же состав исполнителей, оборудования, задач и условий труда обеспечивается в течение рабочей смены, поэтому именно её выберем в качестве единицы на шкале времени.

Определим семантику множеств J , V , M для предметной области, связанной с обеспечением качества продукции в дискретном производстве (см. таблицу 2.5).

Таблица 2.5 Описание множеств J, V, M

Множество	Описание для предметной области
V	множество рабочих смен промышленного предприятия от выбранной точки начала измерений до времени, определяемого горизонтом планирования
M	множество участков, на которых выполняются работы
T	множество перестановок элементов множеств V и M , т.е. множество рабочих смен на различных участках промышленного предприятия

Применение теории расписаний для дискретизации ситуаций в промышленном производстве позволяет формализовать непрерывные процессы управления через фиксированные временные интервалы (например, рабочие смены) и локации (участки производства), обеспечивая структурированное представление динамических состояний системы в виде подмножеств онтологии предприятия.

2.1.4 Модель теории множеств для формализации правил принятия решений

Разработаем ТММ формализации правил принятия решений в типовых, нетиповых и кросс-уровневых ситуациях. Используем ТММ СОП, позволяющую описать процесс выбора решения через четкие соотношения между множествами S , D^S , P^{DS} .

Каждая конкретная ситуация $s_i \in S$ может быть представлена как тройка $s_i = (Ch^S, L^S, Cr^S)$, где $ch_i^S \subseteq Ch^S$ – подмножество характеристик данной ситуации, $l_i^S \subseteq L^S$ – подмножество мер для этих характеристик, а $cr_i^S \subseteq Cr^S$ – подмножество правил для классификации этой ситуации.

При необходимости обеспечения динамической интеграции данных, например, при управлении на уровне продукта, на основе §2.1.3 применим механизм учета изменяющихся условий времени (T^S) и места (M^S). Он реализуется через теоретико-множественный аппарат, который формализует переходы между состояниями системы. В этом случае описание ситуации расширим до $s_i = (Ch^S, L^S, Cr^S, T^S, M^S)$.

Определим порядок идентификации ситуации (формирование правила $cr_i^S \in Cr^S$) через соотношение между характеристиками и их мерами $cr_i^S: (ch_i^S, l_i^S) \rightarrow s_k$.

Здесь: ch_i^S – характеристики текущей ситуации, l_i^S – меры этих характеристик, а $s_k \in S$ – конкретный класс ситуации.

Рассмотрим пример ситуации для процесса приёмки продукции [129]. Допустим, имеем жёсткие правила: 1) Если $ch_1^S =$ «соответствие размеров» И $l_{11}^S =$ «Да», То $s_1 =$ «Соответствие»; 2) Если $ch_2^S =$ «наличие дефектов» И $l_{23}^S =$ «Критический», То $s_2 =$ «Несоответствие» (меры и характеристики даны выборочно). В этом случае, возможно 2 категории для идентификации ситуации: $s_1 =$ «Соответствие», что означает прекращение процесса принятия решения и переход к следующей проверке или $s_2 =$ «Несоответствие», что потребует перейти на уровень решения ($d_j^S \in D^S$) для дальнейшего исследования дефекта.

Рассмотрим случай комбинированных правил, определяемых по 2-м и более характеристикам. Данные правила формируются следующим образом:

$$cr_i^S: \bigwedge_{i=1}^n (ch_i^S, l_i^S) \rightarrow s_k, \quad (2.2)$$

где n – число характеристик, i – номер правила, (ch_i^S, l_i^S) – конкретная характеристика и её мера, а $s_k \in S$ – конкретный класс ситуации.

Введём E^S – множество оценок результативности идентификации ситуации, тогда для него справедливо: $E^S = \{e_j^S | e_j^S = \text{оценка применения правила } cr_j^S\}$, где j – номер правила, e_j^S может принимать значения: $e_j^S = 1$, если идентификация корректна ($s_k \in S$) или $e_j^S = 0$, если – нет.

Сформируем переходы между уровнями объекта решения (ситуация – решение – сценарий). Переходы формализуются через функции принадлежности μ и операции над множествами.

В типовых ситуациях $\mu(s) \approx 0$, поэтому решение можно считать принимаемым автоматически ($d_{auto}^S \in D^S$). В этом случае это можно определить:

$$d_{auto}^S = f_{SR}(s_i), \quad (2.3)$$

где $f_{SR}(s_i)$ – жесткое правило «ЕСЛИ-ТО», а s_i – конкретная ситуация.

Для нетиповых ситуаций ($\mu(s) > \varepsilon, \varepsilon \approx 0.3$), обладающей некоторой неопределённостью, должна быть учтена функция принадлежности, поэтому выражение для поиска решения ($d_{fuzzy}^S \in D^S$) будет таким:

$$d_{fuzzy}^S = \arg \max_{d \in D^S} \sum_{i=1}^n \mu(ch_i^S) l_i^S w_i, \quad (2.4)$$

где D^S – множество решений в ситуации S , $\mu(ch_i^S)$ – степень принадлежности характеристики $ch_i^S \in Ch^S$ нечёткому множеству, $l_i^S \in L^S$ – мера этой характеристики, w_i – её вес.

Кросс-уровневые ситуации требуют дополнительного усложнения модели. Здесь мы рассматриваем функции перехода ($f_u(s)$) для каждого уровня u в кросс-уровневой ситуации s . Функция перехода осуществляет переход от ситуации $s_i \in S$ к решению $d_j^S \in D^S$ на уровне u , что позволяет комплексно учитывать влияние ситуации на все уровни управления и формировать согласованные решения. Решение в такой ситуации ($d_{cross}^S \in D^S$) будет определяться следующим образом:

$$d_{cross}^S = \bigcup_{u \in U} f_u(s), \quad (2.5)$$

где U – множество уровней управления (продукт, процесс, система).

На уровне сценария подход к выбору близок вышеописанным. Большинство сценариев детерминированы решением. Например, если аудитор обнаружил несоответствие (d = «решение о несоответствии»), то он заполняет бланк «Протокол несоответствия» (p = «заполнение протокола»). Поэтому сценарии могут выбираться по сложным правилам, включая нечёткие. Для них справедлива формула:

$$p_l^{DS} = \begin{cases} f_{SR}(d_l^S), & \text{если } \mu(s) \approx 0, \\ \arg \max_{p_k^{DS} \in D^S} \sum_{k=1}^m \mu(ch_k^{DS}) l_k^{DS} w_k, & \text{если } \mu(s) > \varepsilon. \end{cases} \quad (2.6)$$

В формуле l – номер сценария, $d_l^S \in D^S$ – решение для которых рассматривается сценарий, k – номер характеристики, ch_k^{DS} – характеристика, l_k^{DS} её мера, w_k – её вес, m – число характеристик в правиле.

Процесс принятия решения можно разделить на три основных уровня: ситуация – решение – сценарий. Сложность решения определяется количеством этапов выбора и степенью неопределённости на каждом уровне.

При работе с нетиповыми ситуациями, характеризующимися неопределённостью данных, необходимо использовать методы оценки нечёткости, подробно описанные в §3.5.

Принятие решений в рамках СОП предполагает наличие чётко определённых функций, ресурсов и правил, которые обеспечивают объяснимость,

воспроизводимость и согласованность вывода. В структурном аспекте онтологическая модель ситуации O^S может быть представлена как $O^S = \langle F, R, G, N \rangle$, где F – функции, связанные с обработкой данных (создание, удаление, обновление), R – ресурсы (характеристики, меры, критерии, оценки), G – цели (в упрощённом виде: «принятие результативных решений»), N – правила, регулирующие обработку элементов.

Операции над элементами множеств реализованы через функции F (см. таблицу 2.6).

Таблица 2.6 Реализация функций по работе с компонентами базы знаний

Функция	Реализация
создание	$Nm = Nm^0 \cup \{k_i\}$, где k_i – новый компонент
удаление	$Nm = Nm^0 \setminus \{k_j\}$, где k_j – удалённый компонент
уточнение	$Nm = (Nm^0 \setminus \{k_l^0\}) \cup \{k_l\}$, где k_l^0 – существующий вариант компонента, k_l – новый вариант компонента

Ресурсы (R) охватывают характеристики Ch^e , меры L^e , критерии Cr^e и оценки E^e , где $e \in \{S, D^S, P^{DS}\}$ – индекс уровня: ситуация, решение, сценарий.

Цели (G) в данном контексте рассматриваются как поддержание результативности решений, что соответствует задачам обеспечения качества.

Правила (N) регулируют выбор функции, применение ресурсов, обновление знаний.

Формально множество возможных правил Nm определяется как $Nm = f(Nm^0, DSM)$, где Nm^0 – исходное множество компонентов процесса принятия решения, DSM – множество методов принятия решений.

Формализация правил реализована в интеллектуальной подсистеме СППР (см. §3.3.2).

Модульная архитектура реализует функции и правила. Актуализация ресурсов выполняется через цифровой след. Обновление базы знаний при изменении данных или условий – через пополнение множеств ситуаций, решений и сценариев (обратная связь, цифровой след, §4.3.1).

ТММ позволяет единообразно описывать типовые, нетиповые и кросс-уровневые ситуации, обеспечивая объяснимость выводов за счёт чёткой

интерпретации характеристик и критериев, гибкость при работе с неопределённостью через нечёткие множества и весовые коэффициенты, согласованность между уровнями управления через интеграцию функций перехода на уровне продукта, процесса и системы.

Предложенные соотношения являются основой для построения адаптивных методов идентификации, выбора и реализации решений и служат отправной точкой для разработки механизмов самообучения, актуализации моделей и интеграции знаний в БП, что делает ТММ структурообразующим элементом СОП, обеспечивающим его научную обоснованность и практическую применимость.

Полученные результаты создают основу для дальнейшей разработки классификации решений в рамках СОП.

2.1.5 ТММ классификации решений

Значимую проблему составляет интерпретация переходов от уровня к уровню. Для решения данной проблемы необходимо с использованием языка теории множеств разработать метод по отнесению элементов к конкретному множеству, т.е. метод классификации решений.

Введём три вида связанных множеств: S – множество ситуаций, D^S – множество решений и P^{DS} – множество сценариев.

Деятельность по определению ситуации будем называть идентификацией ситуации (см. формулу (2.2)), поскольку на данном уровне основным является её узнавание, понимание с чем сталкивается лицо, принимающее решение. При идентификации решается задача по выбору конкретной $s_i \in S$, где $i \in \{1, \dots, n\}$, где n – число всех известных ЛППР ситуаций. Деятельность по определению корректного решения в конкретной ситуации s_i будем называть синтезом подмножества решений или выбором алгоритма решения (см. формулы (2.3 – 2.5)). Она решает задачу по выбору конкретного решения $d_j^s \in D^S$, где $j \in \{1, \dots, m\}$, где m – число возможных решений. Деятельность по определению наиболее подходящего сценария по решению d_j^s , принятому в конкретной ситуации s_i будем называть отбором для подмножества сценариев (см. формулы (2.6)). В процессе отбора сценариев решается

задача по выбору конкретного $p_l^{DS} \in P^{DS}$, где $l \in \{1, \dots, k\}$, где k – число возможных сценариев.

Механизм выбора конкретного элемента множества определяется на основе множеств Ch, L, Cr . Рассмотрим понимание сложного решения с позиций СОП.

Поскольку СОП рассматривает принятие решений на трёх уровнях, то рассмотрим варианты таких переходов (см. рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Варианты переходов из исходного состояния ситуации в целевое

Решения могут быть автоматическими, простыми или однократными и сложными, т.е. двухтактными и трёхтактными в зависимости от числа шагов (выборов), которые требуется сделать из начального состояния в целевое.

Построим ТММ для классификации решений. Для этого введём понятие целевое множество возможных исходов I^e , в качестве которого будем понимать результат выбора ситуации, решения или сценария из соответствующих множеств, причём $e \in \{S, D^S, P^{DS}\}$ – категория, к которой могут относиться ситуации S , решения D^S или сценарии P^{DS} .

1. Автоматическое решение вообще не требует выбора, т.е. принимается без альтернатив. Тогда для конкретного решения $i^e \in I^e$ это можно представить следующим образом:

- только автоматическая идентификация ситуации: $i^e = \{s_1\}$;
- только автоматический синтез подмножества решений: $i^e = \left\{ \begin{matrix} \{s_1\}, \\ \{d_1^S\} \end{matrix} \right.$;
- только автоматический отбор для подмножества сценариев: $i^e = \left\{ \begin{matrix} \{s_1\}, \\ \{d_1^S\}, \\ \{p_1^{DS}\} \end{matrix} \right.$.

В рассмотренных выражениях: s_1 – единственная ситуация в множестве S , d_1^S – единственное решение в D^S , p_1^{DS} – единственный сценарий в P^{DS} .

Для данной задачи характерна либо единственная ситуация, либо ситуация с одним возможным решением или способом его реализации. Например, успешное прохождение контроля продукции означает единственное решение контролёра – утверждение результатов, реализуемое через подтверждение подписью. Эти ситуации широко распространены, но из-за отсутствия выбора обычно не анализируются. Однако они являются частным случаем СОП к принятию решений.

2. Классическим примером является простое однократное решение, в котором переход от исходной ситуации к целевой выполняется за 1 шаг. Такие решения актуальны в типовых ситуациях, где на одном из уровней (ситуация, решение, сценарий) имеется выбор из двух и более альтернатив, а на остальных уровнях фиксированные или не рассматриваемые элементы. В рамках предложенной ТММ СОП все варианты однократных решений могут быть описаны единой структурой, в которой для конкретного решения $i^e \in I^e$:

$$i^e = \langle V_1, V_2, V_3 \rangle = \begin{cases} V_1 \in \{S, D^S, P^{DS}\}, \text{ где } |V_1| \geq 2, \\ V_2, V_3 = 0 \end{cases}.$$

В данном выражении V_1, V_2, V_3 – компоненты модели принятия решений, в которых выполняется либо идентификация ситуации ($V_1 = S$), либо синтез алгоритма решения ($V_1 = D^S$), либо отбор сценария ($V_1 = P^{DS}$).

3. Если переход из исходной ситуации в целевое состояние выполняется за два шага, то решение классифицируется как двухтактное. Такой тип решения предполагает выбор на двух уровнях из трёх возможных (ситуация, решение, сценарий), где каждое множество содержит не менее двух альтернатив. В рамках ТММ СОП варианты двухтактных решений могут быть описаны единой структурой:

$$i^e = \langle V_1, V_2, V_3 \rangle = \begin{cases} V_1, V_2 \in \{S, D^S, P^{DS}\}, \text{ где } |V_1|, |V_2| \geq 2, \\ V_3 = 0 \end{cases}.$$

Такой подход позволяет унифицировать описание следующих частных случаев: идентификация ситуации и синтез алгоритма решения, идентификация ситуации и отбор сценария, синтез алгоритма решения и отбор сценария. В результате подходом достигается системная интерпретация сложных решений, при которых неопределённость присутствует на двух уровнях, что соответствует практике управления качеством в условиях ограниченной определённости.

4. Самым сложным является трёхтактное решение, в котором реализуются три шага от исходного до целевого состояния. Выбор по всем множествам: для S_i – решение d_j^S , для его реализации – сценарий p_l^{DS} , т.е. для $i^e \in I^e$:

$$i^e = \begin{cases} s_i \in S, \text{ где } i \in \{1, \dots, n\}, \text{ где } n \geq 2, \\ d_j^S \in D^S, \text{ где } j \in \{1, \dots, m\}, m \geq 2, \\ p_l^{DS} \in P^{DS}, \text{ где } l \in \{1, \dots, k\}, \text{ где } k \geq 2. \end{cases};$$

В случае, если состав множеств S , D^S и P^{DS} , а также правила выбора их компонент известны, то формируется типовая ситуация, в которой принятия решений возможно из экспертной системы. Если на одном из этапов есть неопределённые элементы, то это нетиповая ситуация и требуются иные методы.

Критерии выбора типа решения определяются параметрами ситуации, такими как время реагирования, уровень неопределённости и влияние на управление. Например, для типовой ситуации «контроль параметров» применяется автоматическое правило «ЕСЛИ-ТО», а для нетиповой «выявление причины дефекта» – методы машинного обучения, требующие анализа разнородной исторической информации экспертом.

Для обеспечения целостности метода выбора алгоритмов (методов) принятия решений на разных уровнях управления (продукт, процесс, предприятие) требуется их формализация через ТММ, что позволяет систематизировать подходы к классификации и адаптации методов, учитывая особенности каждого типа решения (автоматические, одноктактные, двухтактные, трёхтактные).

На основе СОП и ТММ предлагаются механизмы классификации решений через множества S (ситуации), D^S (решения) и P^{DS} (сценарии). Основные

характеристики (Ch), меры (L) и критерии (Cr) используются для формализации переходов между уровнями.

Реализацию переходов из текущей ситуации в целевую на основе ТММ СОП и формул (2.2 – 2.6):

1. Автоматическое решение – это безусловный переход из исходной ситуации $S_{исх}$ в целевое состояние $S_{рез}$, безусловно реализуя решение D^S и сценарий P^{DS} .

Автоматические решения характерны для ситуаций с минимальной неопределённостью и чётко определёнными правилами. *Например*, если параметр температуры T находится в допуске ($Ch_T \in [T_{min}, T_{max}]$), система автоматически принимает решение «режим работы печи не требует вмешательства» (D_{auto}^S) и активирует сценарий «ожидание до следующего замера температуры» (P_{auto}^{DS}). Общие формулы переходов описаны в предыдущем параграфе.

Переход от ситуации к решению описывается выражением:

$\exists! s_i \in S: \forall Ch_m \in Ch(s_i), Ch_m \in L_m \Rightarrow \exists! d_j \in D^{s_i}$. Переход от решения к сценарию описывается выражением: $\exists! p_k \in P^{d_j s_i}: p_k = f_{DS}(d_j)$

2. Однотактные решения. Отличием от автоматического перехода является наличие 2 и более вариантов на одном из уровней. Рассмотрим выражения для переходов с учётом характеристик, мер и критериев. Возможны следующие варианты однотактного решения:

1 Фиксация ситуации и сценария, выбором решения

Формула перехода от наблюдаемой ситуации к целевой:

$\exists! s_i \in S, \exists! p_k \in P^{s_i}: |D^{s_i}| \geq 2, d_j \in D^{s_i}$ выбирается по $Cr(d_j)$. Ситуация и сценарий фиксированы, решение выбирается из только D^{s_i} на основе $Cr(d_j)$.

2 Фиксация ситуации и решения, выбором сценария

Формула перехода от наблюдаемой ситуации к целевой:

$\exists! s_i \in S, \exists! d_j \in D^{s_i}: |P^{d_j s_i}| \geq 2, p_k \in P^{d_j s_i}$ выбирается по $Cr(p_k)$. Ситуация и решение фиксированы, решение выбирается из только $P^{d_j s_i}$ на основе $Cr(p_k)$.

3 Фиксация решения и сценария, выбором ситуации

Формула перехода от наблюдаемой ситуации к целевой:

$\exists! d_j \in D^{s_i}, \exists! p_k \in P^{s_i}: |S| \geq 2, s_i \in S$ выбирается по $Cr(s_i)$. Решение и сценарий фиксированы, решение выбирается из S на основе $Cr(s_i)$.

Рассмотрим обобщённо все три варианта алгоритма однократного решения:

1. Анализ общих характеристик, который включает определение уровня управления, выявление типа ситуации и выбор метода принятия решений.
2. Фиксация двух уровней: исключение двух уровней принятия решений (например, идентификации ситуаций s_i и отбора сценариев p_k).
3. Выбор на оставшемся уровне: выбрать элемент из множества вариантов, например, $d_j \in D^S$, где $|d_j| \geq 2$.
4. Применение: реализация выбранного решения.

Рассмотрим однократное решение на примере классификации несоответствия по критерию соответствия ГОСТ Р ИСО 9001 (выбор решения $d_j \in D^S$).

В данном случае ситуация уже известна $S = \{\text{Несоответствие ГОСТ Р ИСО 9001}\}$, т.е. множество вариантов имеет только 1 вариант. Сценарии решений предопределены для каждого решения, поэтому выбор осуществляется только по решению $D^S = \{\text{запросить документы, провести повторную проверку, назначить корректирующие действия}\}$: $d_1 = \text{«запросить документы»}$, $d_2 = \text{«провести повторную проверку»}$, $d_3 = \text{«назначить корректирующие действия»}$.

Для d_1 предопределён сценарий $p_1 = \text{«отправить запрос отделу качества»}$; для d_2 предопределён сценарий $p_2 = \text{«составить план проверки»}$; для d_3 предопределён сценарий $p_3 = \text{«сформировать отчет и внести изменения»}$;

При такой постановке задачи конечное решение будет достигнуто по выбору d_j . Если выбрано $d_3 = \text{«назначить корректирующие действия»}$, то целевое состояние ситуации принятия решений будет $p_3 = \text{«сформировать отчет и внести изменения»}$.

3. Двухтактное решение отличится от однократного решения наличием неопределённости на двух уровнях, что повышает сложность, но позволяет лучше адаптироваться к изменчивым условиям. Рассмотрим выражения для переходов с учётом характеристик, мер и критериев. Возможны варианты двухтактного решения:

- 1 Выбор ситуации и решения, фиксация сценария

Формула перехода от наблюдаемой ситуации к целевой:

$$\exists s_i \in S (|S| \geq 2), \exists d_j \in D^{s_i}: |D^{s_i}| \geq 2: \forall Ch_S(s_i) \in L_S, \forall Ch_D(d_j) \in L_D \Rightarrow \\ p_k = f_{DS}(d_j, s_i), \forall Ch_P(p_k) \in L_P$$

Ситуация и решение выбираются из множеств S и D^{s_i} , где характеристики ситуаций и решений должны принадлежать допустимым диапазонам, а сценарий p_k определяется функцией f_{DS} от d_j и s_i и удовлетворяет своим характеристикам.

2 Выбор ситуации и сценария, фиксация решения

Формула перехода от наблюдаемой ситуации к целевой:

$$\exists s_i \in S (|S| \geq 2), \exists p_k \in P^{s_i}: |P^{s_i}| \geq 2: \forall Ch_S(s_i) \in L_S, \forall Ch_P(p_k) \in L_P \Rightarrow \\ d_j = f_{SP}(s_i, p_k), \forall Ch_D(d_j) \in L_D$$

Ситуация и сценарий выбираются из множеств S и P^{s_i} , где характеристики ситуаций и сценариев должны принадлежать допустимым диапазонам, а сценарий d_j определяется функцией перехода от ситуации к сценарию $f_{SP}(s_i, p_k)$ и удовлетворяет своим характеристикам.

3 Выбор сценария и решения, фиксация ситуации

Формула перехода от наблюдаемой ситуации к целевой:

$$\exists d_j \in D (|D| \geq 2), \exists p_k \in P^{d_j}: |P^{d_j}| \geq 2: \forall Ch_D(d_j) \in L_D, \forall Ch_P(p_k) \in L_P \Rightarrow \\ s_i = f_{DP}(d_j, p_k), : \forall Ch_S(s_i) \in L_S$$

Решение и сценарий выбираются из множеств D и P^{d_j} , где характеристики решений и сценариев должны принадлежать допустимым диапазонам, а ситуация s_i определяется функцией f_{DP} от d_j и p_k и удовлетворяет своим характеристикам.

Рассмотрим обобщённо варианты алгоритма двухтактного решения:

1. Анализ общих характеристик аналогичен однотоктному решению.
2. Идентификация уровней с выбором требует определения, какие два уровня требуют принятия решения (*например*, ситуация и решение).

3. Анализ вариантов:

– если альтернативы присутствуют на уровнях ситуации и решения, то сравнить альтернативные ситуации $s_i \in S$ и решения $d_j \in D^S$;

– если альтернативы присутствуют на уровнях ситуации и сценария, то сопоставить ситуации $s_i \in S$ с доступными сценариями $p_k \in P^{DS}$;

– если альтернативы присутствуют на уровнях решения и сценария, то выбрать решение $d_j \in D^S$ и сценарий $p_k \in P^{DS}$.

4. Связывание уровней требует нахождения соответствия между выбранными уровнями $s_i \rightarrow d_j \rightarrow p_k$.

5. Применение требует реализации выбранной комбинации уровней.

Рассмотрим двухтактное решение на примере классификации несоответствия по критерию соответствия ГОСТ Р ИСО 9001.

В данном случае ситуация может быть идентифицирована из множества: $S = \{\text{малозначительное несоответствие, значительное несоответствие}\}$.

Решения рассматриваются как результаты идентификации ситуации:

– для $s_1 = \text{«малозначительное несоответствие»}$ существует два вида решения $d_{11} = \text{«только уведомить»}$, $d_{12} = \text{«уведомить и включить в отчёт»}$;

– для $s_2 = \text{«значительное несоответствие»}$ существует два вида решения $d_{21} = \text{«остановить процесс, сформировать план анализа причин»}$, $d_{22} = \text{«только сформировать план анализа причин»}$.

Уровень сценария предопределён, что очевидно из формулировок решений, которые предполагают очевидную реализацию:

– для d_{11} , $p_{11} = \text{«уведомление руководства проверяемого подразделения»}$;

– для d_{12} , $p_{12} = \text{«уведомление руководства и включение в отчёт»}$;

– для d_{21} , $p_{21} = \text{«остановка процесса и формирование плана»}$;

– для d_{22} , $p_{22} = \text{«формирование плана анализа причин»}$.

Далее выбираем фактическую ситуацию $s_2 = \text{«значительное несоответствие»}$. Если вторым действием выбрано решение $d_{22} = \text{«только сформировать план анализа причин»}$, то автоматически выполняется запуск сценария $p_{22} = \text{«формирование плана анализа причин»}$

4. Трехтактное решение предполагает выбор на трёх уровнях (ситуация, решение, сценарий), где каждое множество содержит не менее двух вариантов.

Рассмотрим формулы переходов с учётом характеристик, мер и критериев:

$$\exists s_i \in S (|S| \geq 2), \exists d_j \in D^{s_i} (|D^{s_i}| \geq 2), \exists p_k \in P^{d_j s_i}: |P^{d_j s_i}| \geq 2: \forall Ch_S(s_i) \in L_S, \forall Ch_P(p_k) \in L_P, \forall Ch_D(d_j) \in L_D \Rightarrow Cr(s_i, d_j, p_k) = \text{True}$$

Ситуация, решение и сценарий выбираются из множеств S , D^{s_i} и $P^{d_j s_i}$, где характеристики ситуаций, решений и сценариев принадлежат допустимым диапазонам, а критерий $Cr(s_i, d_j, p_k)$ выполняется для решений $s_i \rightarrow d_j \rightarrow p_k$.

Алгоритм выполнения трёхтактного решения:

1. Анализ общих характеристик аналогичен одно- и двухтактному решению.
2. Идентификация ситуаций: определение возможных ситуаций $s_i \in S$ (*например*, типы нарушений).
3. Синтез решения для ситуации: определение для выбранной s_i доступных решений $d_j \in D^S$.
4. Отбор сценария для реализации решения: выбор сценария $p_k \in P^{D^S}$ для решения d_j в ситуации s_i .
5. Валидация решений по уровням на согласованность цепочки $s_i \rightarrow d_j \rightarrow p_k$.
6. Применение в виде реализации комбинации всех уровней.

Рассмотрим трёхтактное решение на примере отказа на квалификационных испытаниях летательного аппарата.

Ситуация 1: Отказ без происшествий

Характеристики ситуации: $Ch_1 = \text{«Тип отказа»}$ (*например*, отказ двигателя).
 $Ch_2 = \text{«Влияние на летную годность»}$ (*например*, минимальное).

Меры: $L_1 = \{\text{отказ двигателя, отказ системы навигации}\}$. $L_2 = \{\text{минимальное, критическое}\}$.

Критерии: $Cr(s_i) = (Ch_1 = \text{отказ двигателя}) \wedge (Ch_2 = \text{минимальное})$.

Решения: 1.1. $d_{11} = \text{Принять решение об опасности влияния отказа на продолжение полётов}$. 1.2. $d_{21} = \text{Принять решение об отсутствии опасности для полётов}$.

Сценарии для d_{11} : 1.1.1) $p_{111} = \text{Остановить испытания и выпустить акт}$; 1.1.2) $p_{112} = \text{Остановить испытания, выпустить акт, наказать виновников}$.

Сценарии для d_{21} : 1.2.1) p_{121} = Решить продолжить испытания, включив сведения о происшествии в отчёт; 1.2.2) p_{122} = Продолжить испытания.

Рассмотрим рекомендации по связи между видами переходов и типами ситуации (см. таблицу 2.7). Некоторые из них очевидны, но для систематизации они упомянуты также.

Таблица 2.7 Рекомендации связи видов переходов и типов ситуации

Вид перехода	Условия применения	Критерий выбора
Автоматический	- Данные полные и достоверные; - ситуация повторяется >5 раз за период; - чёткие нормативные критерии	Степень определённости >90%
Однотактный (выбор решения)	- Ситуация идентифицирована; - известны все варианты решений; - критерии выбора формализованы	Степень определённости >70%
Однотактный (выбор сценария)	- Решение уже принято; - сценарии заранее известны; - вариативность реализации невысокая	Количество возможных сценариев ≤ 5
Однотактный (выбор ситуации)	- Решение и сценарий очевидны; - контекст неясен (размытые границы между типами ситуаций)	Неопределённость идентификации >30%
Двухтактный (фиксация сценария)	- Решения и ситуации варьируются; - сценарий легко предопределить (типовой); - алгоритм сценария стандартный	Степень вариативности сценария <20%
Двухтактный (фиксация решения)	- Ситуации и сценарии варьируются; - решение ограничено (2-3 типовых варианта); - остаточное влияние на другие уровни	Количество решений ≤ 3
Двухтактный (фиксация ситуации)	- Решения и сценарии варьируются; - ситуация ограничена (2-3 варианта); - сложность в согласовании решений и сценариев	Количество ситуаций ≤ 3
Трёхтактный	- Все компоненты (S , D^S , P^{DS}) многовариантны; - влияние на несколько уровней управления; - высокая неопределённость (>70%)	Количество связей между уровнями ≥ 3

Алгоритмы для автоматических, однотактных, двухтактных и трёхтактных решений зависят от типа ситуации (см. рисунок 2.4).

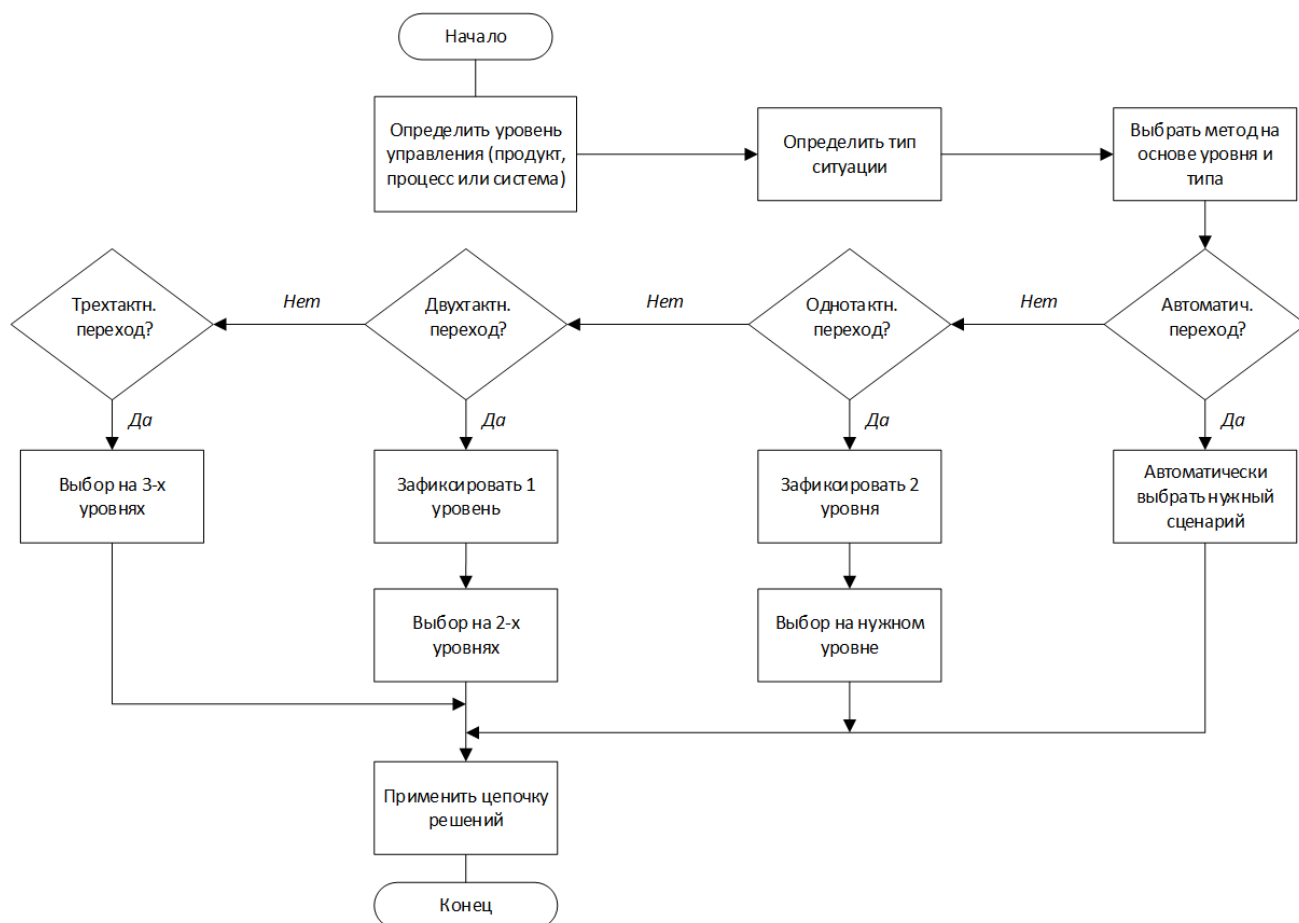


Рисунок 2.4 – Структура метода выбора алгоритма принятия решений по уровням управления и типам ситуаций

Предложенная ТММ формализует переходы между ситуациями, решениями и сценариями. Классификация решений по числу шагов (автоматические, однотактные, двухтактные, трёхтактные) обеспечивает объяснимость, воспроизводимость и согласованность выводов на уровнях управления. Выражения переходов и механизм согласования через функции и критерии служат основой для автоматизации и адаптации СППР в промышленных условиях.

2.2 Механизмы анализа и оценки в ситуационно-онтологическом подходе

2.2.1 Метод анализа причинно-следственных связей

Для интерпретации и оценки результативности решений в условиях неопределённости требуется формализация ПСС между характеристиками ситуации Ch^S , принятым решением D^S и его последствием E^S , что реализуется в рамках СОП через ТММ $S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle$.

Пусть характеристика $ch_i^S \in Ch^S$ ассоциирована с ситуацией $s_j \in S$. При этом мера $l_k^S \in L^S$ определяет некоторое понятие, например, «очень высокая», «средне затратная» и т.д. Здесь оценка является частью функций интерпретации онтологии O , т.е. на множестве F существует подмножество Cr^S , являющееся множеством функций интерпретации в момент времени $t \in T^S$, т.е. $Cr^S \in F$ и Cr^S ассоциирована с L^S . Иными словами, $S = \langle Ch^S, Cr^S \rangle$, где $Ch^S = \langle L^S, T^S \rangle$. Введём оценку $e_l^S \in E^S$ определяющую результативность идентификации ситуации. Если методы идентификации используют жёсткую логику, то оценка результативности идентификации ситуации всегда будет корректной ($E^S = \{e_1^S\}$, где e_1^S = «ситуация идентифицирована корректно»), поскольку схема оценки не оставляет других вариантов. Применительно к вопросу идентификации в большинстве ситуаций такой подход будет уместен, поскольку в серийном производстве значительный объём возникающих ситуаций уже имели место ранее. Тем не менее, если идентификация выполняется на основе нечётких множеств или на основе статистических или интеллектуальных методов, то потребуется множество методов оценки $M^S \in O$, таких, что $E^S = \langle M^S, T^S \rangle$.

Например, для ситуации S = «На рабочем столе контролёра находится агрегат» необходима идентификация. Пусть $ch_1^S, ch_2^S \in Ch^S$ – конкретные характеристики ситуации, а $l_1^S, l_2^S \in L^S$ – соответствующие им меры. Тогда множество характеристик $Ch^S = \{\text{«состояние по внешнему виду»}, \text{«сопроводительная документация»}\}$, причём ch_1^S = «внешний вид» может принимать значения оценок l_1^S : {«соответствует требованиям», «повреждённый»}, а ch_2^S = «сопроводительная документация» может принимать значения оценок l_2^S : {«решение об отступлении от КД», «квитанция предъявления», «акт на брак»}. В более сложном случае оценки могут быть определены на шкале целых чисел или с помощью функций принадлежности нечётких множеств. Время появления определяется как $t^S \in T^S$: {«вчера», «сегодня»}. Тогда множество критериев Cr^S будет интерпретировать данные характеристики как:

- $s_1 =$ «требуется немедленное выполнение контрольной операции», если критерий $cr_1^S = \{l_1^S = \text{«целый»}, l_2^S = \text{«квитанция предъявления»}, t = \text{«вчера»}\};$
- $s_2 =$ «требуется плановое выполнение контрольной операции», если критерий $cr_2^S = \{l_1^S = \text{«целый»}, l_2^S = \text{«квитанция предъявления»}, t = \text{«сегодня»}\};$
- $s_3 =$ «требуется анализ причин дефекта», если критерий $cr_3^S = \{l_1^S = \text{«повреждённый»}, l_2^S = \text{«решение об отступлении от КД» или } l_2^S = \text{«акт на брак»}\}.$

Отметим, что каждой мере $l_k^S \in L^S$ может быть сопоставлено не только множество понятий (номинативная шкала), но и множество интервалов на множестве целых чисел (интервальная шкала) и множество функций принадлежности нечёткого множества (нечёткая шкала). В любом случае множество критериев должно соответствовать выбранной системе оценок. При этом число вариантов интерпретаций конечных состояний должно быть конечным.

Для выявления кросс-уровневых разрывов используется модель ПСС [87], позволяющую визуализировать влияние решений на уровнях управления (см. рисунок 2.5).

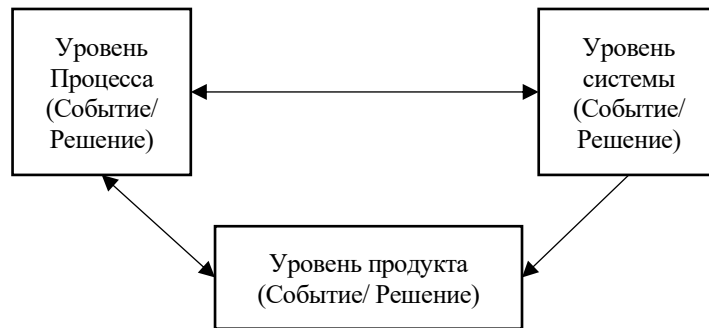


Рисунок 2.5 – Диаграмма ПСС

Для повышения качества оценки предложен метод анализа ПСС. Аналогично методу иерархического анализа Саати [223], можно представить каждую характеристику ch_i^S как узел иерархической структуры, где её влияние на решение определяется через систему весовых коэффициентов w_i . Веса могут быть получены через парные сравнения по аналогии с методом анализа иерархий: $w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{e_{ij}^{ex}}{\sum_{k=1}^n e_{kj}^{ex}}$, где e_{ij}^{ex} – это оценка важности i -й характеристики относительно j -й.

Веса характеристик w_i далее используются для формирования уровня решения D^S , который представляет собой множество возможных решений $\{d_1, \dots, d_m\}$, где решения формируются на основе совокупности характеристик ситуации S и их значимости. Формализация перехода от уровня ситуации к уровню решения может быть выражена: $D^S = f(Ch, W)$, где Ch – множество характеристик ситуации, $W = \{w_1, \dots, w_n\}$ – соответствующие весовые коэффициенты, $f()$ – функция агрегации.

Подход позволяет точнее оценивать значимость каждой характеристики при переходе от уровня ситуации S к уровню решения D^S .

Введём $e_1^S, e_2^S \in E^S$ – первая и вторая оценки результата ситуации S , причём e_1^S = «ситуация идентифицирована корректно», e_2^S = «ситуация идентифицирована некорректно». В нашем примере логика идентификации ситуации жёсткая, поэтому, если полностью расписать все комбинации характеристик, то оценка всегда будет $E^S = \{e_1^S\}$. Примем, что часть комбинаций характеристик неопределённо, поскольку вероятность их сочетания очень мала. Тогда метод оценки M_1^S = «исключающее ИЛИ» и все прочие комбинации cr_m^S , кроме описанных выше будут приводить к $E^S = \{e_2^S\}$, т.е. к тому, что идентификация ситуации осуществлена некорректно.

По аналогичной логике примем, что характеристика $ch_i^{DS} \in Ch^{DS}$ ассоциирована с вариантом решения (состояние ситуации) $d_j^S \in D^S$. При этом мера $l_k^{DS} \in L^{DS}$ определяет понятие, например, «точное», «удовлетворительное» и т.д. При этом мера является частью функций интерпретации онтологии O , т.е. на множестве F существует подмножество Cr^{DS} , являющееся множеством функций интерпретации в момент времени $t_k^S \in T^S$, т.е. $Cr^{DS} \in F$ и Cr^{DS} ассоциирована с L^{DS} . Иными словами, $D^S = \langle Ch^{DS}, Cr^{DS} \rangle$, где $Cr^{DS} = \langle L^{DS}, T^S \rangle$. Введём оценку $e_l^{DS} \in E^{DS}$ определяющую качественные или количественные оценки того, насколько результативными оказались принятые решения. Для e_l^{DS} потребуется множество методов оценки $M^{DS} \in O$, таких, что $E^{DS} = \langle M^{DS}, T^S \rangle$.

Примем, что конкретная i -я характеристика $ch_i^{PDS} \in Ch^{PDS}$ ассоциирована со конкретным j -м сценарием реализации варианта решения (планом) $p_j^{DS} \in P^{DS}$. Здесь

k -я мера $l_k^{PDS} \in L^{PDS}$ определяет некоторое значение i -ой характеристики. При этом мера является частью функций интерпретации онтологии O , т.е. на множестве F существует подмножество Cr^{PDS} , являющееся множеством функций интерпретации в момент времени $t \in T^S$, т.е. $Cr^{PDS} \in F$ и Cr^{PDS} ассоциирована с L^{PDS} . Иными словами, $P^{DS} = \langle Ch^{PDS}, Cr^{PDS} \rangle$, где $Cr^{PDS} = \langle L^{PDS}, T^S \rangle$.

Сценарий обычно содержит не один, а множество компонентов (работ), что должно учитываться при разработке критериев отбора сценариев.

Введём оценку $e_i^{PDS} \in E^{PDS}$ определяющую качественные или количественные оценки того, насколько результативен выбор сценария решения. Для e_i^{PDS} требуется множество методов оценки $M^{PDS} \in O$, чтобы $E^{PDS} = \langle M^{PDS}, T^S \rangle$.

Если определить данные множества в виде таблиц базы данных, то возможно построить автоматизированную систему поддержки принятия решений.

На основе трёхуровневой схемы принятия решений СОП возможно осуществлять принятие решений в сфере обеспечения качества на основе множеств, которые формируются на основе онтологической модели БП.

2.2.2 Метрики эффективности анализа ПСС

Сформируем метрики для оценки эффективности метода (см. таблицу 2.8).

Таблица 2.8 Метрики для оценки эффективности метода анализа ПСС

№	Метрика	Формула / Логика расчёта	Ед. измерения
1	Точность идентификации ситуации (IA)	$IA = N^{cor}/N^{gen}$, где N^{cor} – число корректно идентифицированных ситуаций, N^{gen} – общее число ситуаций	0–100%
2	Скорость принятия решений (V^{DM})	$V^{DM} = N^T/T$, где N^T – число решений, принятых за время T	решений/час
3	Снижение ошибок интерпретации (ΔE)	$\Delta E = (E_{t-1} - E_t) / E_{t-1}$, где E_{t-1} – ошибки до внедрения, E_t – после.	0–100%
4	Оптимизация весов характеристик (W^{ch})	$W^{ch} = \sum_{i=1}^n (w_i - w_{i-1}) / n$, где w_i – новые веса (после парных сравнений), w_{i-1} – старые веса, n – число измерений	0-1

Вернёмся к ситуации по анализу дефекта (см. §2.2.1). Характеристики и их меры и критерии определены. Для данной ситуации метрики рассчитаны на основе анализа $N^{gen} = 35$ тестовых случаев из практики предприятия. После применения метода и добавления нечётких оценок (например, «частично повреждён» с функцией принадлежности $\mu=0.7$) и введения весовых коэффициентов (по методу Саати) для характеристик $w_1 = 0.6$ (внешний вид), $w_2 = 0.4$ (документация):

– Точность идентификации (IA). До применения метода было $N^{cor}_a=28$, после стало $N^{cor}_b=33$. Показатель за счёт нечётких оценок изменился с 80% до 94%, т.е. вырос на 14%.

– Скорость принятия решений (V^{DM}). До применения составляла $V^{DM}_a=2$ часа на 1 случай, после стала $V^{DM}_b=0.5$ часа на 1 случай, т.е. увеличилась в 4 раза.

– Снижение ошибок интерпретации (ΔE). До применения $E_{t-1}=25\%$ (только жёсткие правила), после $E_t=5\%$ (более гибкая схема принятия решений). В результате $\Delta E=80\%$, т.е. число ошибок снизилось на 80%.

– Оптимизация весов характеристик (W^{ch}). До применения $w_{i-1}=0.5$, после $w_i=0.6$, т.е. оптимизация весов $W^{ch}=+0.1$.

В результате, точность идентификации выросла на 14% за счёт нечётких оценок; скорость решений увеличилась в 4 раза благодаря автоматизации; ошибки интерпретации сократились на 80% из-за учёта весовых коэффициентов; веса характеристик стали немного объективнее (метод Саати).

2.2.3 Интеграция классических методов обеспечения качества в СОП на примере метода PDCA

На многих предприятиях применяется метод PDCA (цикл Деминга [135]). Адаптируем его на основе СОП, чтобы показать его универсальность. В [175] были введены множества: целей F , ресурсов R , правил Cr , целей G . Рассмотрим адаптацию метода PDCA, реализующего накопление опыта решения проблем, для описания подхода к их решению в сфере обеспечения качества с использованием СОП.

1. Для этапа планирования (Plan) множество целей $G = \{g_1, \dots, g_n\}$, где каждая цель g_i связывается с соответствующими функциями F и ресурсами R , определяться выражением: $G = \bigcup_{i=1}^n (a_i^F, r_i^F)$, где i – номер работы, a_i^F – работы работников сферы обеспечения качества (контроль, анализ, принятие решений, оформление результатов и т.д.) r_i^F – доступные ресурсы для каждой работы.

2. Этап выполнения (Do) предполагает реализацию выбора конкретных решений $d_j^S \in D^S$, ассоциированных с множествами характеристик Ch^{DS} и мер

$L^{DS}: d_j^S = \arg \max_{d \in D^S} \sum_{i=1}^n \mu(ch_i^S) l_i^S$, где $\mu(ch_i^S)$ – функция принадлежности конкретной характеристики, а $l_i^S \in L^{DS}$ мера этой характеристики.

3. Этап проверки (Check) реализует обратную связь и обновление базы знаний C_{KB} : $C_{KB}^{new} = C_{KB}^{old} \cup \{Ch, L, Cr\}$, где новое состояние базы знаний C_{KB}^{new} определяется через старое состояние C_{KB}^{old} и новые характеристики, меры и правила соответствующего уровня.

4. Этап корректировки (Act) уточняет множество правил Cr и добавляет новые элементы в онтологию O . Так PDCA интегрируется с СОП.

Приложение Б содержит другие методы качества, адаптированные на основе СОП для СППР.

Адаптация PDCA и других методов подтверждает универсальность СОП. Он воспроизводим в разных управленческих практиках и применим ко всем типам ситуаций.

2.3 Анализ соответствия и эффективности СОП на основе качественного и количественного сравнения с известными подходами

Применение СОП в управлении в сфере обеспечения качества требует не только теоретического и методологического обоснования, но и объективной оценки его эффективности. Для этого проводится комплексный анализ и реализация:

- качественного сопоставления СОП с известными методами принятия решений по степени их соответствия ключевым проблемам в сфере обеспечения качества;

- количественной оценки эффективности СОП через метрики, характеризующие объяснимость, воспроизводимость, согласованность и устойчивость к изменению внешней среды.

Анализ СОП известными методами, которые уже анализировались в таблице 1.11 по степени решения ключевых проблем в сфере обеспечения качества (см. таблицу 2.9). Сравнение проводится не на уровне архитектурных решений, а на уровне функциональных возможностей, предоставляемых конкретным подходом для решения задачи ИППР при обеспечении качества.

Таблица 2.9 Сопоставление и оценка соответствия методов и проблем

Метод	Согласование мнений экспертов и ЛПР	Неполные / недостоверные данные	Недостаточная объяснимость	Актуализация данных/моделей
Прецедентные методы (CBR)	Хорошо (онтологии и аналогии)	Средне (зависит от базы прецедентов)	Хорошо (объяснимость на примерах)	Плохо (требуется ручного обновления)
Методы машинного обучения	Плохо (чёрный ящик)	Средне (требует достоверных данных)	Плохо (сложная интерпретация)	Средне (нужны механизмы дообучения)
Нейронные сети	Плохо (нет прозрачности)	Средне (устойчивы к шуму, мало данных)	Плохо (чёрный ящик)	Средне (адаптивное обучение возможно)
Нечёткая логика	Хорошо (лингвистические правила)	Хорошо (работает с неопределённостью)	Хорошо (понятные правила)	Средне (настройка функций вручную)
Генетические алгоритмы	Средне (оптимизация без объяснений)	Средне (глобальный поиск, но медленно)	Плохо (нет интерпретации)	Средне (может адаптировать параметры)
Байесовские сети	Хорошо (учёт экспертных знаний)	Хорошо (вероятностный подход)	Средне (частично интерпретированных зависимостей)	Плохо (требует пересчёта вероятностей при изменениях данных)
СОП	Хорошо (через онтологию и причинность)	Хорошо (через дискретизацию и нечёткие меры)	Хорошо (через ПСС и визуализацию)	Высоко (через цифровой след и автоматическую актуализацию правил)

СОП сочетает лучшие практики из всех методов, обеспечивая высокую степень соответствия всем четырём категориям проблем, что делает его особенно ценным в условиях промышленного производства.

Метрики позволяют оценить объяснимость, согласованность и адаптивность СОП по сравнению с традиционными подходами, охватывая основные аспекты принятия решений в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях (см. таблицу 2.10).

Таблица 2.10 Количественные метрики для расчёта эффективности СОП

Метрика	Описание	Место описания	Связь с проблемой
Точность идентификации ситуации (IA)	Доля корректно классифицированных ситуаций из общего числа	Описана в таблице 2.8 в §2.2.2	Неполные, недостоверные или некорректные данные
Скорость принятия решений (V^{DM})	Число решений, принимаемых за единицу времени	Описана в таблице 2.8 в §2.2.2	Согласование мнений экспертов и ЛПР разных уровней управления
Снижение ошибок интерпретации (ΔE)	Уменьшение числа неправильно истолкованных ситуаций	Описана в таблице 2.8 в §2.2.2	Согласование мнений экспертов и ЛПР разных уровней управления
Время отклика системы (T^{resp})	Время между поступлением данных и выдачей решения	Описана в §3.1.1	Согласование мнений экспертов и ЛПР разных уровней управления
Коэффициент согласованности решений (K^{agr})	Показатель согласования выводов на уровнях управления	Описана в §3.4.1	Согласование мнений экспертов и ЛПР разных уровней управления
Коэффициент релевантности знаний (K^{rel})	Доля актуальных записей в модели с учётом новых и устаревших данных	Описана в §4.3.1	Необходимость актуализации данных / моделей

Метрика	Описание	Место описания	Связь с проблемой
Объяснимость вывода (XAI)	Процент решений с текстовым или графическим обоснованием	Описана в §4.2.3	Недостаточная объяснимость решений
Время документирования решения (T^{doc})	Время, затрачиваемое на автоматическое формирование отчёта о принятом решении	Описана в §4.2.3	Недостаточная объяснимость решений
Воспроизводимость решения (RPR)	Степень повторяемости вывода при повторном анализе одной ситуации	Описана в §4.3.1	Неполные, недостоверные или некорректные данные
Актуальность вывода (V^{akt})	Доля выводов, основанных на актуальных данных и правилах	Описана в §4.3.1	Необходимость актуализации данных / моделей
Изменение объема знаний (ΔK)	Прирост или сокращение объема знаний в модели за период	Описана в §5.3.4	Необходимость актуализации данных / моделей

Проведём сравнение по количественным метрикам методов (см. таблицу 2.11).

Таблица 2.11 Сравнение СОП с известными методами по метрикам

Метод	Метрика										
	IA	V^{DM}	ΔE	T^{resp}	K^{agr}	K^{rel}	XAI	T^{doc}	RPR	V^{akt}	ΔK
	%	реш. /час	%	сек	0..1	0..1	%	сек	%	%	%
CBR	80	2.0	20	8	0.6	0.7	90	15	90	75	5
ML	85	3.5	30	12	0.5	0.6	40	30	65	60	10
Нейросети	90	4.0	40	15	0.4	0.6	25	40	60	55	8
Нечёткая логика	75	1.5	15	6	0.7	0.7	80	12	85	70	12
Генетические алгоритмы	65	1.0	35	18	0.6	0.6	25	35	60	50	5
Байесовские сети	75	1.5	20	10	0.7	0.6	70	20	80	65	7
СОП	92	4.5	7	3	0.9	0.9	95	5	93	95	20

Значения метрик для методов CBR, ML и др. получены на основе обобщения данных из источников [57, 71, 75, 149, 155, 222], где эксперименты проводились в различных предметных областях и условиях. Невозможно прямое сравнение с СОП. Однако приведённые данные носят ориентировочный характер и показывают, что СОП достигает значений по ключевым метрикам, сопоставимых или превосходящих известные подходы. Значения для СОП получены в результате апробации на ПАО «ОДК-УМПО» и ООО «Айпл Консалтинг» (§6.3). Приведённые в актах проценты сокращения времени и снижения ошибок были пересчитаны в абсолютные значения метрик для обеспечения сопоставимости с аналогами.

Анализ таблицы показывает, что СОП превосходит аналоги по точности, скорости, объяснимости и согласованности уровней управления.

Разработанный подход продемонстрировал высокую степень соответствия ключевым проблемам в сфере обеспечения качества в промышленности, таким как согласование мнений, работа с недостоверными данными, объяснимость и

актуализация моделей. По результатам качественного и количественного анализа, можно утверждать, что СОП:

- превосходит существующие методы по объяснимости, скорости и согласованности уровней управления;
- устойчив к изменениям внешних условий и поддерживает актуальность знаний за счёт цифрового следа и механизмов самообучения;
- имеет в основе модель, служащую универсальным языком представления знаний, что позволяет формализовать правила выбора и повысить объяснимость решений в условиях неопределённости.

Данные свойства делают СОП эффективной основой для построения адаптивной и интерпретируемой СППР в сфере обеспечения качества промышленного предприятия.

2.4 Выводы по главе

В соответствии с подзадачами, сформулированными в таблице 2.1, в главе 2 получены следующие результаты:

1. Сформированы ТММ ситуации, решения и сценария (S, D^S, P^{DS}) , интегрирующие характеристики, меры, критерии и оценки. Модели обеспечивают единую семантику и воспроизводимость вывода на всех уровнях управления.
2. Предложен метод дискретизации ситуаций на основе теории расписаний для формализации временных и пространственных параметров производства (рабочие смены, участки), что обеспечивает устойчивость модели к динамике процессов.
3. Разработана классификация решений по числу тактов (автоматические, однотоковые, двухтактные, трёхтактные) и соответствующие алгоритмы переходов между уровнями, что позволяет адаптировать метод поддержки к типу ситуации и степени неопределённости.
4. Разработан метод анализа причинно-следственных связей (ПСС), формализующий влияние характеристик ситуации на выбор решения и его последствия. Метод вводит весовые коэффициенты (по аналогии с методом Саати)

для количественной оценки значимости каждого фактора при переходе от ситуации к решению и сценарию.

5. Адаптирован цикл PDCA для динамических условий: этапы Plan, Do, Check, Act формализованы через множества СОП и интегрированы с цифровым следом, что обеспечивает непрерывное улучшение решений и гибкость системы.

6. Введена система количественных метрик эффективности СОП, привязанная к четырём системным барьерам, выявленным в первой главе:

- несогласованность (K^{agr}, V^{DM});
- неопределённость ($IA, RPR, \Delta E$);
- необъяснимость (XAI, T^{doc});
- неактуальность ($T^{resp}, K^{rel}, V^{akt}, \Delta K$).

Сравнение с рассуждением на основе прецедентов, машинным обучением, нейросетями, нечёткой логикой, генетическими алгоритмами и байесовскими сетями показало превосходство СОП по точности (92%), скорости (4.5 реш./час), объяснимости (95%) и согласованности уровней (0.9).

Научная новизна СОП состоит в едином формализме (ТММ, онтологии и тактная классификация), позволяющем описывать все типы ситуаций, динамически выбирать метод поддержки и обеспечивать самообучение модели через цифровой след. В этом отличие СОП от статичных экспертных и прецедентных систем, а также от «чёрных ящиков» машинного обучения.

Таким образом, СОП представляет собой методологически обоснованную и экспериментально подтверждённую основу для построения адаптивных СППР в сфере обеспечения качества на промышленных предприятиях дискретного производства.

Глава 3. Разработка методов проектирования адаптивных инструментов СППР для работы с типовыми, нетиповыми и кросс-уровневыми ситуациями

Исследования в данной главе фокусируются на разработке адаптивных инструментов СППР, обеспечивающих интеграцию разнородных данных и онтологических моделей на основе СОП и теоретико-множественных методов в рамках обоснования методологии интеллектуальной поддержки принятия решений.

Структура подзадач приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Структура подзадач главы 3

Подзадача	Назначение и функционал результата	Роль в реализации задачи
Реализация модульной архитектуры СППР	Обеспечивает независимое обновление модулей без остановки системы, поддерживает актуальность знаний и устойчивость к изменениям условий	Повышает масштабируемость, снижает дрейф данных и время реакции за счёт контейнеризации и версионного управления
Разработка метода подбора алгоритма принятия решений для ситуации	Формализует выбор подхода в зависимости от типа ситуации через матрицу критериев (повторяемость, неопределённость, влияние на уровни и др.) и многокритериальную оценку	Обеспечивает гибкое применение методов, от экспертных систем, до нейросетей с учётом объяснимости, точности и адаптивности
Разработка интеллектуальной подсистемы обработки данных	Обеспечивает анализ и интерпретацию ситуаций с использованием гибридных ИИ-подходов и нечёткой логики	Повышает точность идентификации и устойчивость к шуму в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях
Разработка адаптированного метода нечёткого вывода	Повышает объяснимость решений в условиях неопределённости за счёт дискретизации и онтологической интерпретации	Обеспечивает выбор корректной функции принадлежности $\mu(x)$ в зависимости от типа ситуации и уровня неопределённости
Разработка метода кросс-уровневого согласования онтологий	Обеспечивает согласованность знаний между уровнями управления через семантическое сопоставление и трёхуровневую верификацию онтологий	Повышает объяснимость решений и снижает противоречия при переводе знаний в нормативы и БП

3.1 Проектирование модульной архитектуры СППР как основы адаптивных инструментов для интеграции разнородных данных и знаний

3.1.1 Модульная структура СППР и её роль в обеспечении качества

Для формализации модульной структуры СППР введена модель

$$Arch = \langle M, I, V, C \rangle, \quad (3.1)$$

где M – множество функциональных модулей, I – интерфейсы обмена данными, V – версионность модулей, C – контейнеры.

Модульная архитектура СППР предполагает наличие независимых функциональных модулей, каждый из которых отвечает за отдельный аспект принятия решений (см. рисунок 3.1):

ошибок и позволяет масштабировать отдельные компоненты без перестройки всей системы – важно при работе с нетиповыми и кросс-уровневыми ситуациями.

Особенности проектируемой архитектуры СППР:

- онтологическая модель включает СОП-модель объекта управления;
- нормативный базис состоит из правил, стандартов и регламентов;
- модульность и разделение уровней ответственности: ядро, нормативный базис, интеллектуальная подсистема;
- поддерживаются разнородные данные, в том числе структурированные, лингвистические, онтологические;
- интерфейс гибкий, он даёт доступ через формы, таблицы, отчёты с адаптацией под роль ЛПР;
- база знаний обучается и актуализируется через правила, машинное обучение и обратную связь;
- вывод верифицируется на корректность данных и решений.

Следовательно, модульная архитектура СППР является значимым элементом, обеспечивающим её способность к динамической адаптации в условиях неопределённости.

Динамическая адаптация обеспечивает изменение и расширение функциональности системы без переработки архитектуры. СППР проектируется так, чтобы модули можно было добавлять или изменять независимо от основного каркаса (*например*, при обнаружении отклонений в техпроцессе модуль анализа данных передаёт информацию в модуль принятия решений). На основе онтологической модели формируется сценарий корректирующих действий, адаптированный к текущим нормативам, а модуль обратной связи обновляет параметры алгоритмов на основе результатов внедрённых мер.

Благодаря такому подходу обеспечивается:

- масштабируемость, подразумевающая, что добавление новых модулей осуществляется без нарушения работы системы;

– устойчивость к «дрейфу данных», при которой автоматическая калибровка моделей предотвращает снижение точности результатов вследствие изменений в производственной среде;

– снижение времени реакции, реализующееся за счёт параллельной обработки задач на разных уровнях управления, уменьшающей задержки при проведении кросс-уровневого анализа.

Например, при реализации на машиностроительном предприятии внедрения модульной СППР позволит сократить время обработки дефектов за счёт динамической перестройки сценариев контроля качества в ответ на изменения в параметрах оборудования при следующих ограничениях.

В итоге модульная структура СППР с динамической адаптацией становится основой для создания устойчивых к внешним потрясениям систем управления.

Согласно принципу адекватности [190], построение универсальной модели, интегрально описывающей все этапы, невозможно. Следует разрабатывать специализированные модели с последующим согласованием их взаимодействия для применения лучших методов в конкретной предметной области. Рассмотрим механизм обновления модулей в СППР.

Механизм обновления модулей в СППР базируется на изоляционных принципах, контейнеризации и версионности. Модули работают независимо, взаимодействуют через API [36], что облегчает модернизацию. Контейнеризация позволяет обновлять модули без прерывания работы. Поддерживаются несколько версий для плавности перехода. В случае ошибок предусмотрен автоматический откат.

Сравнение проектируемой архитектуры с аналогами приведено в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Сравнение модульной архитектуры на основе СОП с известными аналогами

Архитектурная модель	Особенности	Преимущества модульной архитектуры на основе СОП
Классическая СППР [175]	Централизованная обработка, жёсткие связи между модулями	Даёт модульность, гибкость и объяснимость вывода
Модель архитектуры разработки ПО на основе моделей [76]	Разделение абстрактных и технологических моделей	Дополняет подход нормативным базисом и ПСС
Гибридные ИИ-системы [101]	Комбинация различных методов ИИ в одной системе	Вводит онтологическую семантику и трёхуровневую модель СОП

Метрика скорости отклика T^{resp} используется как оценка производительности архитектуры и определяется как $T^{\text{resp}} = t^{\text{out}} - t^{\text{in}}$, где t^{in} – момент поступления данных в систему, t^{out} – момент выдачи решения.

Анализ показывает, что модульная архитектура на основе СОП развивает существующие модели на основе ситуационного и онтологического моделирования, добавляя объяснимость, воспроизводимость и кросс-уровневое согласование. А скорость отклика служит метрикой оценки эффективности взаимодействия модулей, т.к. низкое время отклика показывает высокую степень слаженности работы подсистем.

Модульная структура СППР с динамической адаптацией обеспечивает устойчивость и эффективность системы благодаря гибкому взаимодействию компонентов, поддержке масштабируемости и возможности самообучения. Механизмы обновления модулей, основанные на изоляции, контейнеризации и версионности, способствуют стабильному развитию системы, снижая риски и повышая точность процессов. СППР спроектирована как система, способная эволюционировать во времени, не теряя при этом точности и объяснимости вывода.

3.1.2 Трёхуровневая модель данных для СППР при обеспечении качества

На основе модульной архитектуры реализована трёхуровневая модель данных. Модель данных распределяет информацию по трём уровням качества: продукт, процесс и система. Так устраняется фрагментация. Интеграция между уровнями выполняется через модули анализа, принятия решений и обратной связи. В результате получается единая среда для поддержки решений на всех этапах производства.

1. Уровень продукта

Хранятся геометрические параметры, результаты испытаний, данные о дефектах и соответствии стандартам (например, ГОСТ). Источниками данных служат датчики Интернета вещей (IoT-датчики) [17, 208], отчеты контролеров, цифровые следы и т.д. (см. таблицу 3.4).

Таблица 3.4 Пример данных о качестве продукта

Название данных	Связь с СОП	Уровень решения	Источник данных
Геометрические параметры детали	Характеристика	Ситуация	Измерительные устройства
Результаты испытаний на прочность	Мера	Ситуация	Испытательные лаборатории
Список дефектов партии	Мера	Ситуация	Журналы приемки качества
Стандарты ГОСТ для продукции	Критерий	Решение	Нормативные документы
Описание дефекта "неровная поверхность"	Описание ситуации	Ситуация	Система компьютерного зрения

2. Уровень процесса

Аккумулирует данные о параметрах технологических процессов (скорость, температура, давление), а также результаты аудитов качества и корректирующие мероприятия. Источником информации выступают системы мониторинга оборудования, журналы аудитов и т.д. (см. таблицу 3.5).

Таблица 3.5 Пример данных о качестве процесса

Название данных	Связь с СОП	Уровень решения	Источник данных
Число остановок оборудования	Мера	Ситуация	Система мониторинга
Результаты аудита процесса	Мера	Ситуация	Протоколы аудитов
Скорость обработки на станке	Характеристика	Ситуация	Сенсоры станков (IoT-датчики)
Температурные логи	Характеристика	Ситуация	Термодатчики
Нормы давления в технологиях	Критерий	Решение	Технические регламенты
Инструкция по наладке станка	Описание решения	Сценарий	Система удаленного мониторинга

3. Уровень системы

На этом уровне содержатся стратегические показатели, касающиеся общих направлений деятельности предприятия, таких как инвестиции в повышение качества, сертификация систем менеджмента качества и другие. Информация поступает из баз данных руководства и отчетов по эффективности (см. таблицу 3.6).

Таблица 3.6 Пример данных о качестве системе

Название данных	Связь с СОП	Уровень решения	Источник данных
Бюджет на развитие технического контроля и СМК	Характеристика	Решение	Финансовые отчеты
Сертификаты ГОСТ Р ИСО 9001-2015	Характеристика	Ситуация	ДО
Критерии выбора поставщиков	Критерий	Решение	Регламенты закупок
Стратегия развития качества	Описание решения	Решение	Стратегические планы руководства
Уровень соответствия СМК	Мера	Ситуация	Результаты внешних аудитов
Тренды внедрения ИС СМК	Характеристика	Сценарий	Отчеты по внедрению ИТ-систем
План корректирующих действий	Описание решения	Решение	Отчёты по результатам аудитов
Нормативы обучения персонала	Критерий	Решение	HR-системы

Для обеспечения эффективного обмена информацией между уровнями применяется синхронизация через онтологическую модель, которая устанавливает

связи между характеристиками уровней (Ch) их мерами (L), а также учитывает нормативы всех уровней (Cr) при идентификации ситуаций, формировании решений и отборе сценариев.

Модель данных предприятия, реализованная в СОП, описывается как: $D^{ent} = \langle Ch^{ent}, L^{ent}, Cr^{ent}, E^{ent} \rangle$, где Ch^{ent} – множество характеристик, отражающих свойства объектов на уровнях продукта, процесса и системы, L^{ent} – шкалы измерения характеристик (количественные, качественные, нечёткие), Cr^{ent} – критерии выбора и анализа, основанные на нормативах и правилах, E^{ent} – оценки эффективности идентификации ситуаций и реализаций решений.

Модель служит основой для трёхуровневой структуры принятия решений: идентификация ситуации, выбор решения и реализация сценария на основе характеристик и критериев. Рассмотрим связь с модульной архитектурой (см. формулу (3.1)) по таблице 3.7.

Таблица 3.7 Привязка к модульной архитектуре

Название модуля	Характеристики	Меры	Критерии	Оценки
Модуль предобработки онтологических данных	Онтологии уровня ситуации	Формализация OWL	Правила интерпретации	Точность входных данных
Модуль анализа данных	Данные IoT-датчиков, цифрового следа	Числовые и категориальные меры	Алгоритмы ML / нечёткой логики	Воспроизводимость вывода
Модуль принятия решений	Характеристики ситуаций	Шкалы значимости и неопределённости	Критерии выбора решения	Объяснимость и согласованность
Модуль обратной связи	Изменения в характеристиках	Временные метрики обновления	Правила актуализации правил	Релевантность знаний

Следовательно, модель данных интегрирована в архитектуру СППР, а каждый её элемент используется конкретным модулем для выполнения функции.

Трёхуровневое хранилище данных включает три специализированные базы: для уровня продукта – дефекты и результаты испытаний, для уровня процесса – параметры и журналы аудитов, для уровня системы – нормативы, инвестиции, KPI. Дополнительно для решения задач в нетиповых ситуациях создаётся база знаний, основывающаяся на базе данных, в которой хранятся данные для применения методов борьбы с неопределённостью. Нечёткая логика и машинное обучение

формализуют неопределённые ситуации. Они пополняют правила вывода по данным из трёхуровневого хранилища.

Синхронизация между уровнями выполняется через ключевые поля и модуль обратной связи. Таким образом обеспечивается целостность данных, устойчивость к изменениям и снижается их дрейф.

Пример: дефект регистрируется на уровне продукта (база №1), анализируется на уровне процесса (база №2) и служит основой для стратегических решений на уровне системы (база №3). Нетиповые и кросс-уровневые ситуации требуют интеграции данных и применения методов ИИ, таких как нечёткая логика, кластеризация и деревья решений.

Модель данных создаёт основу для хранилища знаний и дальнейшей обработки ситуаций (§3.3).

3.1.3 Модель данных и организация хранилища для реализации СОП

Для практической реализации СОП в СППР необходимо спроектировать структуру данных, которая будет отражать: множества ситуаций, решений и сценариев, множества характеристик, мер, критериев выбора решения и оценок результативности. На основе модульной архитектуры и трёхуровневой модели данных разработана структура базы знаний, ориентированная на практическое применение СОП в промышленности.

Согласно формальному определению, «база знаний представляет собой базу данных специального вида совместно со специализированным механизмом ввода-вывода» [110]. База знаний спроектирована как:

$$KB = \langle S, D^S, P^{DS}, Cr, Df \rangle, \quad (3.2)$$

где S – множество ситуаций, D^S – решения, P^{DS} – сценарии их реализации, Cr – критерии выбора, Df – цифровой след для актуализации правил. База знаний (KB) связана с моделью $Arch$ (см. формулу 3.2). Структура KB хранит причинно-следственные графы, цифровой след и пополняется новыми ситуациями и решениями. Обратная связь от ЛПР обеспечивает автоматическое обучение и актуализацию правил. Причём цифровой след фиксируется триггерными записями в базе (действия ЛПР, результаты решений).

Непротиворечивость модели данных поддерживается через ссылочную целостность и уникальность ключей.

Концептуальная структура реляционной БД для базы знаний [123] показана на рис. 3.2.

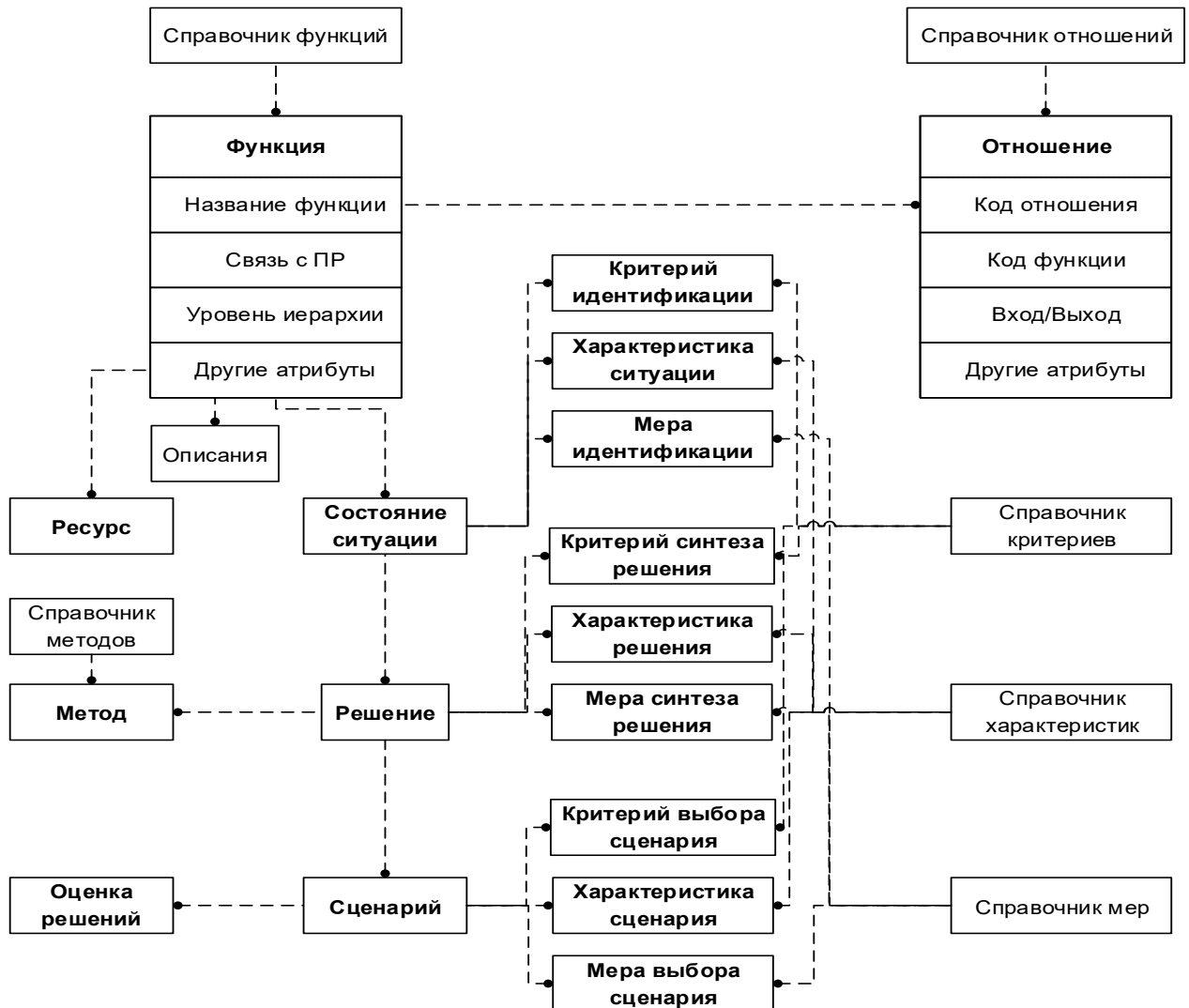


Рисунок 3.2 – Информационная модель данных, используемых для организации базы знаний

Предложенная модель данных реализует СОП в форме реляционной базы знаний, где каждая компонента *КВ* представлена в виде таблиц. Она обеспечивает объяснимость, воспроизводимость и согласованность вывода, поддерживает цифровой след и актуализацию правил через обратную связь.

Интеграция с модульной архитектурой и трёхуровневой моделью предприятия делает хранилище данных универсальным инструментом для работы с ситуациями

разных типов, что поддерживает достижение цели разработки адаптивных инструментов СППР.

3.1.4 Интеграция разработанных методов в модульную архитектуру СППР

Модульная архитектура СППР обеспечивает последовательное выполнение операций анализа данных, принятия решений и предоставления обратной связи.

Модули СППР имеют чёткое назначение. Модуль предобработки переводит OWL-онтологии в ТММ для алгоритмического анализа. Модуль анализа нормализует, агрегирует и дискретизирует данные, выявляет аномалии и классифицирует дефекты. Модуль принятия решений – ядро системы, он выбирает и формализует решения по типу и уровню ситуации. Модуль обратной связи фиксирует результаты и обновляет знания через цифровой след. Дополнительные блоки выполняют адаптацию, обучение и представление знаний. Подробнее описание модулей и их связь с СОП см. в таблице 3.8.

Таблица 3.8 Интеграция методов СОП в модульную архитектуру СППР

Модуль СППР	Функция модуля	Конкретные методы	Пояснение
Предобработка онтологической информации	Преобразование OWL-моделей для алгоритмического анализа	Метод ДНП OWL ↔ модель СОП, модель Трёхуровневой проверки (синтаксис–семантика–прагматика)	Обеспечивает синхронизацию онтологий с ТММ и проверку корректности на всех уровнях: продукта, процесса и системы
Анализ данных	Очистка, нормализация, обнаружение аномалий	Метод дискретизации ситуаций на основе теории расписаний, интеллектуальная подсистема обработки данных, K-means, DBSCAN, CNN, LSTM [50, 54]	Поддерживает анализ структурированных и неструктурированных данных, включая изображения и временные ряды
Принятие решений	Выбор и формализация решения	ТММ ситуации, модель классификации решений, метод подбора алгоритма принятия решений, адаптированный метод нечёткого вывода, метод кросс-уровневого согласования онтологий	Обеспечивает адаптивный выбор метода и согласованность решений между уровнями продукта, процесса и системы
Обратная связь	Фиксация результатов и обучение системы	Адаптированный метод цифрового следа, метод самообучения модели через обратную связь, контрольные карты [91], RL-агенты [39]	Реализует механизм самообучения и мониторинг дрейфа данных на основе цифрового следа
Блок адаптации	Автоматический выбор алгоритмов	Метаобучение, метод поддержания актуальности модели	Подбирает методы в зависимости от типа ситуации
Блок обучения	Обновление правил и онтологий	Метод поддержания актуальности модели, адаптация PDCA для динамических условий	Обеспечивает актуализацию знаний и интеграцию цикла непрерывного улучшения
Блок представления знаний	Визуализация и объяснение решений	Метод визуализации ПСС, методика объяснимости решений, метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО, причинно- следственные графы [87]	Обеспечивает прозрачность выводов, генерацию пояснений и интеграцию с ДО

Таблица 3.8 отражает встраивание методов СОП в модули СППР.

Пять критериев (см. таблицу 3.9) оценивают эффективность алгоритмов в СППР.

Таблица 3.9 Оценка алгоритмов: точность, адаптивность, объяснимость, скорость, устойчивость

Название	Описание	Рекомендации
Точность решений	Степень корректности принимаемых решений: для типовых ситуаций – до 95% (экспертные системы, статистика), для нетиповых – до 80% (гибридные модели)	В типовых ситуациях использовать жёсткие правила и статистический анализ; в нетиповых применять нейро-нечёткие системы и гибридные модели
Скорость обработки	Время, необходимое для анализа данных и формирования решения; увеличение на 30-40% достигается за счёт оптимизации модулей предобработки и анализа	Оптимизировать модули предобработки за счёт параллелизации вычислений и кэширования SPARQL-запросов к онтологии
Адаптивность	Меняет параметры в реальном времени; использует обучение с подкреплением и метаобучение [19]	В кросс-уровневых и нетиповых ситуациях настроить адаптацию весов признаков на основе цифрового следа и анализа дрейфа данных
Интерпретируемость	ЛПР понимает логику решений, использует инструменты: нечёткая логика (Такаги-Сугено [78]) и визуализации ПСС [87]	Визуализацию ПСС адаптировать под уровень пользователя: для операторов – упрощённые схемы, для руководителей – причинно-следственные деревья с нормативными ссылками
Устойчивость к дрейфу данных	Сохраняет точность при изменении данных, обеспечивается онлайн-обучением и контрольными картами	Внедрить модуль обратной связи с периодическим пересмотром порогов контрольных карт и дообучением модели на новых данных

Критерии из таблицы 3.9 охватывают точность, адаптивность, интерпретируемость, скорость и устойчивость.

Детальные шаги метода применения СОП к интеллектуальной поддержке принятия решений в сфере обеспечения качества промышленных предприятий описаны в §4.1.1.

3.2 Разработка метода подбора ИИ-алгоритма

3.2.1 Классификация ИИ-подходов по типам ситуаций

При разработке адаптивной СППР в рамках СОП необходимо учитывать, что не все ситуации одинаковы по уровню неопределённости, повторяемости и влиянию на обеспечение качества. Для разных типов ситуаций требуются разные классы ИИ-методов. Здесь предложена классификация методов принятия решений, учитывающая их применимость в зависимости от уровня неопределённости и

повторяемости, типа и характера ситуации по времени (реактивные или проактивные).

Определим возможные методы принятия решений для типов ситуаций (см. таблицу 3.10).

Таблица 3.10 Классификация методов принятия решений по типам ситуаций и критериям выбора

Тип ситуации	Метод	Ключевые критерии выбора	Характер ситуации
Типовая	Квалиметрические методы [163, 179]	Повторяемость $\geq 80\%$, чёткость данных $\geq 80\%$, степень формализации $\geq 80\%$	Реактивная
	Статистические методы (контрольные карты Шухарта) [91]	Повторяемость $\geq 70\%$, размер выборки ≥ 30 , стабильность процесса $\geq 90\%$	Реактивная
	Жесткие экспертные системы (жёсткие правила на основе нормативов) [26]	Чёткость данных $\geq 90\%$, время реагирования ≤ 1 мин, степень формализации = 100%	Реактивная
	Эвристические методы (стандартные алгоритмы) [193]	Чёткость данных $\geq 60\%$, уровень шума $\leq 20\%$, согласование мнений, количество экспертов ≥ 5	Реактивная
Нетиповая	Нечёткая логика (использование нечётких лингвистических переменных) [78]	Уровень неопределённости $\geq 60\%$, адаптивность высокая, точность $\geq 80\%$	Проактивная
	Машинное обучение (анализ аномалий) [12, 88, 236]	Уровень неопределённости $\geq 70\%$, объём данных ≥ 200 , интерпретируемость средняя	Реактивная / Проактивная
	Нейронные сети (глубокое обучение для анализа отклонений) [222]	Уровень неопределённости $\geq 70\%$, объём данных ≥ 200 , сложность модели – средняя	Проактивная
	Аналитические методы (сценарии через причинно-следственные графы) [89]	Уровень неопределённости $\geq 80\%$, объём данных ≥ 300 , устойчивость к выбросам – высокая	Реактивная
	Методы экспертных оценок (Delphi) [204]	Высокая неопределённость, необходимость согласования мнений и уровень компетенций	Проактивная
Кросс-уровневая	Онтологические сценарии (OWL-модели) [125]	Влияние на другие уровни ≥ 3 связи, критичность ≥ 0.8 , высокая объяснимость	Проактивная
	Экспертные панели (совещания с участием специалистов разных направлений) [201]	Влияние на другие уровни ≥ 5 связей, необходимость моделирования долгосрочных эффектов	Проактивная
	Аналитические методы (линейное программирование) [83]	Необходимость моделирования последствий, критичность решения ≥ 0.7	Проактивная
	Многокритериальный анализ (многокритериальные взвешенные оценки) [224, 235]	Сложные ситуации, высокая степень согласования, детализация модели – высокая	Проактивная
	Прогнозирование последствий решений (цепь Маркова) [82, 215]	Критичность решения ≥ 0.8 , необходимость прогнозирования, адаптивность – высокая	Проактивная

Классификация охватывает методы от жёстких экспертных систем до машинного обучения и нечёткой логики. Выбор метода зависит от типа ситуации, уровня неопределённости и требований к объяснимости (см. таблицу 3.10). На основе этой классификации в следующем параграфе формализован метод выбора алгоритма через матрицу критериев и многокритериальную оценку.

3.2.2 Метод выбора алгоритма на основе матрицы критериев

Методов для подбора алгоритма принятия решения очень много [16, 118, 159, 193, 204, 223, 256]. Для практической реализации СОП необходимо формализовать механизм выбора ИИ-алгоритма, адаптированный к уровню управления и типу ситуации. Разработаем метод, основанный на матрице критериев и взвешенной оценке, чтобы системно подходить к выбору ИИ-подхода, снизить субъективность и увеличить объяснимость вывода, а также обеспечить согласованность на всех уровнях принятия решений.

Критерии и метрики для выбора алгоритмов принятия решений (см. таблицу 3.11).

Таблица 3.11 Критерии и метрики для выбора алгоритмов принятия решений

Критерий	Метрика	Описание
1. Время реакции	Время обработки данных (секунды/минуты)	Важен для автоматических решений на уровне продукта
2. Уровень неопределённости	Коэффициент нечёткости (0–1)	Чем выше, тем чаще применяются методы нечёткой логики [106]
3. Влияние на другие уровни	Количество связанных онтологических сущностей	Для кросс-уровневых ситуаций
4. Стандартизация процессов	Процент соответствия стандарту	Определяет приоритет жёстких правил «Если - то» [26]
5. Объём данных	Количество параметров на входе (штуки)	Для машинного обучения (нейронные сети) при больших данных [28, 52]
6. Требования к объяснимости	Количество онтологических связей в выводе (штуки)	Для методов с прозрачными решениями
7. Ресурсоёмкость	Затраты ресурсов (человеко-часы / рубли)	Ограничивает применение Цепей Маркова [82, 215] на уровне продукта
8. Частота повторений	Процент аналогичных ситуаций в год (%)	Высокая частота – жёсткие алгоритмы, низкая – машинное обучение
9. Критичность решения	Коэффициент риска (от 0 до 1)	Для системы управления – онтологические сценарии [203]
10. Нормативное соответствие	Да / нет	Требует интеграции OWL-моделей [125]

Определим шаги для выбора метода принятия решений для разных уровней принятия решений в сфере обеспечения качества с использованием матрицы (см. таблицу 3.11):

1. Определение типа ситуации через онтологическую модель (риск, неопределённость, повторяемость).

2. Оценка критериев с использованием метрик (например, время реакции, уровень неопределённости).

3. Сопоставление типа ситуации и уровня управления с соответствующим методом в матрице на основе указанных в ней критериев.

4. Адаптация метода через интеграцию с онтологическими связями, например, добавление новых правил OWL для уточнения критериев выбора.

Для практической реализации метода разработаем матрицу, сопоставляющую уровни управления качеством с типами ситуаций и соответствующими методами, что отражает системный подход к управлению сложными системами (см. таблицу 3.12).

Таблица 3.12 Матрица отбора методов принятия решений по уровням управления

Уровень	Тип ситуации	Критерии	Метод
Продукт	Типовая	Время реакции ≤ 1 минута; Чёткость критериев = 100%; Нормативное соответствие = 100%	Жёсткие правила (экспертные системы)
	Нетиповая	Уровень неопределённости $\geq 60\%$; Объём данных ≥ 100 параметров; Недостоверность $\leq 15\%$	Метод Такаги-Сугено + нейронные сети
	Кросс-уровневая	Влияние на другие уровни ≥ 3 связей; Критичность решения ≥ 0.8 ; Нормативное соответствие = 100%	Онтологические сценарии + Цепь Маркова
Процесс	Типовая	Чёткость данных $\geq 90\%$; Ресурсоёмкость ≤ 100 FLOPS; Повторяемость $\geq 80\%$	Статистические методы (контрольные карты, ANOVA) [91]
	Нетиповая	Уровень неопределённости $\geq 70\%$; Наличие аналогов = 0; Время реагирования = среднее/длительное	Машинное обучение + аналитические графы (ПСС)
	Кросс-уровневая	Многоуровневость = 2+ уровня; Каскадные эффекты ≥ 3 этапов; Организационная готовность $\geq 7/10$	Линейное программирование + экспертные панели
Система	Типовая	Стандартизация процессов = 100%; Чёткость требований = 100%; Недостоверность данных = 0%	Жёсткие правила + квалитетические методы
	Нетиповая	Уровень неопределённости $\geq 80\%$; Наличие исторических данных = да; Ресурсоёмкость ≥ 500 FLOPS	Нейронные сети + многокритериальный анализ
	Кросс-уровневая	Многоуровневость = 3+ уровня; Критичность решения ≥ 0.9 ; Временная динамика = каскадная	Онтологические сценарии + Цепь Маркова

Матрица служит рекомендательной основой, а на практике критерии уточняются под конкретную ситуацию.

Наиболее простым способом выбора метода будет анализ его релевантности для рассматриваемой предметной области методом многокритериальных взвешенных оценок [235], который позволяет противопоставить взвешенные критерии по разным характеристикам выбираемым элементам и по рассчитанной сумме выбрать нужный.

Рассмотрим критерии оценки соответствия метода требованиям предметной области (см. таблицу 3.13).

Таблица 3.13 Критерии оценки методов ИППР

Критерий	Описание
Объяснимость результата	Обеспечивает прозрачность и понятность решений, особенно важна для доверия ЛПП в кросс-уровневых ситуациях
Устойчивость к неопределённости	Способность метода работать с неполными или размытыми данными, характерными для нетиповых ситуаций
Сложность реализации	Оценка трудозатрат и ресурсов, необходимых для внедрения; позволяет выбирать между простыми и сложными подходами
Адаптивность к новым условиям	Способность метода быстро адаптироваться к изменениям в процессах, нормативах или внешней среде
Точность прогнозирования	Способность метода генерировать надёжные и точные прогнозы; критична в задачах с высокими требованиями к качеству
Влияние на другие уровни управления	Оценка степени воздействия решения на смежные уровни (продукт, процесс, система); ключевое для кросс-уровневых ситуаций
Уровень неопределённости	Степень неопределённости ситуации; определяет выбор между жёсткими правилами и вероятностными/нечёткими методами

Соотнесение методов и критериев производится по методу взвешенной суммы [196, 223] при помощи шаблона таблицы, приведённого в таблице 3.14:

Таблица 3.14 Шаблон таблицы многокритериального выбора класса метода принятия решений

Показатель	Вес	Класс методов		
		1	...	n
показатель 1	Вес 1	Значение 1.1	...	Значение 1.n
...			...	
показатель m	Вес m	Значение m.1	...	Значение m.n
Сумма		Сумма 1	...	Сумма n

Оценку для выбранного метода SM_j по столбцу j таблицы 3.14 можно получить, используя следующее выражение:

$$SM_j = \sum_{i=1}^n w_i e_{ij}, \quad (3.3)$$

где n – число показателей (строк в таблице); w_i – вес показателя в i -й строке; e_{ij} – оценка метода j по показателю i .

Лучшим результатом, который следует выбрать $SM_{best} = \max (SM_j)$.

В [96] приведены экспертные данные о сравнении характеристик каждого типа методов принятия решений (алгоритмов решения).

Для выбора метода использованы дополнительные показатели (см. таблицу 3.15).

Таблица 3.15 Дополнительные показатели для выбора метода принятия решений

Критерий	Описание	Пример
Важность последствий	Степень потенциального ущерба при ошибочном решении	Неверное решение в конструкции планера летательного аппарата может привести к аварии
Точность решений	Способность метода генерировать устойчивые и корректные решения в заданном контексте	Решение «уволить работника за брак» может быть корректным в условиях высокой безработицы, но ошибочным при дефиците кадров
Сложность принятия решений	Многофакторность ситуации, определяющая уровень анализа и квалификации ЛПР	Контролёр, что оценивает геометрические размеры, работает в более простых условиях, чем специалист по силовой установке
Оперативность принятия решений	Влияние временных рамок на результативность решения	Отчёт, сданный с опозданием, теряет свою ценность, даже если выполнен качественно
Осуществимость решения	Практическая реализуемость решения в условиях предприятия	Увеличение эффективности контроля в 10 раз возможно, но рост выявления дефектов на 1000% недостижим

Примеры применения критериев:

1. Уровень продукта: для типовых ситуаций (*например*, контроль размеров детали) критичны время реакции (≤ 1 минута) и нормативное соответствие (100% соответствия ТУ). Метод: экспертиза с жёсткими правилами.

2. Уровень процесса: при нетиповых ситуациях (критические дефекты) важны объём данных (> 100 параметров) и уровень неопределённости (≥ 0.6). Метод: машинное обучение.

3. Уровень системы: для кросс-уровневых ситуаций (системные жалобы клиентов) ключевые влияние на другие уровни (≥ 3 связи) и критичность решения (риск ≥ 0.8). Метод: онтологические сценарии.

Примеры продемонстрировали, как матрица критериев и многокритериальная помогают выбрать метод, соответствующий уровню управления и типу ситуации. Реализуется два этапа: сначала определяется класс метода (экспертный, аналитический, интеллектуальный), а потом конкретный алгоритм из этого класса. Обобщённая процедура выбора представлена на рисунке на рис. 3.3.

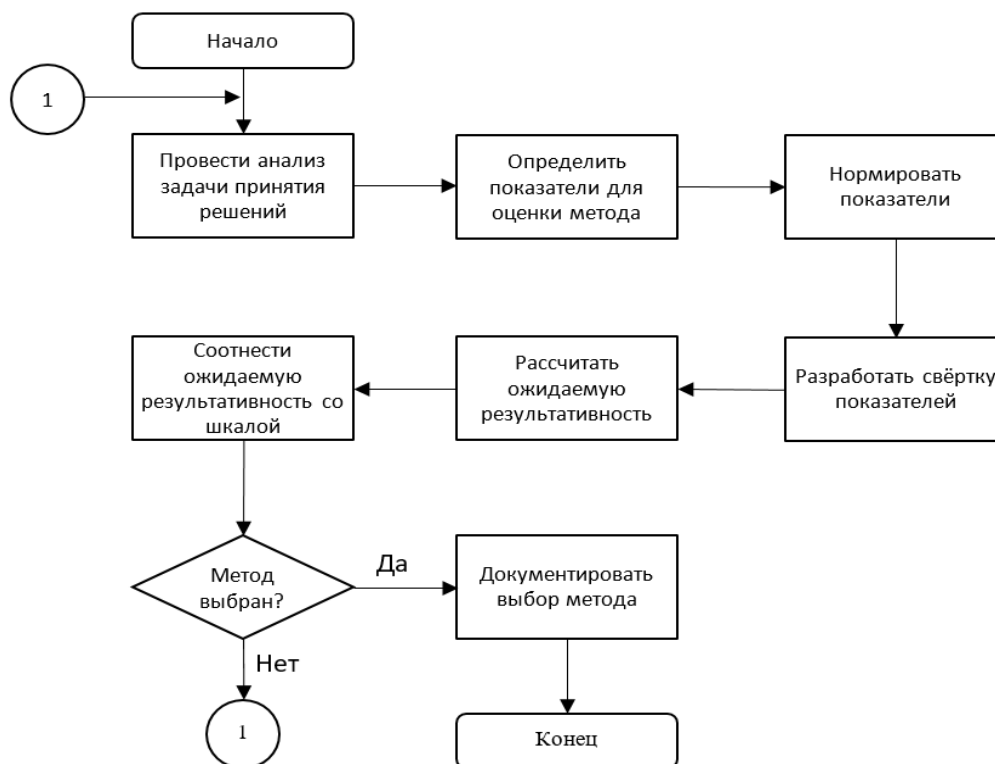


Рисунок 3.3 – Алгоритм определения класса методов для принятия решения

Применение метода иллюстрируют два примера (см. таблицу 3.16).

Таблица 3.16 Примеры ситуаций с дефектом продукции (типовая ситуация) и аудитом качества (нетиповая)

Тип ситуации	Описание	Характеристики и правила	Алгоритм	Результат
Типовая	Идентификация дефекта продукции на этапе контроля	- % брака: критический $\geq 15\%$, высокий $\geq 10\%$, средний $\geq 5\%$, низкий $< 5\%$ - Повторные дефекты: много ≥ 5, умеренно 3–4, мало 0–2 - Критические дефекты: да / нет - Правила: если % брака $\geq 15\% \rightarrow$ остановка приёмки; если повторные дефекты ≥ 5 и соответствие размеров = нет $\rightarrow$ остановка участка	Жёсткий алгоритм на основе правил	Высокая объяснимость и скорость реакции (≤ 1 мин), что соответствует требованиям уровня продукта
Нетиповая кросс-уровневая	Классификация наблюдений при аудите качества	- Влияние на продукцию: 0–100% - Тяжесть последствий: от «нет потерь» до «критические потери» - Место обнаружения: основные / критические / вспомогательные процессы	Метод k-ближайших соседей [12, 31], обученный на 40 примерах	Результат: «Значительное несоответствие» – совпадает с выводом эксперта; точность – 70%, средняя объяснимость

Разработан метод выбора ИИ-алгоритма на основе матрицы критериев и взвешенной оценки (формула 3.3). Он определяет подход по типу ситуации и уровню управления, снижая субъективность и повышая объяснимость и воспроизводимость решений.

3.3 Интеллектуальная подсистема СППР

3.3.1 Обработка ситуаций в интеллектуальной подсистеме

Интеллектуальная подсистема работает с разнородными данными. Тип ситуации определяет выбор метода: жёсткие правила, нечёткая логика или машинное обучение. Такой подход снижает неопределённость.

Пример архитектуры интеллектуальной подсистемы на рисунке 3.4 [97].

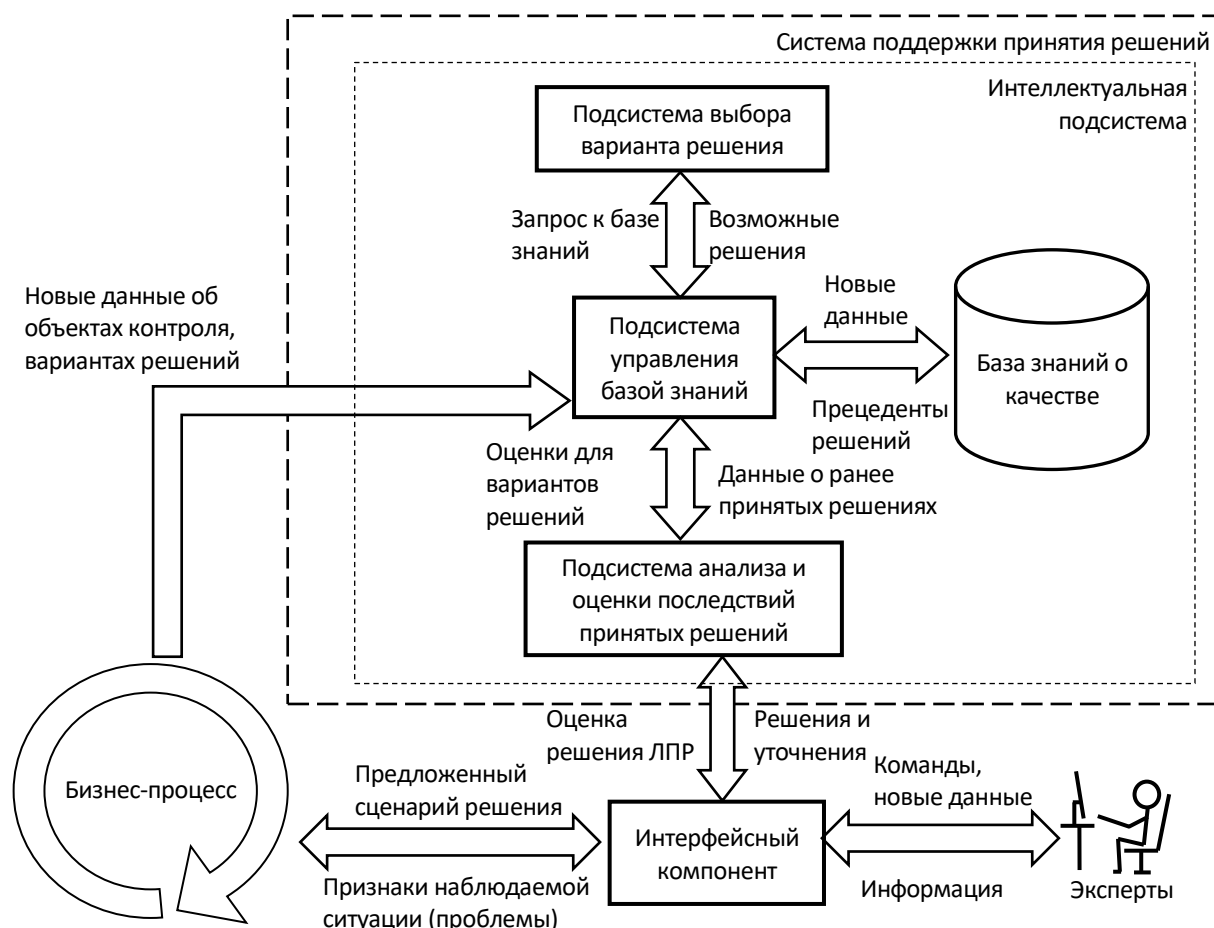


Рисунок 3.4 – Пример схемы работы СППР с интеллектуальной подсистемой

Подсистема обрабатывает ситуацию по шагам:

- определяет тип ситуации по онтологической модели $S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle$;
- выбирает ИИ-метод по матрице критериев;
- готовит данные (нормализация, фильтрация, преобразование в OWL/JSON);
- формирует решение (жёсткие правила, машинное обучение, нечёткая логика);
- передаёт результат в обратную связь и актуализирует знания через цифровой след.

Формально интеллектуальная подсистема может быть представлена как: $IS^{data} = \langle D^S, F^{ML}, F^{fuz}, Df \rangle$, где D^S – множество решений, формируемых в зависимости от ситуации, F^{ML} – алгоритмы машинного обучения для анализа нетиповых и кросс-уровневых случаев, F^{fuz} – методы нечёткой логики для работы с недостоверными данными, Df – цифровой след для актуализации правил и самообучение модели.

Данный подход позволяет гибко реагировать на изменяющиеся условия среды, минимизировать ошибки интерпретации за счёт объяснимости вывода и повысить согласованность уровней управления через онтологическую интеграцию.

Модель IS^{data} является ядром интеллектуальной подсистемы СППР, которая взаимодействует с хранилищем данных, модулем принятия решений и системой обратной связи, согласно трёхуровневой структуре (формула 3.1).

Подсистема обрабатывает данные в реальном времени, комбинируя ИИ-методы, что напрямую определяет T^{resp} .

Таким образом, предложенная модель IS^{data} обеспечивает гибкую обработку ситуаций разного уровня неопределённости и интеграцию гибридных ИИ-подходов в единую систему, что делает возможным адаптивное принятие решений в условиях промышленного производства, что особенно важно при обеспечении качества в кросс-уровневых ситуациях.

3.3.2 Формализация обновления базы знаний в рамках СОП

Обработка ситуаций в интеллектуальной подсистеме СППР требует не только выбора ИИ-подхода, но и актуализации знаний.

Предлагается использование онтологической модели, которая, с одной стороны, формируется во многом на базе нормативного базиса промышленного предприятия, а с другой стороны, может служить источником для его оформления. Пример реализации данного подхода в образовательной деятельности показан в [176]. Обобщённая схема функционирования системы показана на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 – Схема функционирования базы знаний

В режиме эксплуатации база знаний функционирует как источник данных для ЛПР. В нём используется информация, накопленная в системе. В режиме обучения база знаний, напротив, расширяется за счёт новой информации о процессах, ситуациях, точках принятия решений, сценариях и правилах их взаимосвязи.

Подходы к накоплению знаний в соответствующих базах основываются на четком определении множества компонентов C , правил Cr и результатов V . Каждый компонент базы знаний $c \in C$ может проходить операции создания, добавления, удаления или обновления.

Рассмотрим операции по работе с множеством компонентов C .

1. Создание нового компонента

Если появляется новый элемент $\{c^{new}\} \notin C$, он добавляется в базу через операцию объединения: $C = C \cup \{c^{new}\}$.

2. Добавление компонента

Для расширения существующего описания используется добавление нового элемента $\{c^{add}\} \in C$: $C = C \cup \{c^{add}\}$.

3. Удаление компонента

Если компонент $\{c^{del}\}$ устарел или стал нерелевантным, он удаляется через операцию пересечения: $C = C \setminus \{c^{del}\}$.

4. Обновление компонента

Процесс обновления компонента $\{c^{upd}\}$ выполняется за два шага:

- удаление старого компонента: $C = C \setminus \{c^{upd_old}\}$;
- добавление нового компонента: $C = C \cup \{c^{upd}\}$.

Рассмотрим операции по работе с множеством правил Cr

Правила $cr \in Cr$ формируют связи между компонентами $c \in C$ и их результатами $v \in V$. Если правило cr не даёт корректного перехода $c \rightarrow v$, его модифицируют или удаляют:

1. Создание (cr^{new}): $Cr = Cr \cup \{cr^{new}\}$.
2. Обновление (cr^{upd}): $Cr = (Cr \setminus \{cr^{upd_old}\}) \cup \{cr^{upd}\}$.
3. Удаление (cr^{del}): $Cr = Cr \setminus \{cr^{del}\}$.

Операции поддерживают базу знаний в актуальном состоянии. Дают гибкость и устойчивость к изменениям – значимо для нетиповых и кросс-уровневых ситуаций. Операции над множествами Ch^S, L^S, Cr^S, E^S формализованы в СОП (см. §2.1.4). В интеллектуальной подсистеме СППР их выполняет модуль обратной связи. Он интегрирован в модульную архитектуру и общается с ядром через API.

Следовательно, формализация обновления знаний через операции над множествами и интеграция цифрового следа делает интеллектуальную подсистему адаптивной и воспроизводимой.

3.4 Разработка метода согласования онтологий уровней принятия решений

3.4.1 Метод кросс-уровневого согласования онтологий

Для обеспечения согласованности вывода на уровнях продукта, процесса и системы СППР опирается на онтологические модели (см. рисунок 3.6), которые классифицируют понятия по тематическим признакам (отраслевая принадлежность, связь с процессами), обеспечивают точность и воспроизводимость данных и служат основой для системной интеграции знаний и согласования мнений экспертов.

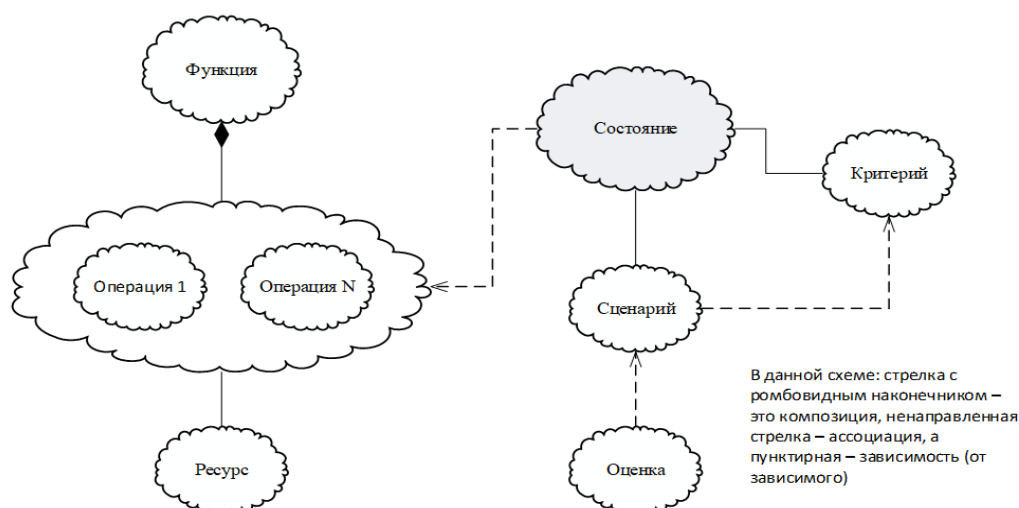


Рисунок 3.6 – Пример концептуальной схемы онтологической модели

Интеграция онтологий с БП основана на принципах, перечисленных в таблице 3.17.

Таблица 3.17 Принципы интеграции онтологий в бизнес-процессы и информационные системы

Принцип	Описание	Пример
Согласованность с этапами БП	Онтологии адаптируются к этапам жизненного цикла продукции, обеспечивая непрерывность управления и автоматизацию контроля	Использование ERP-систем для контроля геометрических параметров на этапе производства снижает ошибки и повышает эффективность
Обеспечение совместимости данных между уровнями управления	Применение общих онтологических категорий устраняет информационные разрывы между уровнями (продукт, процесс, система)	Трёхуровневое хранилище данных обеспечивает целостность анализа и прогнозирования за счёт интеграции данных с разных уровней управления
Модульность архитектуры СППР	Модульный подход обеспечивает гибкость и масштабируемость системы. Онтологии и компоненты СППР организованы в независимые модули, допускающие расширение и обновление	Гибкая архитектура позволяет добавлять новые модули (например, по контролю качества) без нарушения функционирования существующих компонентов СППР
Обучение и вовлечение персонала	Цифровой след фиксирует экспертный опыт и используется для обучения сотрудников, формирования баз знаний и автоматизации рутинных процессов [27]	Зафиксированные решения по устранению дефектов включаются в обучающие модули для инженеров и используются для автоматического формирования рекомендаций

Данные принципы легли в основу разработанного метода согласования онтологий, ориентированного на устранение кросс-уровневых разрывов и повышение согласованности вывода.

Кросс-уровневые разрывы возникают из-за дисбаланса в знаниях и нормативах между уровнями управления, как было показано в §1.1.3. Для системного устранения кросс-уровневых разрывов и обеспечения согласованности вывода между уровнями продукта, процесса и системы разработаны и применены

следующие методы и инструменты системной интеграции, которые различаются по уровню формализации, объяснимости и воспроизводимости (см. таблицу 3.18).

Таблица 3.18 Методы и инструменты устранения кросс-уровневых разрывов

Метод	Назначение	Особенности	Метрика	Связь с модулем
Интеграция онтологических моделей [125]	Создание единого представления о предметной области на уровнях продукта, процесса и системы	Использование OWL-моделей, формализация знаний, согласование правил	K^{agr}, XAI	Интеграция в модуль принятия решений и хранилище знаний
Причинно-следственный анализ (метод «пяти почему») [104]	Выявление первопричин, вызывающих кросс-уровневые разрывы	Простота, доступность, применимость в реактивных ситуациях	$\Delta E, IA$	Поддержка модуля анализа данных и обратной связи
ТММ классификации решений (§2.1.5)	Системный взгляд на принятие решений с учётом уровней управления	Формализация $S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle, D^S, P^{DS}$	K^{agr}, IA, XAI	Интеграция в модуль принятия решений и хранилище знаний
Гибридные методы (онтологии и машинное обучение) [82, 215]	Прогнозирование рисков и согласование решений	Объединение SWRL-правил и моделей ML, прогнозирование через цепи Маркова	$IA, \Delta E, K^{agr}$	Использование в модуле анализа данных и обратной связи
Визуализация связей через онтологические графы [62]	Обнаружение слабых мест и упрощение понимания междуровневых связей	Использование графов и визуальных инструментов (GraphDB, Protege)	XAI, K^{agr}	Модуль визуализации и анализа
Онтологические сценарии [203]	Согласование решений на разных уровнях управления	Предоставление альтернативных вариантов развития событий	K^{agr}, IA	Модуль принятия решений и сценариев

Представленные в таблице 3.18 методы и инструменты системной интеграции направлены на устранение кросс-уровневых разрывов и обеспечение согласованности вывода в условиях нетиповых и междуровневых взаимодействий, обеспечивая повышение объяснимости (XAI) и согласованности (K^{agr}), снижение ошибок интерпретации (ΔE).

Автоматическая актуализация онтологий играет значимую роль в поддержании релевантности СППР в условиях динамичного производства. Цифровой след (Df) и обратная связь обновляют знания – система реагирует на изменения в нормативах, оборудовании и процессах.

Правила обновления онтологий:

- при уточнении нормативов система находит устаревшие сущности и обновляет их по новым требованиям;
- при изменении условий добавляются новые элементы (например, оборудование), связи корректируются семантическими правилами.

Работа СППР с кросс-уровневыми ситуациями требует согласованности решений между уровнями продукта, процесса и системы. Интеграция уровней устраняет информационные разрывы и обеспечивает единую логику решений – оперативных, тактических и стратегических. Для этого разработан подход к согласованию данных за счёт теоретико-множественных преобразований и онтологических графов. Он формирует единую интерпретацию характеристик и критериев на всех уровнях. В основе подхода лежит механизм выбора метода согласования, зависящего от степени неопределённости, объяснимости требований и необходимости интеграции знаний (см. таблицу 3.19).

Таблица 3.19 Пример выбора метода согласования решений на основе многокритериальной взвешенной оценки

Показатель	Вес	Оценка по классам методов			
		Нечёткая логика	Машинное обучение	Жёсткие правила	Онтологический сценарий
Объяснимость результата	0.3	8 / 10	5 / 10	10 / 10	9 / 10
Устойчивость к неопределённости	0.4	8 / 10	8 / 10	3 / 10	7 / 10
Сложность реализации	0.1	7 / 10	6 / 10	9 / 10	6 / 10
Адаптивность к новым условиям	0.2	6 / 10	8 / 10	4 / 10	8 / 10
Сумма		7.5	6.7	5.9	7.7

Все значения для метода в таблице являются оценками экспертов, где 10 – максимальная степень проявления свойства, а 0 – его полное отсутствие.

На основе метода многокритериальных взвешенных оценок по формуле 3.3 получаем, что $SM_{best} = 7,7$ соответствует онтологическому сценарию.

Введём метрику – коэффициент согласованности решений (K^{agr}), которая служит основой для актуализации модели знаний и пополнения базы правил. Данный коэффициент можно рассчитать как: $K^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i * A_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$, где w_i – вес, а A_i – степень согласованности на i -м уровне (0-1), n – число уровней (продукт, процесс, система). Если веса нормированы $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, то $K^{agr} = \sum_{i=1}^n w_i * A_i$. Веса определяются экспертно по значимости уровня для конкретной ситуации. Коэффициент K^{agr} показывает качество знаний в модели. При падении ниже 0.7 он запускает автоматическое обновление правил и функций принадлежности.

Например, для ситуации отказа, требующего замены оборудования (кросс-уровневая ситуация) введём степени согласованности: продукт $A_1=0.9$, $w_1= 0.6$; процесс $A_2=0.9$, $w_2= 0.3$; система $A_3=0.8$, $w_3= 0.1$. Здесь вес w_i означает значимость согласования на конкретном уровне. В нашем случае наиболее важен уровень продукта (оперативное управление). Пусть веса нормированы. Расчёт даёт $K^{agr} = 0.89$ – высокая согласованность между уровнями. До внедрения системы $K^{agr} = 0.66$.

Показатель T^{resp} – время реакции системы: от выявления кросс-уровневого конфликта до согласованного решения. Его снижение говорит о росте оперативности согласования.

Для согласования данных между уровнями разработан метод кросс-уровневого согласования онтологий. Метод представляет собой адаптацию подхода Шведина [253] для многокомпонентных систем обеспечения качества. В методологии ИППР метод разрешает конфликты при кросс-уровневом анализе.

Формальное описание метода: $M^{SOA} = \langle Ch^S, Ch^{DS}, Ch^{PDS}, Cr^{SOA}, Df \rangle$ где Ch^S, Ch^{DS}, Ch^{PDS} – характеристики на уровнях ситуации, решения и сценария, Cr^{SOA} – критерии согласования, Df – цифровой след для актуализации правил и характеристик. Метод включает шаги:

1. Выявление конфликтов

Если конкретные элементы множеств разных уровней $ch_i^S \in Ch^S$ и $ch_j^{DS} \in Ch^{DS}$ противоречат друг другу (несовместимость значений характеристик), то ситуация классифицируется как кросс-уровневая.

Например, для дефекта продукции. Уровень продукта: ch_1^S =«вид дефекта», уровень процесса: ch_1^{DS} =«режим печи». Если мера по ch_1^S =«термический дефект – перегрев», а мера по ch_1^{DS} = «нарушение температурного режима печи», то требуется решение проблемы за пределами полномочий начальника цеха – ситуация кросс-уровневая. Конфликт не в данных, а в масштабе решения.

2. Согласование через онтологии

Используются OWL-модели для формирования общих концептов-«мостов» между уровнями: $OB^{com} = OB^S \cup OB^{DS} \cup OB^{PDS}$, где OB^{com} – общая онтология ситуация, OB^S, OB^{DS}, OB^{PDS} – онтологии для каждого уровня. Например, класс

«Дефект» (уровень продукта) связан с классом «Оборудование» (уровень процесса) через свойство «вызван_неисправностью». Решение принимает на уровне системы (Главный инженер). Так онтология связывает уровни и распределяет ответственность между участниками, исключая конфликты.

3. Экспертное подтверждение

Эксперты проверяют корректность правил Cr^S , Cr^{DS} , Cr^{PDS} . В рассмотренном примере на этой стадии проверяется актуальность онтологии и согласуются распоряжения.

Метод кросс-уровневого согласования онтологий эффективен как в реактивных, так и в проактивных ситуациях. В последних онтологическая модель позволяет выявлять потенциальные противоречия до их возникновения, прогнозировать последствия изменений на уровне системы и процесса, формировать сценарии развития событий, минимизируя риски дисбаланса между уровнями.

Метод является новым в контексте обеспечения качества в промышленности, поскольку обеспечивает формализацию кросс-уровневых конфликтов через ТММ, использует цифровой след для актуализации знаний и правил и учитывает тип ситуации при выборе уровня автоматизации процесса согласования (полностью автоматический, полуавтоматический, экспертный).

Он реализован в интеллектуальной подсистеме СППР, в которой интегрируется с модулем принятия решений и обратной связи.

Таким образом, метод согласует онтологии между уровнями продукта, процесса и системы. Он даёт объяснимые и согласованные решения и устойчив к изменениям нормативов.

3.4.2 Балансировка критериев через адаптивное взвешивание

Метод согласования онтологий (§3.4.1) формализует связи между уровнями. Балансировка критериев расширяет его возможности и позволяет динамически менять приоритеты по типу ситуации и уровню неопределённости. Интеграция уровней в СОП строится на трёх принципах (см. таблицу 3.20).

Таблица 3.20 Принципы интеграции уровней продукта, процесса и системы

Принцип	Описание	Реализация	Пример
Согласованность онтологий	Онтологии разных уровней связаны через общие концепты, что даёт единую семантику	Разработка специализированных онтологий для каждого уровня и их связь через общие концепты-«мостики» [259]	«Дефект продукта → технологический параметр → стратегический риск»
Динамическая адаптация моделей	Типовые ситуации решаются по шаблонам, нетиповые через нечёткую логику и экспертные правила	Использование теоретико-множественного подхода (см. §3.1.1) для формализации переходов между уровнями и выбора метода	Типовая ситуация: шаблон «остановка процесса»; нетиповая: вывод на основе нечётких правил
Многоуровневая интерпретация данных	Данные с операционного уровня транслируются на стратегический через семантические цепочки	Применение онтологических преобразователей и метаонтологий для установления причинно-следственных связей	«Дефект сварки → зависит от → Температура нагрева» → «Риск срыва срока → зависит от → Время устранения дефекта»

Для баланса оперативных, тактических и стратегических целей нужно согласовать критерии уровней (продукт, процесс, система). Тип ситуации определяет способ взвешивания:

1. Типовые ситуации

Связи между уровнями известны заранее. Веса фиксированы, их определяют эксперты и исторические данные:

$$W = \{w_{acr}, w_{cst}, w_{dln}\}, \text{ причём } w_{acr} + w_{cst} + w_{dln} = 1.$$

Пример в таблице 3.21.

Таблица 3.21 Пример весов для типовой ситуации дефекта покраски

Критерий	Уровень	Вес (w_i)	Обоснование
Точность	Продукт	$w_{acr}=0.6$	Приоритет соответствия ГОСТ
Стоимость	Процесс	$w_{cst}=0.3$	Ограниченный бюджет на корректировки
Сроки	Система	$w_{dln}=0.1$	Жёсткие сроки поставки

2. Нетиповые ситуации

В нетиповых ситуациях применяются подходы для адаптивного взвешивания:

- нечёткая логика обрабатывает качественные оценки экспертов (например, «высокий риск» увеличивает вес «сроков»);
- машинное обучение ищет аналоги в базе прецедентов и переносит веса или динамически их корректирует;
- обратная связь позволяет анализировать результаты решений и обновляет веса в реальном времени.

Например, при новом типе дефекта система ищет аналоги. Если их нет, она увеличивает вес «стоимости» на 15%, как самый гибкий параметр.

Метод балансировки критериев работает через семантическое согласование онтологий, адаптивное взвешивание и обратную связь через цифровой след. Он позволяет СППР не только реагировать на типовые сценарии, но и гибко адаптироваться к нетиповым ситуациям.

3.5 Разработка адаптированного метода нечёткого вывода

3.5.1 Адаптированный метод нечёткого вывода

При переходе к анализу кросс-уровневых ситуаций и интеграции онтологических моделей, возникает необходимость учёта неопределённости, которая часто присутствует в реальных производственных условиях. В сфере обеспечения качества часто возникают ситуации, в которых данные могут быть нечёткими, неполными или недостоверными, что требует применения специализированных методов для сохранения надёжности принятия решений. Рассмотрим классификацию типов неопределённости в данных, возникающих в процессе обеспечения качества. Каждый тип характеризуется своими причинами, признаками и влиянием на процесс принятия решений ситуации (см. таблицу 3.22).

Таблица 3.22 Типы неопределённости в данных при обеспечении качества

Проблема	Состав и описание данных	Признаки	Пример
Нечёткие данные	Данные с размытыми границами категорий, описываемые лингвистическими переменными	Отсутствие чётких критериев классификации; субъективность оценок	Оценка «нестабильности технологического процесса» по зашумлённым данным с датчиков
Неполные данные	Отсутствуют ключевые параметры или метаданные, необходимые для анализа	Недостаток сопроводительной документации, отсутствие исторических данных	Критический дефект изделия при отсутствии данных о режимах обработки на станке
Недостоверные данные	Данные, искажённые из-за ошибок измерения, сбоев оборудования или человеческого фактора	Расхождение между измеренными и реальными значениями; наличие выбросов	Значение температуры, завышенное на 15% из-за неисправности термодатчика

Рассмотренные типы неопределённости обуславливают необходимость интеграции нечёткой логики в онтологические модели для повышения достоверности решений. Для нетиповых ситуаций методология ИППР предполагает применение метода нечёткой логики, лингвистических переменных [105] (например

метод Такаги-Сугено [78],) которые преобразуют размытые, неполные или недостоверные данные в количественные оценки, обеспечивая устойчивость анализа и чёткие выводы в сфере обеспечения качества. Они пригодны для работы с данными в условиях неустойчивости и шума.

С использованием ТММ СОП, разработаем адаптированный метод нечёткого вывода, который обладает свойствами адаптивности и может для разных ситуаций использовать стандартный подход различных методов (Такаги-Сугено, Мамдани, Метод Ларсена, Метод Цукамото, Метод Такаги-Комори [106]). Шаги этого метода:

1. Фаззификация входных данных

Каждая характеристика $ch_i^S \in Ch^S$ преобразуется в лингвистическую переменную с использованием функций принадлежности $\mu(ch_i^S)$, вид которой зависит от типа ситуации (см. таблицу 3.23).

Таблица 3.23 Пример выбора методов нечёткого вывода и формы функций принадлежности

Тип ситуации	Критерий выбора и подходящие методы	Критерий выбора и подходящие формы функций принадлежности
Типовая (высокая стабильность, низкая неопределённость)	Наличие стандартных процедур, повторяемость, высокая степень определённости данных (Мамдани, Цукамото)	Чёткие границы, интервальная шкала, стабильные данные (треугольная μ_t , трапециевидная μ_{trp})
Нетиповая (высокая неопределённость, отсутствие аналогов)	Наличие размытых, качественных или противоречивых данных, необходимость прогнозирования (Ларсена, Такаги-Сугено)	Размытые данные, крайние значения, нет стабильных шаблонов (Z-образная μ_L , S-образная μ_γ , трапециевидная μ_{trp})
Кросс-уровневая (влияние на несколько уровней)	Влияние на несколько уровней, необходимость согласования и динамической адаптации (Такаги-Сугено-Канга)	Наличие динамического контекста, влияние на несколько уровней, необходимость обучения (Комбинация нескольких μ_t, μ_L, μ_γ)

Например, если температура турбины $ch_1^S = \text{«высокая»}$, то её функция принадлежности определяется как $\mu(ch_1^S) = trimf(x, [70, 80, 90])$, где $trimf$ – треугольная функция принадлежности.

В случае нетиповой ситуации, например, $ch_2^S = \text{«предельная»}$, используется Z-образная функция $zmf: \mu(ch_2^S) = zmf(x, [85, 90])$.

2. Формирование правил

Правила записываются в виде:

ЕСЛИ ch_i^S И ch_j^S И ..., ТО $d_l^S \in D^S$, где $D^S = f(S, W)$ – множество решений, зависящих от ситуации S и весов $w_i \in W$.

Формально, правила можно выразить как: $Cr^S = \{cr_k^S | \bigwedge_{i=1}^n ch_i^S \rightarrow d_k^S, k = 1..m\}$

Например, ЕСЛИ Влияние на продукцию = «Среднее» ($\mu(ch_i^S) = 0.5$) И Уровень риска = «Высокий» ($\mu(ch_j^S) = 0.8$), ТО Решение $d_1^S = \text{«Уточнить параметры»}$

Источники для формирования правил: экспертные знания, анализа цифрового следа, результат классификации ситуаций.

3. Агрегация выводов

Выходные значения рассчитываются сумма активированных правил: $d_{out}^S = \sum_{k=1}^m \alpha_k O_k(x)$, где $\alpha_k \in [0,1]$ – степень истинности правила cr_k^S (активации), $O_k(x)$ – оператор вывода по правилу k , который может быть:

- константой (метод Мамдани);
- линейной функцией $a_k x + b_k$ (метод Такаги-Сугено);
- нелинейной функцией $a_k x^2 + b_k x + c_k$ (метод Такаги-Сугено-Канга);
- умножением μ на чёткую функцию (метод Ларсена);
- средневзвешенным максимумом (метод Цукамото).

Агрегация реализуется за счёт операции $\min/\max$ (метод Мамдани), линейной / нелинейной комбинации (метод Такаги-Сугено / метод Такаги-Сугено-Канга), произведения μ на функцию (метод Ларсена), взвешенное среднее по активным пикам функции принадлежности (метод Цукамото).

4. Дефаззификация

Выходное значение формируется выражением: $d_{fin}^S = \sum_{k=1}^m \mu(d_k^S) x_k / \sum_{k=1}^m \mu(d_k^S)$, где x_k – числовое значение, связанное с выводом правила k , $\mu(d_k^S)$ – степень истинности правила k .

Выражение универсально и подходит для всех рассмотренных методов:

- $x_k = const$ (метод Мамдани);
- $x_k = a_k x + b_k$ (метод Такаги-Сугено);
- $x_k = a_k x^2 + b_k x + c_k$ (метод Такаги-Сугено-Канга);
- $x_k = \mu(ch_i^S) * x_i^{base}$ (метод Ларсена);

– x_k = максимальное значение функции принадлежности (метод Цукамото).

Сформируем обобщённое выражение для получения решения D^S на основе метода нечёткого вывода:

$$D^S = A(\mu(ch_i^S), R_k, T), \quad (3.4)$$

где $\mu(ch_i^S)$ – функции принадлежности характеристик ситуации, R_k – активированные правила нечёткой системы, T – тип нечёткой системы (Мамдани, Такаги-Сугено и др.), $A(\cdot)$ – универсальный оператор агрегации, интегрирующий входные данные, правила и метод нечёткого вывода.

Предлагаемый метод является адаптивным, т.е. пригодным для настройки под нужный алгоритм в зависимости от типа ситуации.

Адаптивность предлагаемого метода проявляется за счёт свойств (см. таблицу 3.24).

Таблица 3.24 Свойства адаптивности адаптированного метода нечёткого вывода

Свойство	Описание
Самонастраиваемость	Автоматический подбор параметров метода в зависимости от текущих условий и типа ситуации
Масштабируемость	Возможность интеграции новых методов нечёткого вывода или других ИИ-подходов без глубокой перестройки архитектуры СППР
Устойчивость к изменениям	Способность метода оперативно адаптироваться к изменяющимся внешним условиям, нормативам и требованиям к качеству
Совместимость с разными видами данных	Поддержка обработки как количественных (например, вес, размер), так и качественных данных (например, «высокий риск», «нестабильный процесс»)

При проектировании адаптивных модулей СППР данный метод легко интегрируется в модульную структуру, позволяя добавлять новые компоненты без нарушения общей логики работы системы.

Адаптированный метод нечёткого вывода отличается от классических, таких как методы Такаги-Сугено или Мамдани, тем, что:

– основан на лингвистических переменных, интегрированных в онтологическую модель;

– ситуации дискретизируются по времени согласно теории расписаний, что позволяет формировать временные срезы для анализа изменений, использовать динамические функции принадлежности $\mu(ch_i^S, t_k)$, повышать точность прогнозирования за счёт учёта временного фактора;

- для повышения объективности выбора решения выполняется автоматическая оценка важности весов характеристик w_i через метод парных сравнений [196], корректировке весов на основе цифрового следа и перераспределения приоритетов в зависимости от уровня неопределённости;
- имеется механизма выбора формы функции принадлежности в зависимости от типа ситуации;
- встроен в механизм актуализации функций принадлежности на основе цифрового следа, представляющего собой хранилище ранее принятых решений и сценариев, позволяющее обучаться на опыте;
- есть возможность применения в кросс-уровневых ситуациях за счёт формирования «мостов» между уровнями управления, обеспечивающих согласованность выводов, возможность использования нечётких переменных на всех уровнях и устойчивость к изменениям внешних условий.

Метод внедрён в интеллектуальную подсистему СППР, где используется для повышения объяснимости и воспроизводимости вывода в условиях нетиповых и кросс-уровневых ситуаций.

Особенности адаптированного метода позволяют минимизировать субъективность экспертов, обеспечивая устойчивость к шуму и неоднозначности данных, что особенно важно в нетиповых ситуациях. Метод ориентирован на нетиповые и кросс-уровневые задачи обеспечения качества, где классические методы не обеспечивают достаточной точности идентификации и выбора решений.

3.5.2 Адаптированный нечёткий вывод в анализе дефектов продукции

Для демонстрации работоспособности разработанного адаптированного метода нечёткого вывода рассмотрим его применение при принятии решений по дефектам продукции.

Пример иллюстрирует, как метод обрабатывает нечёткие, неполные и недостоверные данные, снижая уровень неопределённости и обеспечивая объяснимость вывода.

1. Характеристики ситуации (Ch^S) включают: тип продукции $ch_1^S = \{\text{«ТНП»}, \text{«специальная»}, \text{«для нефтегазовой отрасли»}, \text{«для авиационной отрасли»}\}$; степень

повреждения $ch_2^S = \{\text{«минимальная»}, \text{«существенная»}, \text{«критическая»}\}$; место обнаружения дефекта $ch_3^S = \{\text{«внутреннее»}, \text{«внешнее»}, \text{«скрытое»}\}$; значимость изделия $ch_4^S = \{\text{«низкая»}, \text{«средняя»}, \text{«высокая»}\}$; состояние документации $ch_5^S = \{\text{«полная»}, \text{«частичная»}, \text{«отсутствует»}\}$; срок годности изделия $ch_6^S = \{\text{«длительный»}, \text{«средний»}, \text{«короткий»}\}$; экономическая эффективность исправления $ch_7^S = \{\text{«высокая»}, \text{«средняя»}, \text{«низкая»}\}$.

2. Меры характеристик (L^S) и лингвистические переменные формализуются через функции принадлежности, вид которых зависит от типа ситуации (см. таблицу 3.15). Например: для ch_2^S (степень повреждения) применяются функции: $\mu_{\min}(x)$ – минимальное повреждение, $\mu_{\text{сущ}}(x)$ – существенное повреждение, $\mu_{\text{крит}}(x)$ – критическое повреждение.

Аналогично формируются меры для других характеристик.

3. Критерии выбора (Cr^S) сформулированы как правила вида:

- 1) Если $ch_2^S = \text{«существенная»}$ И $ch_4^S = \text{«высокая»}$, то решение $d_1^S = \text{«переделка в новую спецификацию»}$;
- 2) Если $ch_2^S = \text{«критическая»}$ и $ch_3^S = \text{«внутреннее»}$, то решение $d_2^S = \text{«утилизировать»}$;
- 3) Если $ch_5^S = \text{«частичная»}$ И $ch_6^S = \text{«средний»}$, то решение $d_3^S = \text{«годен с отклонением»}$;

Аналогично формируются остальные правила.

4. Пример анализа ситуации, связанной с дефектом

$ch_1^S = \text{«для авиационной отрасли»}$, $ch_2^S = \text{«существенная»}$ ($x=60$), $ch_3^S = \text{«внутреннее»}$, $ch_4^S = \text{«высокая»}$, $ch_5^S = \text{«полная»}$, $ch_6^S = \text{«длительный»}$, $ch_7^S = \text{«средняя»}$.

Преобразуем числовые значения в лингвистические термы:

$ch_2^S = \text{«существенная»}$ ($\mu_{\text{сущ}}(60) = 0.5$, $\mu_{\text{крит}}(60) = 0.5$), $ch_4^S = \text{«высокая»}$, $ch_7^S = \text{«средняя»}$.

Применение правил

Оцениваем каждое правило:

- правило 1 не выполняется;

– правило 2: выполняется частично ($ch_2^S = \text{«существенная»}$ или «критическая»), вывод: «утилизировать»;

– правило 3: выполняется ($ch_2^S = \text{«существенная»}$, $ch_7^S = \text{«средняя»}$) , вывод: «переделка в новую спецификацию».

– правило 4: выполняется ($ch_1^S = \text{«для авиационной отрасли»}$, $ch_2^S = \text{«существенная»}$ ($x=60$)), вывод: «переделка в новую спецификацию».

– правило 10: выполняется ($ch_2^S = \text{«критическая»}$, $ch_3^S = \text{«внутреннее»}$), вывод: «утилизировать».

Объединяем результаты: «Утилизировать» получает вес 0.7; «Переделка в существующую спецификацию» получает вес 0.5; «Переделка в новую спецификацию» получает вес 0.3.

Принято решение: «утилизировать», поскольку оно имеет наибольший вес и соответствует критериям безопасности в авиационной отрасли.

Анализ эффективности метода:

– точность идентификации (IA) = 91%, рассчитана на основе тестовой выборки из 40 ситуаций при сравнении с экспертными решениями;

– уровень неопределённости (ΔE) снижен на 55% за счёт агрегации размытых данных и обучения на цифровом следе.

Для оценки эффективности нечёткого вывода в условиях неопределённости используется коэффициент снижения неопределённости (K^{UR}) определяемый как: $K^{UR} = (UL_{bef} - UL_{aft}) / UL_{bef}$, где UL_{bef} , UL_{aft} – уровни неопределённости до и после применения методологии, измеряемые в пределах (0-1). Например, есть ситуация определения причины отказа. С учётом мнений экспертов и нечёткой логики $UL_{bef} = 0.65$, $UL_{aft} = 0.25$, что даёт $K^{UR} = 0.62$ – снижение неопределённости на 62%. Нечёткий вывод снижает ΔE , что повышает XAI .

Метод корректно обработал ситуацию с дефектом. Показал высокую точность (IA) и низкую неопределённость (ΔE) в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях.

3.6 Выводы по главе

В соответствии с подзадачами, сформулированными в таблице 3.1, в главе 3 получены следующие результаты:

- модульная архитектура (формула 3.1) реализует независимое обновление модулей, снижение дрейфа данных и скорости отклика (§3.1);
- метод выбора алгоритма, в том числе матрица критериев и многокритериальная оценка (формула 3.3) с выбором метода по типу ситуации и уровню управления (§3.2);
- интеллектуальная подсистема ($IS^{data} = \langle D^S, F^{ML}, F^{fuz}, Df \rangle$) выполняет гибридную обработку (правила, нечёткая логика, машинное обучение) и актуализацию через цифровой след (§3.3);
- адаптированный нечёткий вывод связывает лингвистические переменные с онтологией, учитывает динамику процессов через дискретизацию по времени, корректирует веса характеристик по цифровому следу, выбирает форму функций принадлежности (§3.5);
- кросс-уровневое согласование ($M^{SOA} = \langle Ch^S, Ch^{SD}, Ch^{PDS}, Cr^{SOA}, Df \rangle$) построено на выявлении конфликтов через пересечение сущностей, согласование через концепты-«мосты», экспертной проверке, оценке по метрике K^{agr} и балансировке критериев по типам ситуаций (§3.4).

Впервые предложен комплекс адаптивных инструментов СППР на основе СОП, перечисленных выше. Инструменты обеспечивают динамическую коррекцию правил через цифровой след и обратную связь, снижают неопределённость за счёт гибридных ИИ-подходов. Отличие от классических СППР с фиксированными методами – объяснимость, согласованность и устойчивость к неопределённости в промышленных условиях.

Достоверность подтверждена: согласованное применение СОП, нечёткой логики и ТММ; примеры обработки ситуаций (дефект, аудит, испытания); экспертные оценки и метрики.

Глава 4. Разработка и внедрение методологии интеллектуальной поддержки принятия решений в сфере обеспечения качества на основе СОП

Глава посвящена разработке методологии ИППР в сфере обеспечения качества промышленного предприятия на основе СОП, с учётом проработки управленческих аспектов интеграции уровней, архитектуры СППР и обобщения их в рамках методологии поддержки принятия решений.

Структура подзадач приведена в таблице 4.1

Таблица 4.1 Структура подзадач главы 4

Подзадача	Назначение и функционал результата	Роль в реализации задачи
При разработке методологии интеллектуальной поддержки принятия решений		
Разработка метода применения методологии ИППР	Формализация алгоритма от анализа до обратной связи, интеграция онтологий, выбор ИИ-подхода и подготовка данных	Обеспечивает воспроизводимость и объяснимость вывода, служит основой для внедрения методологии в производство.
Разработка методики объяснимости решений	Обеспечение интерпретируемости выводов для ЛПП разных уровней	Обеспечивает интерпретируемость выводов для ЛПП разных уровней
Разработка метода визуализации ПСС	Повышение объяснимости решений СППР через графическое представление зависимостей	Обеспечивает интерпретируемость выводов для ЛПП и согласованность действий между уровнями управления
Разработка адаптированного метода цифрового следа	Формализация опыта принятия решений для актуализации онтологий и правил	Обеспечивает самообучение модели и устойчивость к изменениям внешней среды
Разработка метода самообучения модели через обратную связь	Обеспечивает динамическое обновление правил и функций принадлежности на основе фиксируемых результатов решений и цифрового следа	Повышает точность вывода и устойчивость к информационным разрывам за счёт автоматической корректировки весов и онтологических связей
Разработка иерархической модели управления	Формализация согласования действий между уровнями продукта, процесса и системы	Обеспечивает целостность и согласованность решений при кросс-уровневых ситуациях
Разработка методики согласования вывода СППР и ERP-системы на основе онтологической интеграции и цифрового следа	Обеспечение согласованности решений, генерируемых СППР, с бизнес-логикой ERP-системы за счёт двунаправленной интеграции онтологий и фиксации расхождений в цифровом следе	Устраняет информационные разрывы между системами поддержки принятия решений и операционными системами управления, обеспечивает сквозную прослеживаемость и соответствие нормативам
При разработке методики комплексной оценки эффективности СППР		
Разработка алгоритма оценки апостериорной эффективности	Объективная оценка результативности СППР на основе сравнения до и после внедрения	Повышает доверие к системе за счёт доказательства её эффективности
Разработка методики согласования вывода между уровнями управления	Оценка согласованности решений на уровнях продукта, процесса и системы	Обеспечивает объективность анализа межуровневых взаимодействий
Разработка методики комплексной оценки эффективности СППР	Обеспечивает анализ и интерпретацию ситуаций с использованием гибридных ИИ-подходов и нечёткой логики	Повышает точность идентификации и устойчивость к шуму в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях

4.1 Практическая реализация СОП в промышленной СППР

4.1.1 Метод применения СОП к ИППР в сфере обеспечения качества промышленных предприятий

Для перевода теоретических положений СОП в промышленную практику разработан метод его применения, который формализует анализ ситуаций через модель $S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle$ (формула (2.1)), обеспечивает выбор решения через $D^S = \langle Ch^{DS}, L^{DS}, Cr^{DS}, E^{DS} \rangle$, реализует сценарный вывод через $P^{DS} = \langle Ch^{PDS}, L^{PDS}, Cr^{PDS}, E^{PDS} \rangle$ и интегрируется с цифровым следом Df для актуализации знаний и правил.

СОП к поддержке принятия решений в сфере обеспечения качества объединяет формализацию знаний, анализ данных и адаптацию к уровням управления. Метод включает следующие этапы, указанные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Этапы алгоритма метода применения СОП к ИППР

Название этапа	Описание этапа	Ссылка	Пример
Анализ процесса	Декомпозиция процесса, выявление входов/выходов и связей с внешними системами с использованием онтологий	–	Моделирование цепочки производства с учётом стандартов ISO
Сбор данных	Сбор структурированных и неструктурированных данных о параметрах, качестве и внешних факторах	§1.2.1	Отчёты о браке, описания сбоев в работе оборудования
Построение онтологической модели	Формализация связей «ситуация-решение-сценарий» в OWL как основы СППР, учитывая требования к объяснимости (§4.2)	§2.1, 5.1, 5.2	Онтология для диагностики дефектов в производстве
Построение модульной архитектуры	Формирование структуры ИППР из независимых взаимодействующих модулей (онтология, решатель)	§3.1	Архитектура с модулями: ввод данных, онтология, решатель, визуализация
Определение уровня управления	Классификация ситуации на уровне продукта, процесса или системы	§2.1	Нарушение в сборке – уровень процесса
Определение типа ситуации	Разделение на типовые, нетиповые и кросс-уровневые ситуации	§1.1.2	Сбой, затрагивающий логистику и производство одновременно
Выбор метода решения	Выбор алгоритма для решателя СППР на основе уровня, типа ситуации и неопределённости	§3.2.2, 5.2	Применение нечёткой логики для нетиповой ситуации
Подготовка данных	Нормализация, кластеризация, лингвистические переменные, синхронизация для кросс-уровней	§2.2, 3.3	Преобразование данных о температуре в термы: низкая, норма, высокая
Настройка решателя СППР	Интеграция метода в СППР и проверка на тестовых данных	§3.3-3.5	Обучение на исторических данных о дефектах
Интеграция модели в БП	Связь онтологий с ERP/CRM, автоматизация отчётности и соответствие нормативам	§5.3, 5.4	Автоматическая отправка уведомлений в CRM при браке
Анализ эффективности	Оценка эффективности СППР по метрикам, включая IA , DE , K^{agr} , XAI	§2.2, 4.5	Снижение времени принятия решений на 30%
Обновление онтологии и самообучение	Успешные решения интегрируются в онтологию (§5.3), обновляются правила и модели	§4.3, 5.3	Добавлено правило: «если $T > 200^\circ\text{C}$ – остановить процесс»
Применение СППР	Использование настроенной СППР для решения реальных задач	§4.4	Оперативное выявление причин простоев на линии

Визуализируем рассмотренные шаги в виде алгоритма (см. рисунок 3.13):

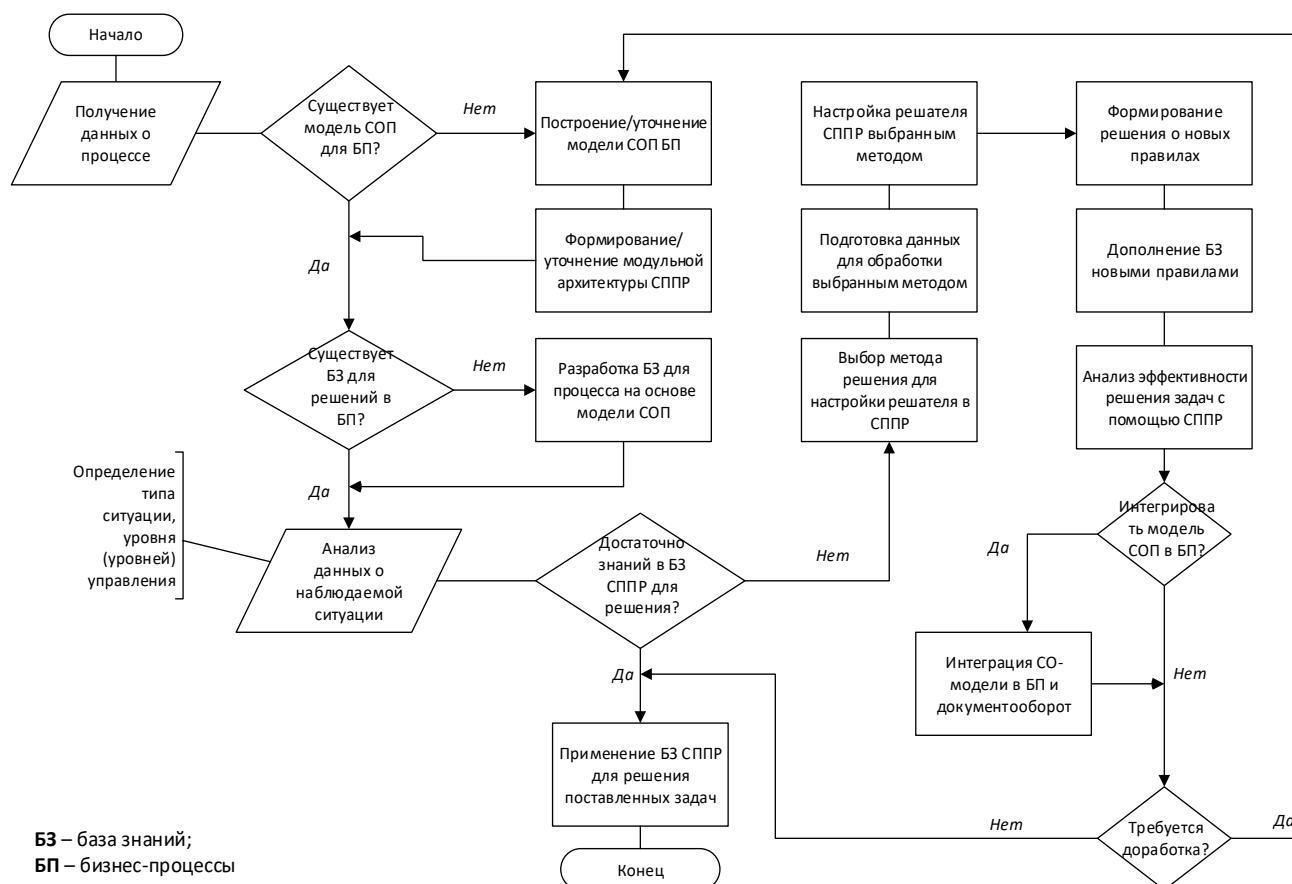


Рисунок 4.1 – Алгоритм применения СОП для поддержки принятия решений в сфере обеспечения качества промышленных предприятий

Метод применения СОП обеспечивает объяснимость и воспроизводимость вывода, учитывает тип ситуации и уровень принятия решений, интегрирован в модульную архитектуру СППР, связан с цифровым следом Df и обратной связью для актуализации знаний, что делает его универсальным механизмом реализации СОП в практике промышленного обеспечения качества. Принцип его работы иллюстрирует пример в §4.1.2, а апробация на реальных промышленных данных или в пилотной системе описана в §6.3.

4.1.2 Пример трёхуровневого принятия решений в СППР на основе СОП

Для демонстрации работы СОП рассмотрим пример трёхуровневого процесса принятия решений по несоответствию, выявленному на аудите (см. таблицу 4.3).

Таблица 4.3 Моделирование решений по уровням решения

Уровень	Интерпретация множества	Характеристики и меры	Функция решения	Пример правил	Оценка
Ситуация	$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$, где: s_1 – категория «соответствие», s_2 – категория «уведомление», s_3 – категория «мало-значительное несоответствие», s_4 – категория «значительное несоответствие»	ch_1^S – влияние на продукцию, мера $l_1^S \in \{0, \dots, 100\%$ }, ch_2^S – тяжесть последствий, мера $l_2^S \in \{\text{«нет потерь»}, \dots, \text{«критические потери»}\}$, ch_3^S – вероятность потерь, мера $l_3^S \in \{0, \dots, 100\%$ }, ch_4^S – место обнаружения, мера $l_4^S \in \{\text{«основные процессы»}, \text{«критические процессы»}, \text{«вспомогательные процессы»}\}$, ch_5^S – сложность контроля, мера $l_5^S \in \{\text{«высокая»}, \dots, \text{«низкая»}\}$, ch_6^S – распространённость, мера $l_6^S \in \{\text{«нет»}, \dots, \text{«скорее всего повторится»}\}$	$f_{id}^S: Ch^S \rightarrow S$ определяет категорию несоответствия на основе входных данных Ch^S	если $ch_1^S < 10\%$, $ch_2^S = \text{«нет потерь»}$, $ch_3^S < 5\%$, то $f_{id}^S(Ch^S) = s_1$ (соответствие); если $ch_1^S \in [10\%, 30\%]$, $ch_2^S = \text{«малые потери»}$, $ch_3^S \in [5\%, 20\%]$, то $f_{id}^S(Ch^S) = s_2$ (мало-значительное несоответствие).	$E^S = 77.5\%$
Решение	$D^S = \{d_1^S, d_2^S\}$, где d_1^S – «срочно устранить»; d_2^S – «устранить в плановом порядке»	ch_1^{DS} – влияние на процессы, мера $l_1^{DS} \in \{0, \dots, 100\%$ }, ch_2^{DS} – тяжесть потерь, мера $l_2^{DS} \in \{\text{«нет потерь»}, \dots, \text{«критические потери»}\}$, ch_3^{DS} – значимость, мера $l_3^{DS} \in \{\text{«высокая»}, \dots, \text{«низкая»}\}$, ch_4^{DS} – потребность в ресурсах, мера $l_4^{DS} \in \{0, \dots, 100\%$ }, ch_5^{DS} – срочность выполнения, мера $l_5^{DS} \in \{\text{«немедленно»}, \dots, \text{«по графику»}\}$	$f_{id}^{DS}: Ch^{DS} \rightarrow D^S$ определяет наиболее подходящее решение на основе входных данных D^S	если $ch_1^{DS} > 70\%$, $ch_2^{DS} = \text{«средние потери»}$, $ch_4^{DS} > 50\%$, то $f_{id}^{DS}(Ch^{DS}) = d_1^S$ (срочно устранить); если $ch_1^{DS} \leq 30\%$, $ch_2^{DS} = \text{«малые потери»}$, $ch_5^{DS} = \text{«по графику»}$, то $f_{id}^{DS}(Ch^{DS}) = d_2^S$ (устранить в плановом порядке)	$E^{DS} = 70\%$
Сценарий	$P^{DS} = \{p_1^{DS}, p_2^{DS}, p_3^{DS}\}$, где: p_1^{DS} – «типовой план мероприятий»; p_2^{DS} – «сокращённый план мероприятий»; p_3^{DS} – «расширенный план мероприятий»	ch_1^{PDS} – доступность ресурсов, мера $l_1^{PDS} \in \{0, \dots, 100\%$ }, ch_2^{PDS} – срок выполнения, мера $l_2^{PDS} \in \{\text{«быстрое»}, \dots, \text{«долгое»}\}$, ch_3^{PDS} – сложность реализации, мера $l_3^{PDS} \in \{\text{«низкая»}, \dots, \text{«высокая»}\}$, ch_4^{PDS} – эффективность, мера $l_4^{PDS} \in \{0, \dots, 100\%$ }, ch_5^{PDS} – риск негативных последствий, мера $l_5^{PDS} \in \{\text{«низкий»}, \dots, \text{«высокий»}\}$	$f_{id}^{PDS}: Ch^{PDS} \rightarrow P^{DS}$ определяет наиболее подходящий сценарий на основе входных данных P^{DS}	если $ch_1^{PDS} > 80\%$, $ch_3^{PDS} = \text{«средняя»}$, $ch_4^{PDS} > 90\%$, то $f_{id}^{PDS}(Ch^{PDS}) = p_1^{DS}$ (типовой план мероприятий); если $ch_1^{PDS} < 50\%$, $ch_5^{PDS} = \text{«высокий»}$, то $f_{id}^{PDS}(Ch^{PDS}) = p_3^{DS}$ (сокращённый план мероприятий)	$E^{PDS} = 75\%$

Применим модель для принятия решения:

Шаг 1: Идентификация ситуации

Аудитор определил: влияние на продукцию $ch_1^S=20\%$, тяжесть последствий $ch_2^S=\text{«малые потери»}$, вероятность потерь $ch_3^S=15\%$, место $ch_4^S=\text{«вспомогательные процессы»}$, сложность контроля $ch_5^S=\text{«средняя»}$, а распространённость $ch_6^S=\text{«может повториться»}$.

На основании функции решения f_{id}^S категория несоответствия определяется как $S_3 = \text{«мало-значительное несоответствие»}$.

Шаг 2: Выбор решения

Для малозначительного несоответствия: влияние на процессы $ch_1^{DS}=25\%$, тяжесть потерь ch_2^{DS} =«малые потери», значимость ch_3^{DS} =«низкая», потребность в ресурсах $ch_4^{DS}=30\%$, срочность ch_5^{DS} =«по графику».

По функции решения выбрано решение d_2^S =«устранить в плановом порядке».

Шаг 3: Реализация решения

Данные для реализации сценария: доступность ресурсов $ch_1^{PDS}=75\%$, срок ch_2^{PDS} =«среднее», сложность ch_3^{PDS} =«средняя», эффективность $ch_4^{PDS}=85\%$, риск ch_5^{PDS} =«средний».

На основании функции решения f_{id}^{DSP} выбран сценарий p_1^{DS} =«типовой план мероприятий».

Пример трёхуровневого вывода в СППР подчеркивает практическую применимость СОП в промышленности, объяснимость, воспроизводимость и согласованность вывода и адаптивность к типам ситуаций и уровням управления.

4.2 Повышение объяснимости решений через визуализацию и семантическую интерпретацию

4.2.1 Визуализация ПСС в СППР

Принимая во внимание возрастающее значение прозрачности решений в СППР, особенно критичных в условиях неопределённости, актуальной становится задача визуализации ПСС. Для решения этой задачи разработан метод визуализации ПСС с целью повышения интерпретируемости решений в СППР за счёт сочетания онтологий, нечёткой логики и цифрового следа.

Рассмотрим формализацию метода в СОП. Каждая ситуация $s_i \in S$ увязывается с множеством вероятных решений D^S через правила Cr^S , которые преобразуются в графические элементы ($G = \{g_1, \dots, g_m\}$), где каждый узел графа соответствует конкретному состоянию системы, а связи – правилам перехода между ними. Метод визуализации интегрирован с онтологией через $Cr^S \rightarrow Cr^{DS} \rightarrow Cr^{PDS}$, что как показывают правила согласуются на уровнях. Например, правило

$ch_i^S: (ch_1^S, l_i^S) \rightarrow d_j^S$ отображается как связь между узлом характеристики ch_1^S (с его мерой l_i^S) и узлом решения d_j^S .

Ключевыми компонентами метода являются:

- графы ПСС, позволяющие визуализировать зависимость выхода от входа, используя теорию множеств и онтологию;
- нечёткая логика и лингвистические переменные, используемые для обработки и передачи значений качественных характеристик, преобразуя субъективные оценки в объективные значения;
- цифровой след и обратная связь, обеспечивающие постоянное обновление правил и отчетов, делая систему динамичной и адаптируемой.

Пример визуализации причин с помощью метода причинно-следственной диаграммы (диаграммы Исикавы) показан на рис. 4.2.

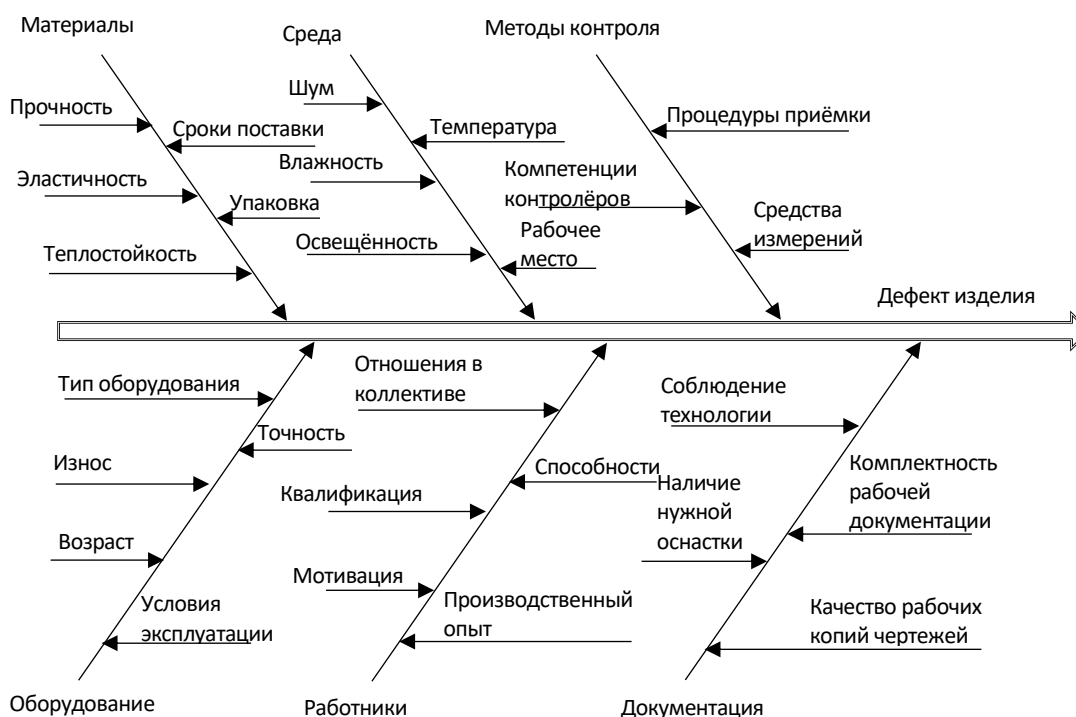


Рисунок 4.2 – Пример диаграммы Исикавы [151] для определения причины дефекта

Созданный метод послужил основой для разработки интеллектуальной подсистемы СППР, существенно улучшившей интерпретируемость выводов на уровнях продукта, процесса и системы.

Разрабатываемый метод визуализации основывается на сочетании следующих элементов:

1. Система методов обеспечения прозрачности решений СППР адаптируется к типу ситуации, обеспечивая понятную визуализацию и структурированные отчёты для всех уровней управления (см. таблицу 4.4).

Таблица 4.4 Стратегия обеспечения прозрачности решений в СППР

Тип ситуации	Методы и инструменты	Особенности вывода
Типовая	Чёткие правила, онтологические графы	Логика «данные → решение», формализованные отчёты)
Нетиповая	Гибридные методы (нечёткая логика и машинное обучение), дефаззификация	Указание источника неопределённости, рекомендации по верификации
Кросс-уровневая	Многослойные онтологические графы, многокритериальный анализ (VIKOR, TOPSIS)	Разделение отчётов по уровням, отображение компромиссов
Проактивная	Прогностические графы, модели рисков	Прогноз дефектов на основе исторических данных (см. §3.5.2)

2. Модель объяснимости вывода в СППР [89] включает визуализацию, лингвистические переменные и адаптивную генерацию отчётов для повышения доверия ЛПР (см. таблицу 4.5).

Таблица 4.5 Компоненты модели объяснимости вывода в СППР

Компонент	Описание	Технологии и методы
Визуализация ПСС	Наглядное представление логики принятия решений	Онтологические графы, OWL, SWRL-правила (см. §5.1)
Нечёткая логика и лингвистические переменные	Перевод качественных оценок в формализованные выводы	Дефаззификация, функции принадлежности (см. §3.5.1)
Адаптивная генерация отчётов	Формирование выводов с учётом уровня экспертизы пользователя	От технических деталей (инженеры) до стратегии (руководство) (см. §4.2.3)

На основе модели ситуации (см. формулу 2.1) формируется объяснимый вывод, включая причинно-следственные графы и лингвистические переменные.

В методе визуализации лингвистические переменные используются для формализации размытых категорий. Визуализация строится через графическое представление функций принадлежности этих переменных.

3. Визуализация реализует следующие шаги, показанные в таблице 4.6.

Таблица 4.6 Этапы визуализации

Этап	Описание	Пример
Определение и нормализация параметров	Входные данные ($x_1, x_2, \dots, x_n$) нормализуются для сопоставимости	Нормализация температуры от 0 до 1 по шкале диапазона
Определение лингвистических термов	Для каждого параметра задаются термы и функции принадлежности	Термы: «низкий», «средний», «высокий» для уровня шума
Построение функций принадлежности	Графическое отображение степени принадлежности значений термам	Треугольная функция для «малые потери»
Формирование схемы взаимосвязей	Визуализация связей между параметрами и результатом решения	Граф связей: давление → температура → вероятность отказа

4. Алгоритм генерации текстовых объяснений, включающий:

- Идентификацию типа ситуации (S), заключающуюся в определении соответствия параметров шаблонам известных ситуаций.
- Выбор подходящего правила (Cr): сравнение текущих данных с базой знаний (например, «если дефект $\rightarrow$ существенный, то решение $\rightarrow$ переделка»).
- Формирование объяснения через лингвистические термы. Например, объяснение = «Параметр x_1 классифицируется как среднее, что указывает на вероятную причину проблемы».

Метод визуализации ПСС, обеспечивает объяснимость и воспроизводимость вывода в СППР, интегрируя онтологические графы, лингвистические переменные и цифровой след и поддерживая интерпретируемость решений в типовых, нетиповых и кросс-уровневых ситуациях.

4.2.2 Ролевые интерфейсы для повышения объяснимости

Объяснимость решений в СППР достигается не только через семантическую интерпретацию и визуализацию, но и через адаптацию вывода под уровень компетенций и роль пользователя. С этой целью разработаны ролевые интерфейсы, основанные на СОП и модели ситуации (2.1).

Ролевые интерфейсы реализуют переход $S \rightarrow D^S \rightarrow P^{DS}$, где:

- для высшего руководства вывод строится на уровне системы через KPI, прогнозы и графы причинности;
- для менеджеров среднего звена он формируется на уровне процесса, через сценарии и причинно-следственные графы;
- для инженеров и работников цеха – на уровне продукта на основе жёстких правил и контрольных карт;
- для **экспертов** – за счёт нечётких переменных, онтологий и SWRL-правил.

Признаки для классификации ролей по уровням принятия решений и типам ситуаций (см. таблицу 4.7).

Таблица 4.7 Признаки классификации ролей пользователей СППР

Признак	Значение	Описание
Уровень принятия решений	Продукт	Фокус на качество конечного изделия, соответствие нормативам, контроль дефектов
	Процесс	Оптимизация технологических операций, выявление и устранение узких мест
	Система	Стратегическое управление, интеграция подсистем, распределение ресурсов
Тип ситуации	Типовая	Чёткие алгоритмы, повторяемые сценарии, низкая неопределённость
	Нетиповая	Неполные или недостоверные данные, необходимость адаптивных решений
	Кросс-уровневая	Влияние на несколько уровней управления, конфликт критериев, межуровневые взаимодействия
Дополнительные признаки	Глубина доступа к данным	Критична для разделения ролей
	Частота взаимодействия	Влияет на требования к интерфейсу
	Степень влияния на процессы	Определяет функционал СППР
	Тип визуализации	Зависит от уровня принятия решений
	Права на инициацию изменений	Ключевой признак для безопасности

Интерфейс роли реализован как адаптивная витрина данных, в которой входные данные фильтруют и агрегируют в зависимости от уровня доступа, вывод формирует через онтологические графы и лингвистическую интерпретацию, отчёты генерируют с учётом типа ситуации, объяснимость растёт за счёт прозрачности логики и согласованности между уровнями управления. Интерфейсы формируются на основе Df и обновляются через обратную связь.

Примеры интерфейсов в таблице 4.8.

Таблица 4.8 Ролевые интерфейсы в системе ИППР

Роль	Уровень решения	Типы ситуаций (преобладающие)	Вывод информации
Высшее руководство	Система	Кросс-уровневые, нетиповые	Сводные отчёты, графы причинности, прогнозы по ключевым показателям эффективности (KPI)
Линейный менеджмент	Процесс	Нетиповые, реактивные и проактивные	Графы причин дефектов, прогнозы по качеству, рекомендации по корректирующим действиям
Инженер, специалист	Продукт	Типовые однотактные	Жёсткие правила, контрольные карты, чёткие инструкции по выполнению операций
Эксперт	Система или процесс	Нетиповые, кросс-уровневые, реактивные и проактивные	Нечёткие переменные, онтологические модели, рекомендации по обновлению правил и знаний

Интерфейс роли – это механизм взаимодействия между человеком и ИИ, в котором онтологические графы и SWRL-правила обеспечивают семантическую интерпретацию, витрины данных агрегируют информацию в зависимости от уровня и типа задачи, что повышает объяснимость за счёт текстовых объяснений, графов и адаптации вывода. В результате снижается когнитивная нагрузка, повышается

доверие к решениям СППР и обеспечивается воспроизводимость вывода в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях, включая проактивные.

4.2.3 Документирование решений и обратная связь в СППР

Документирование решений обеспечивает объяснимость (ХАИ), фиксируя логику принятия решений в структурированном виде.

Для обеспечения обратной связи, самообучения и актуализации знаний в СППР решения фиксируются в виде структурированных записей (см. таблицу 4.9).

Таблица 4.9 Элементы цифрового следа для обеспечения обратной связи в СППР

Компонент записи	Описание	Пример записи
Идентификатор ситуации	Уникальный код, описывает исходную проблему или контекст принятия решения	S-2024-015 (дефект в партии корпусов)
Правило	Правило, на основе которого было принято решение	«если температура > 200°C, то остановить процесс»
Результат решения	Конкретное действие или вывод, сформулированный в виде текста	«переделка»
Оценка результата	Количественная или качественная мера успешности реализации решения	«снижение числа дефектов на 20%», «время устранения – 2 часа»

Алгоритм документирования решений включает этапы согласно таблице 4.10.

Таблица 4.10 Этапы алгоритма документирования

Этап	Описание	Пример
1. Фиксация ситуации (S)	Фиксируются параметры, нормативы и отклонения от нормы	Температура 210 °C при норме 150-200 °C
2. Идентификация решения (D^S)	Определяется тип решения на основе характеристик и критериев	Выбор нечёткой логики для нестабильного процесса
3. Выбор сценария (P^{DS})	Формируется план действий по устранению отклонений	Проверить датчик, пересмотреть регламент
4. Сохранение реквизитов решения	В базу вносятся метод, ответственные, нормативы, дата	Запись: метод – машинное обучение, ответственный – инженер П.
5. Реализация и фиксация результата (R)	Выполняется сценарий, фиксируются фактические последствия	Снижение брака на 20% после настройки
6. Оценка эффективности	Оценка по КРІ: время, качество, экономия	Эффективность решения – 8/10 по шкале качества
7. Обновление онтологии	Успешные решения интегрируются в базу знаний системы	Добавлено правило: «если $T_m > 200\text{ °C}$ – остановить»

Алгоритм документирования решений показан на рис. 4.3.

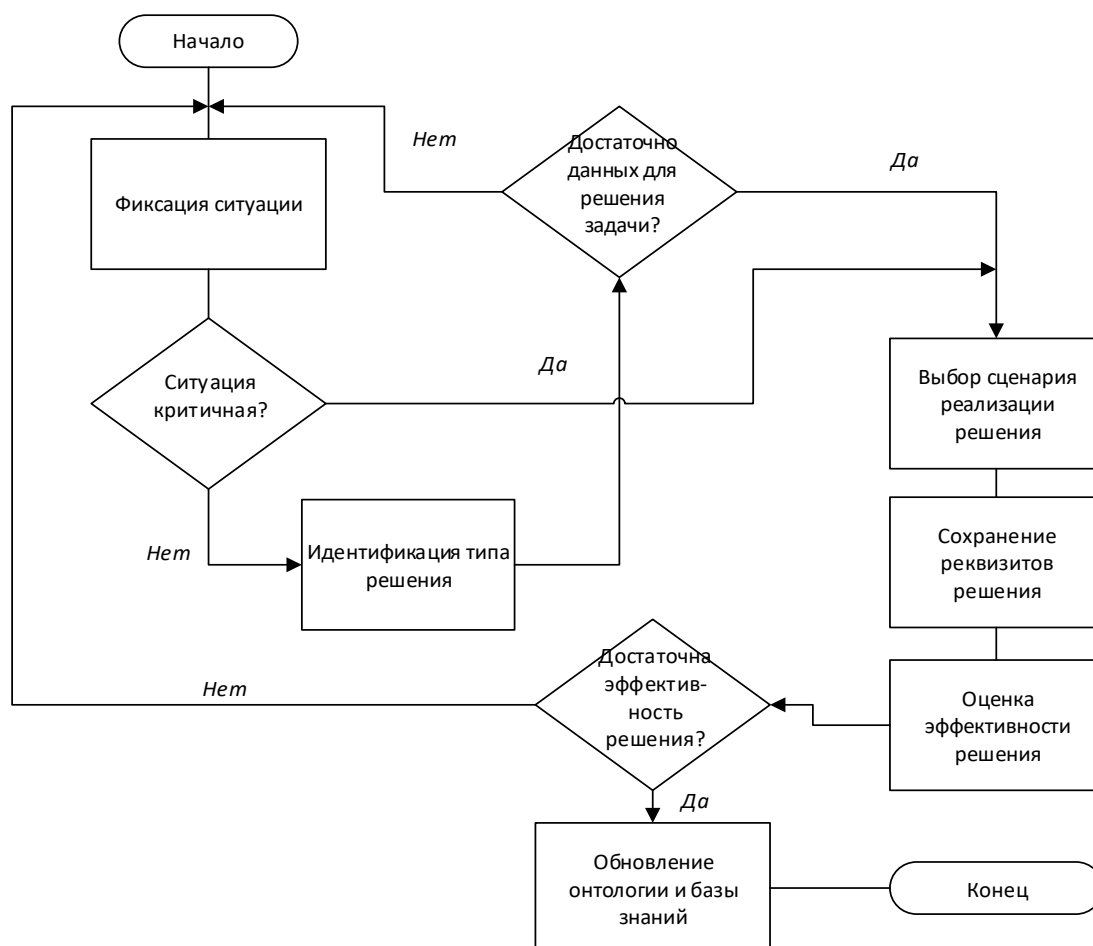


Рисунок 4.3 – Алгоритм документирования решений

Метрика время документирования решения (T^{doc}) показывает время на автоматическое формирование отчёта по решению. Метрика объяснимость (XAI) в СППР оценивается через объективные метрики, которые формируются на основе документирования решений и цифрового следа (см. таблицу 4.11).

Таблица 4.11 Метрики для оценки объяснимости решений

Метрика	Способ определения значения	Описание
1. Количество онтологических связей в объяснении (M_1)	Подсчёт числа связей в графе решения	Повышает детализацию и семантическую интерпретируемость вывода
2. Точность воспроизведения решения через лингвистические переменные (M_2)	Коэффициент вычисляется сравнением числовых входных данных и их качественных терминов	Показывает, насколько точно лингвистическая модель отражает реальные данные
3. Ясность формулировки (M_3)	Оценка от 1 до 5 экспертами	Повышает понятность вывода для пользователей
4. Согласованность с нормативными документами (M_4)	Процент соответствия между рекомендациями системы и требованиями документов	Повышает доверие к решению через соответствие стандартам
5. Актуальность информации (M_5)	Интервал времени между получением данных и текущим	Отражает степень современности используемых знаний

Метрика уровень объяснимости решения (XAI) выступает как обобщающая метрики для оценки объяснимости. Для неё справедливо: $XAI = 5 * \sum_{i=1}^n w_i \frac{LE_i}{LE_i^{max}}$, где w_i – вес критерия, LE_i – степень понимания i -го критерия объяснимости из таблицы 4.11, в пределах (0–1), LE_i^{max} – максимальное значение LE_i . Оценивается по шкале от 0 до 5. При $XAI > 4$ считается высокой, при $XAI < 2.5$ – неудовлетворительной.

Пример. Рассчитаем также уровень объяснимости решения (XAI). Для показателей M_2, M_3, M_4, M_5 выбраны веса w_1, w_2, w_3, w_4 . Значения: точность воспроизведения $M_2 = 0.8$, вес $w_1 = 0.25$; ясность формулировки $M_3: 4,5$ из 5, вес $w_2 = 0.3$; согласованность с нормативами $M_4 = 98\%$, вес $w_3 = 0.2$; актуальность $M_5 = 3$ мес., вес $w_4 = 0.25$. Тогда $K^{LE} = 5 * (0.25 * 0.8 + 0.3 * 4.5/5 + 0.2 * 0.98 + 0.25 * (12-3)/12) = 4.19$, т.е. уровень объяснения высокий – 4.19/5.

Разработанный алгоритм документирования решений стал основой для формирования цифрового следа, который фиксирует входные данные, правила, решения и сценарии, служит основой для обратной связи и обучения модели, а также обеспечивает объяснимость и воспроизводимость вывода.

4.3 Механизмы обратной связи и самообучения в СППР

4.3.1 Цифровой след как метод подготовки и накопления знаний

Цифровой след формируется при сохранении опыта принятия решений, так что каждая новая ситуация на объекте управления, близкая ранее отмеченным, оценивается на основе знаний, полученных в прошлом [172]. Опишем адаптированный метод цифрового следа на языке теории множеств СОП.

Цифровой след Df является множеством записей, отражающих принятые решения и их результаты, и формализуется как: $Df = \bigcup_{i=1}^n dt_i$, где dt_i – конкретная запись данных. При этом каждая запись цифрового следа dt_i может быть *интерпретирована как конкретная ситуация s_i* , принадлежащая онтологии предприятия O , поэтому множество цифрового следа Df можно формализовать как: $Df = \{s_1, \dots, s_n\} \subseteq O$, где $s_i \in S$ – элемент множества ситуаций, который описывается набором характеристик $\{ch_1, \dots, ch_n\}$, соответствующих классам и

свойствам онтологии $S = \langle S^{typ}, Pr, V \rangle$, где S^{typ} – тип ситуации (типовая, нетиповая, кросс-уровневая), Pr – множество свойств онтологии, V – значения свойств.

Цифровой след рассматривается не только как история событий, но и как *хранилище прецедентов*, что позволяет использовать механизм рассуждений на основе прецедентов (Case-Based Reasoning [117, 155]). Формально, каждый прецедент $cs \in CS$ описывается кортежем: $cs = \langle s, d, r, e \rangle$, где s – описание ситуации, d – принятое решение, r – результат реализации решения, e – экспертная оценка эффективности. Данный подход позволяет при возникновении новой ситуации s_k найти наиболее релевантные прецеденты из множества CS с использованием функции подобия: $sim(s_k, cs_j) \rightarrow max$, где $sim()$ – мера схожести между текущей ситуацией и прецедентом, основанная на онтологическом расстоянии и значимости характеристик.

Поскольку накопленные в базе знаний исторические данные могут потерять актуальность, то полезно их уточнять для сохранения их пригодности. Для этого на основе (3.4) создадим механизм корректировки функций принадлежности:

$$\mu^{new}(ch_i^S) = \mu^{old}(ch_i^S) * C(Df), \quad (4.1)$$

где $C(Df)$ – поправочный коэффициент определяемый на основе данных анализа цифрового следа статистическими методами [91], μ^{new} и μ^{old} функции принадлежности до и после корректировки.

На основе расчётов цифрового следа осуществляется уточнение базы знаний, как это описано в §3.3.2.

Цифровой след обеспечивает реализацию цикла PDCA: данные из Df используются на этапах Plan (планирование), Do (выполнение), Check (проверка) и Act (обновление правил и онтологий) (см. §2.2.3).

Формально, процесс актуализации знаний на основе (формула 3.2) можно представить:

$$KB_{i+1} = update(KB_i, df), \quad (4.2)$$

где KB_i – состояние базы знаний на шаге i , $df \in Df$ – новые данные цифрового следа, $update()$ – функция обновления знаний, учитывающая корректировку

функций принадлежности, добавление новых правил и уточнение онтологических связей.

Алгоритм актуализации знаний через цифровой след Df (см. рисунок 4.4):

1. Фиксация ситуации (s_i) на основе описания через Ch^S, L^S, Cr^S .
2. Выбор решения (d_i) на основе $Cr^S \rightarrow Cr^{DS}$.

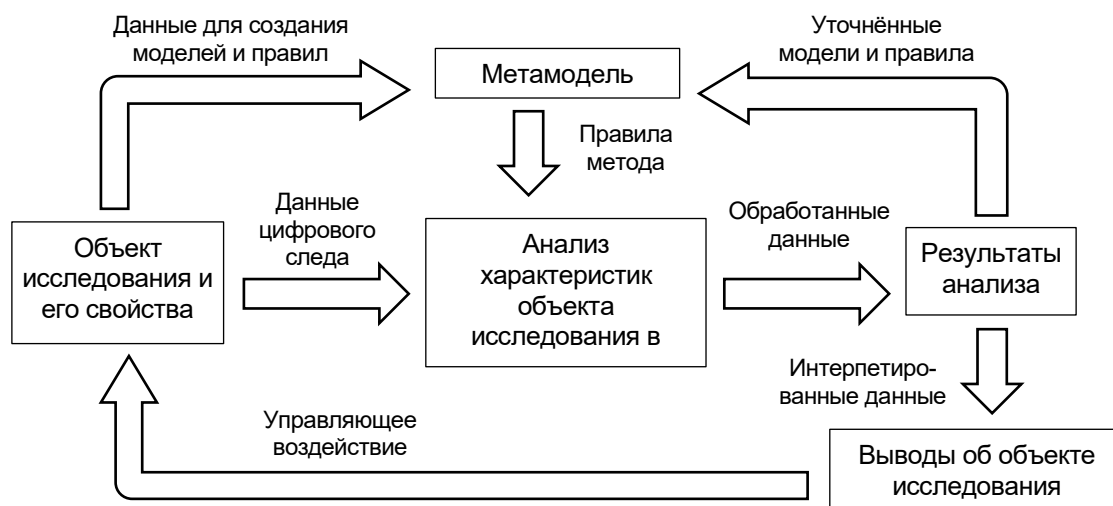


Рисунок 4.4 – Схема сбора и анализа цифрового следа

3. Реализация сценария ($p_i \in P^{DS}$) за счёт $Cr^{DS} \rightarrow Cr^{PDS}$.
4. Фиксация результата (r) на базе оценок E^S, E^{DS}, E^{PDS} .
5. Обновление Df путём добавления df в цифровой след.
6. Актуализация знаний:
 - обновлением функций принадлежности по формуле (4.1);
 - коррекцией весов $w_i = f(Df)$;
 - обновлением онтологии по формуле (4.2).
7. Обучение модели на основе Df и новых правил.

По мере накопления опыта анализ цифрового следа становится фактором для снижения сложности методов обработки информации и получения более точных и предсказуемых вариантов решений.

Эффективность механизма самообучения и актуализации знаний оценивается с помощью метрик, характеризующих релевантность, воспроизводимость и актуальность выводов, сформированных на основе цифрового следа (см. таблицу 4.12).

Таблица 4.12 Метрики оценки эффективности цифрового следа в СППР

Метрика	Формула	Смысл	Расчёт
Коэффициент релевантности знаний (K^{rel})	$K^{rel} = (N_{act} + \alpha N_{new} - \beta N_{old}) / N_{gen}$, где N_{act} – число актуальных записей, N_{new} – число новых, N_{old} – число устаревших, N_{gen} – общее число, α, β – веса (по умолчанию $\alpha = 0.7, \beta = 0.3$)	Показывает, насколько база знаний актуальна. $K^{rel} \approx 1$ – высокая релевантность, $K^{rel} < 0.5$ – данные устарели, нужна актуализация базы знаний	$N_{gen}=1000, N_{act}=750, N_{new}=200, N_{old}=50$, то $K^{rel} = 0.875$ – высокая релевантность
Показатель воспроизводимости (RPR)	$RPR = CD^{cor} / CD^{max}$, где CD^{cor} – число корректно воспроизведённых решений, а CD^{max} – общее число.	Доля решений, которые повторяются при одинаковых входных данных. $RPR > 0.9$ – высокая воспроизводимость	100 повторов ситуации S – 92 идентичных решений, т.е. $RPR = 0.92$ – высокая воспроизводимость
Актуальность вывода (V^{akt})	$V^{akt} = N^{AcD} / N^{TD}$, где N^{AcD} – число решений, принятых на основе обновлённых правил, N^{TD} – общее число решений за период	Доля решений, основанных на обновлённых правилах после актуализации через цифровой след	Из 500 решений 425 приняты по актуализированным правилам, значит $V^{akt} = 0.85$ – высокая актуальность

Также могут применяться метрики – скорость пополнения следа, точность прогнозирования, глубина анализа и т.д. в зависимости от задач. Связь адаптированного метода цифрового следа с модулями СППР показана в таблице 4.13.

Таблица 4.13 Модули СППР, связанные с цифровым следом Df

Модуль СППР	Функция в рамках Df	Связь с метриками
Предобработка онтологий	Формализация S	$\Delta E, XAI$
Анализ данных	Сбор и обработка Df	IA, K^{rel}, V^{akt}
Решатель	Обучение на основе Df	IA, RPR
Обратная связь	Актуализация правил и онтологий	$\Delta E, K^{agr}, V^{akt}$
Визуализация	Формирование отчётов и графов	XAI
Интеграция с ERP или CRM	Обмен данными с внешними системами	K^{rel}, RPR
Обучение модели	Обновление правил и функций принадлежности	$K^{rel}, RPR, \Delta E, V^{akt}$

Рекомендации по повышению эффективности применения метода:

- автокорректировка функций принадлежности $\mu(ch^S)$ через машинное обучение (например, обновление весов w_i методом градиентного бустинга);
- периодическая очистка устаревших данных (N_{old}) на основе статистической значимости;
- интеграция с реальным временем за счёт, например, использования потоковой аналитики для мгновенного обновления N_{new} .

4.3.2 Самообучение через обратную связь

Цифровой след фиксирует историю решений. Самообучение идёт дальше и динамически обновляет знания, правила и характеристики. В СОП это достигается через пополнение множества ситуаций и правил, корректировку функций

принадлежности и весов, синхронизацию модулей СППР, так снижаются информационные разрывы между уровнями.

База знаний KB (см. формулу 3.2) обновляется на основе Df и обратной связи: $KB_{i+1} = update(KB_i, Df, R)$, где KB_i – состояние базы знаний на шаге i , Df – цифровой след с записями $df = \langle s_i, d_i, p_i, r, e_i \rangle$, R – результаты решений и их оценки E^S, E^{DS}, E^{PDS} .

Обновление включает добавление новых правил Cr^{new} при выявлении новых ситуаций, корректировку весов $w_i = f(Df)$ на основе анализа успешности решений и синхронизацию онтологий $O^S \rightarrow O_{new}^S$ для устранения информационных разрывов между уровнями управления.

Процесс адаптации СППР реализуется через следующие этапы, обеспечивающие объективное и воспроизводимое обновление (см. рисунок 4.5):

- 1) идентификация необходимости обновления для мониторинга производительности модуля или получения обновлений от разработчиков;
- 2) подготовка обновления, т.е. создание новой версии модуля в изолированной среде;
- 3) валидация обновления, реализующая проверку точности на исторических данных;
- 4) А/В-тестирование – постепенное внедрение новой версии параллельно с текущей [18];
- 5) внедрение новой версии, подразумевающее полную замену старой версии после подтверждения стабильности;
- 6) откат при ошибках, автоматическое восстановление предыдущей версии;
- 7) обновление базы знаний, предполагающее интеграцию новых данных и правил в онтологическую модель;
- 8) обучение связанных модулей, включающее использование обновленных данных для дополнительного обучения.

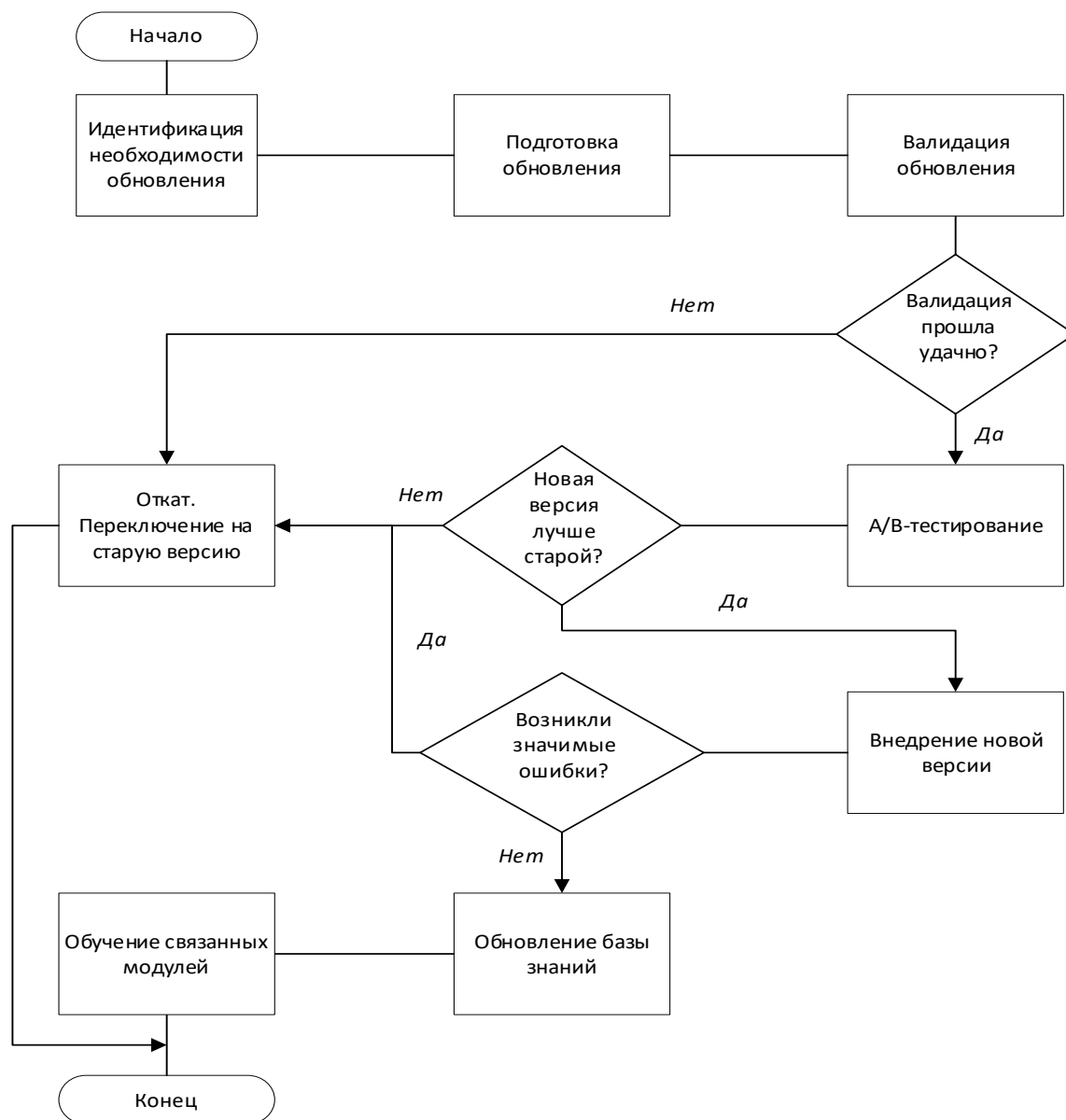


Рисунок 4.5 – Схема алгоритма процесса адаптации модулей СППР обеспечения качества продукции на промышленном предприятии

Метод самообучения модели через обратную связь в рамках СОП служит для постоянного обновления СППР и реализуется через три ключевых этапа:

1. Добавление новых данных в модель. Самообучение формализовано через множественные операции, где каждая новая ситуация s^{new} добавляется в множество ситуаций S , а соответствующие элементы пополняют множества решений D^S и сценариев P^{DS} : $S = S \cup \{s^{new}\}$, $D^S = D^S \cup \{d^{S_new}\}$, $P^{DS} = P^{DS} \cup \{p^{DS_new}\}$.

2. Для пополнения множеств используется анализ цифрового следа (§4.3.1) и обратной связи, позволяя системе динамически адаптироваться к изменениям условий. Цифровой след Df используется для выявления закономерностей в

нетиповых и кросс-уровневых ситуациях. Например, если система обнаруживает регулярное появление определённого типа дефекта, она автоматически формирует новое правило cr_i^{new} для классификации таких ситуаций.

3. Единая база данных объединяет требования уровней управления. Она устраняет информационные разрывы и координирует действия между уровнями.

Обратная связь анализирует результаты решений. Успешные решения запускают фиксацию параметров. При неудаче пересматривают веса (w_i) или добавляют новые связи между уровнями: $Cr^{new}: (ch_i^S, l_i^S) \rightarrow (d_j^S, p_k^{DS})$, где Cr^{new} – новое правило согласования, ch_i^S – характеристика ситуации, l_i^S – её мера, d_j^S – решение, p_k^{DS} – сценарий его реализации.

Например, при повторяющихся дефектах система добавляет новые характеристики (ch^{new}) онтологию, формирует правила (cr^{new}) для анализа причин и корректирует веса (w_i) для оценки последствий.

Метрика V^{akt} показывает, как часто обновляются знания – важный показатель эффективности самообучения.

4.4 Интеграция уровней управления

4.4.1 Уровни принятия решений

Управление при обеспечении качества в промышленности делится на три уровня: продукт, процесс и система. Их основные функции – регулирование, адаптация и обучение. Связь уровней и функций показана в таблице 4.14.

Таблица 4.14 Уровни принятия решений: продукт, процесс, система

Уровень	Основная функция	Характер задач
Продукт	Регулирование	Операционный контроль, соответствие требованиям
Процесс	Адаптация	Оптимизация процессов, корректирующие действия
Система	Обучение	Стратегическое планирование, инвестиции, формирование политик

Пример сложности управления кросс-уровневыми ситуациями показан на рис. 4.6.

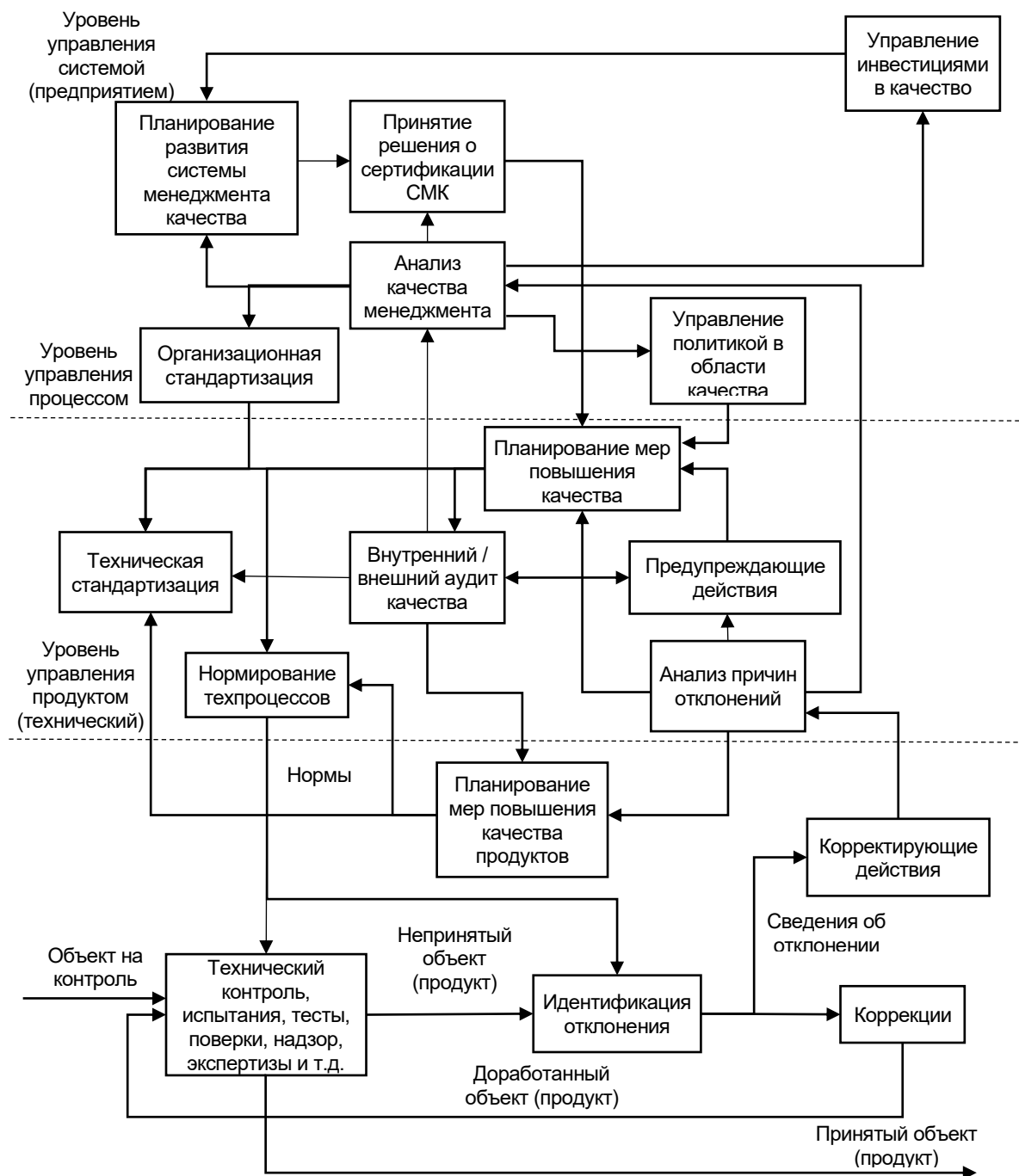


Рисунок 4.6 – Фрагмент множества связанных задач по обеспечению качества на различных уровнях управления

На основе этих уровней разработана иерархическая модель управления, обеспечивающая согласованность решений за счет автоматизации анализа кросс-уровневых ситуаций (расширение классических подходов [211]) через формализацию взаимосвязей между уровнями в условиях неопределённости. В ней типовые ситуации обрабатываются в контуре регулирования, кросс-уровневые и нетиповые, не требующие изменения онтологии предприятия – в контуре адаптации,

нетиповые, кросс-уровневые, проактивные, требующие уточнения онтологии системы (предприятия) – в контуре обучения.

Обозначения на схеме показаны в таблице 4.15.

Таблица 4.15 Обозначения элементов иерархической модели управления

Элемент	Обозначение	Роль в схеме
Объект управления	ОУ	Качество продукции, процесса или системы
Лица, принимающие решение	ЛПР 1-3	Принятие решений на уровне продукта, процесса, системы
Специалисты разного уровня	Эксперт 1–3	Обновление знаний и правил
Слой взаимодействия	Интерфейс 1–4	Адаптация вывода под уровень и роль
Базы данных	БД 1–3	По уровням: продукт, процесс, система
Интеллектуальная часть СППР	База знаний	Хранение и обновление правил и онтологий
Интеллектуальная подсистема	Решатель	Генерация новых знаний и сценариев
Типы ситуаций	$\Delta 1 - \Delta 3$	Типовая, нетиповая, кросс-уровневая
Запросы экспертов	$Q_1 - Q_3$	Сбор данных для анализа
Данные из хранилищ данных	$K_1 - K_4$	Сбор формализованных данных
Управляющие воздействия	$U_1 - U_4$	Регулирование, адаптация, обучение
Информационные воздействия от объекта управления	$I_1 - I_3$	Результаты, наблюдения, отчётность
Внешние воздействия	$El_1 - El_4$	Влияние на выбор метода и актуализацию модели
Внутреннее информационное воздействие	InI	Связь с цифровым следом
Критерии правильности решения	$Crit$	Связь с нормативами и стандартами
Результат управления	R	Годная продукция / услуга
Альтернативный результат	R'	Негодная продукция (если включена)

Уровень (контур) управления в исследуемой проблемной области – замкнутая, обладающая как прямой, так и обратной связями, схема системы управления. Замкнутость контура управления показывает обязательность принятия решения, даже если оно не поддержано всеми экспертами. Схема управления процессом представлена на рисунке 4.7.

В прототипе СППР объектом управления является информационная поддержка принятия решений при обеспечении качества продукта или услуги (процесса, системы) на основе процесса обработки данных по качеству, которые сведены во множества Ch, L, Cr для категорий S, D^S, P^{DS} .

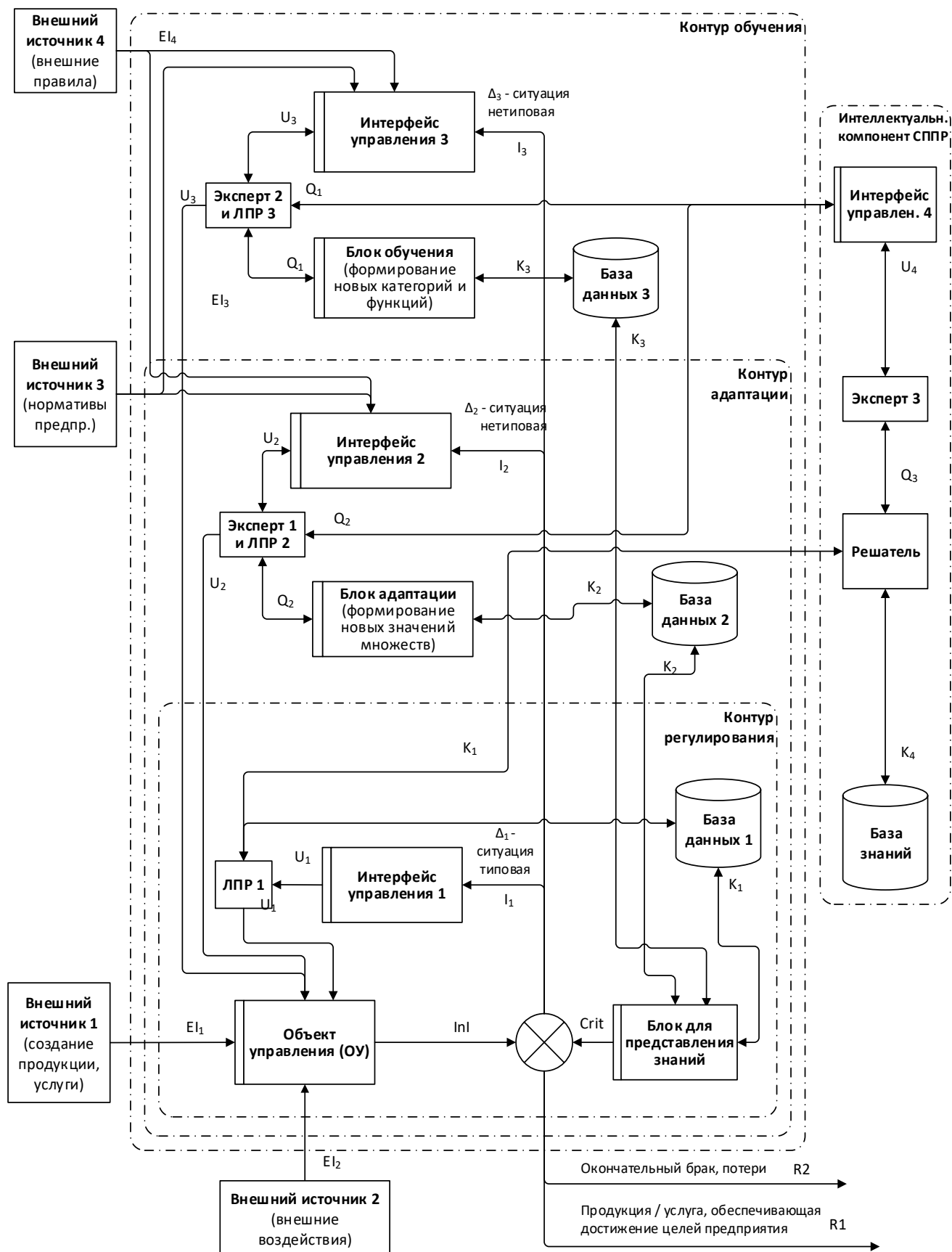


Рисунок 4.7 – Иерархическая схема уровней управления процессом информационной поддержки принятия решений в сфере обеспечения качества на основе СОП

Особенностью иерархической модели управления процессом обеспечения качества является возможность её применения на всех уровнях обеспечения качества. Обобщённый алгоритм принятия решений (см рисунок 4.8), показывает, как СППР реагирует на типовые, нетиповые и кросс-уровневые ситуации.

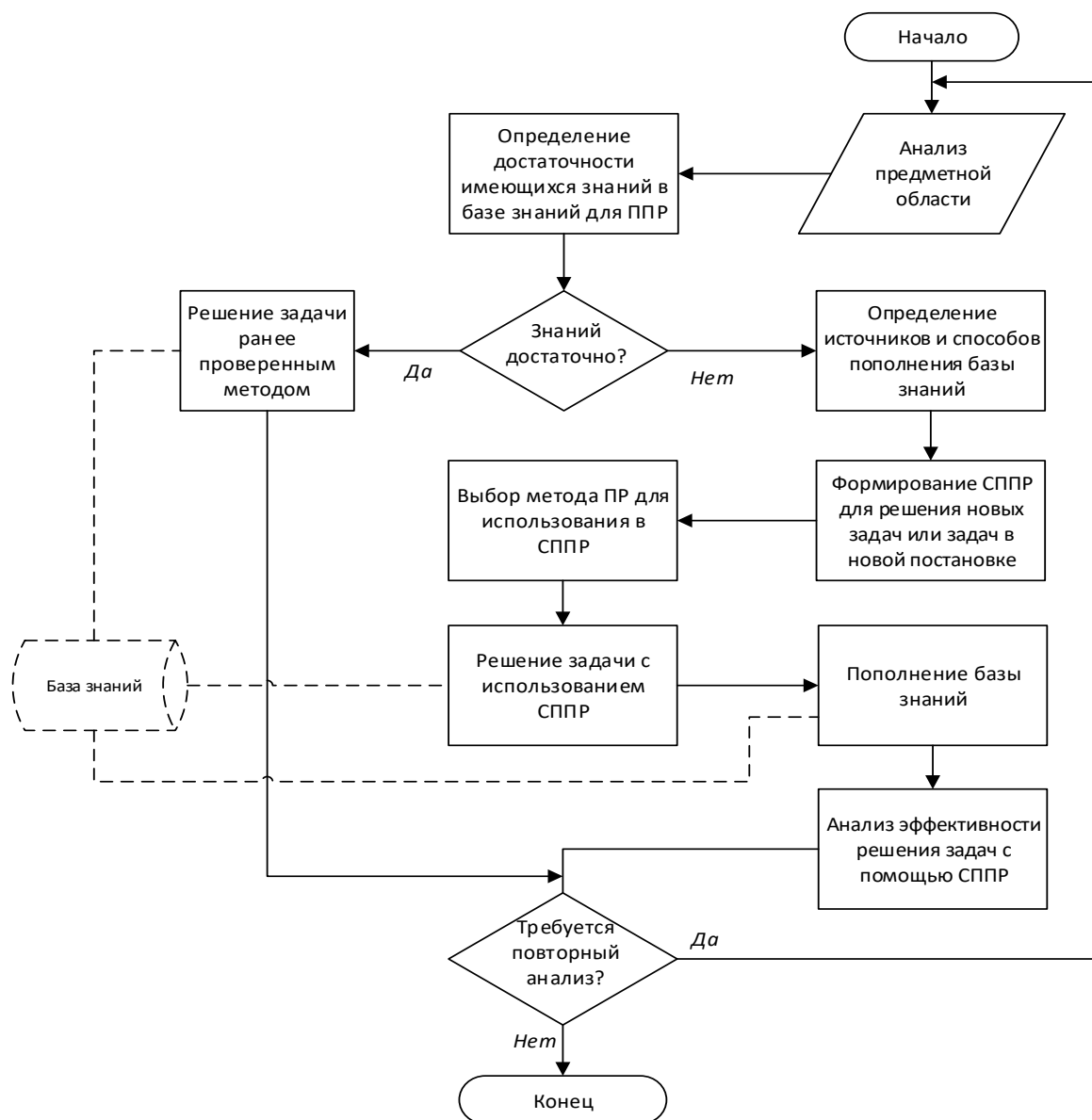


Рисунок 4.8 – Обобщённая схема алгоритма шагов по поддержке принятия решений в сфере обеспечения качества продукции на промышленном предприятии

Если информация из базы знаний достаточна, решение принимается автоматически или с минимальной адаптацией. При недостатке данных или неопределённости, система самообучается на основе цифрового следа, формирует новые правила и функции принадлежности, интегрирует знания из разных уровней управления, что снижает сложность управления и позволяет преодолеть информационные разрывы между уровнями управления.

Иерархическая модель управления процессом обеспечения качества служит основой для многоуровневой интеграции знаний и согласования вывода в СППР, реализуясь за счёт разделения по уровням управления, определения роли ЛПР и экспертов на каждом уровне и интеграции интеллектуальной подсистемы с учётом внешних и внутренних воздействий (§4.4.2).

В отличие от классических подходов, предложенная модель обеспечивает интеграцию знаний на разных уровнях управления, снижает уровень ошибок интерпретации, повышает объяснимость и согласованность вывода, обеспечивая гибкость в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях, а также реализует динамическую адаптацию правил и онтологий на основе Df .

4.4.2 Роли ЛПР, эксперты и интеграция интеллектуальной подсистемы

Объектом управления в иерархической модели выбран процесс обеспечения качества, поскольку он охватывает все уровни управления (продукт, процесс, система), является значимым для промышленного предприятия, подвержен дрейфу данных, неопределённости и кросс-уровневым взаимодействиям, а также требует объяснимости и согласованности вывода.

Для реализации многоуровневой интеграции в СППР определены роли ЛПР и экспертов, а также интеллектуальная подсистема, обеспечивающая объяснимость (XAI) и согласованность (K^{agr}) вывода.

Роли ЛПР и экспертов различаются по уровням управления (см. таблицу 4.16):

Таблица 4.16 Роли ЛПР и экспертов по уровням управления

Уровень	Роли ЛПР	Роли эксперта
Продукта	Контролёр, мастер, технолог	Инженер по качеству, главный контролёр
Процесса	Аудитор, менеджер по качеству	Руководство службы качества, финансовые службы
Системы	Руководитель, представитель по качеству	Специалист по данным, аналитик, эксперт по онтологиям

При этом каждая роль взаимодействует с соответствующим уровнем онтологии, использует адаптированные интерфейсы (см. §4.2.2), участвует в обратной связи и актуализации знаний через цифровой след.

Интеллектуальная подсистема СППР включает:

- решатель для генерации новых знаний через нечёткую логику, машинное обучение и онтологии;

- базу знаний, хранящую и обновляющую правила $Cr^S \rightarrow Cr^{DS} \rightarrow Cr^{PDS}$;

- интерфейсы для адаптации вывода под уровень и роль пользователя.

На модель управления качеством влияют:

- внешние воздействия, среди которых El_1 описывает изменения в продукции (услугах), El_2 – ошибки, изменение целей, поведение внешних акторов, El_3 – обновления внутренних нормативов, а El_4 – обновления внешних норм и стандартов.

- внутреннее воздействие от объекта управления InI , являющееся основой данных из цифрового следа;

- критерии правильности $Crit$, получаемые из нормативных документов.

Указанные воздействия влияют на выбор уровня управления (регулирование, адаптация, обучение), служат триггером для обновления знаний и правил, формируют обратную связь и актуализацию онтологий. Например, если El_3 (внутренние нормы) изменились, система обновляет онтологию, корректирует функции принадлежности $\mu(ch^S)$ через Df , формирует новый сценарий P^{DS} и обновляет базу знаний.

Интеграция интеллектуальной подсистемы и реакция на внешние и внутренние воздействия обеспечивают адаптивность, объяснимость и согласованность вывода, что повышает гибкость и устойчивость к изменениям модели СППР, особенно в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях.

4.4.3 Интеграция интеллектуальной подсистемы СППР

Для обеспечения согласованности вывода СППР и ERP-системы разработана методика согласования СППР и ERP-системы предприятия, основанная на онтологической интеграции O^{DSS} и O^{ERP} , цифровом следе, обратной связи и самообучении модели.

1. Онтологическая интеграция СППР и ERP

СППР и ERP используют разные модели знаний и терминологии, что может привести к несогласованности решений. Для их интеграции:

- строится объединённая онтология $O^{DSS-ERP}$;
- выполняется согласование классов и свойств;
- вводится объект ситуации s^{ERP} , что содержит данные из ERP;
- формируется правило согласования $Cr^{ERP} \rightarrow Cr^{DSS}$;
- вводится объект E^{ERP} , отражающий оценку решений в ERP;
- проводится согласование Ch^{ERP} и Ch^{DSS} через меру схожести $sim(ch_i^{DSS}, ch_j^{ERP})$.

2. Использование цифрового следа Df для согласования

Цифровой след (4.1), используется для обнаружения несогласованности между СППР и ERP, для обучения модели на основе ERP-данных, для обновления онтологий и правил $Cr^S \rightarrow Cr^{DS}$.

3. Обратная связь и самообучение

При выявлении несогласованности вывода СППР и ERP запускается обновление правил и онтологий, корректируются веса w_i , обновляются функции принадлежности $\mu(ch_i^S)$, применяются методы машинного обучения для обучения модели на ERP-данных, что позволяет снизить уровень ошибок интерпретации (ΔE), обеспечивает объяснимость (XAI) и гибкость в нетиповых ситуациях.

Рассмотрим пример ситуации с согласованием решений по замене оборудования. В ERP система указывает:

- $s^{ERP} = \langle ch^{ERP} = \{\text{«износ»}, \text{«стоимость»}, \text{«время простоя»}\} \rangle$,
- $Cr^{ERP} = \langle \{ \text{«заменить»}, \text{«ремонтировать»}, \text{«отложить»} \} \rangle$.

В СППР:

- $s^{DSS} = \langle ch^{DSS} = \{\text{«износ»}, \text{«показатель качества»}, \text{«надёжность»}\} \rangle$,
- $Cr^{DSS} = \langle \{ \text{«заменить»}, \text{«откорректировать параметры»} \} \rangle$.

Этапы согласования $DSS - ERP$:

1. Интеграция онтологий: характеристики ch^{ERP} и ch^{DSS} сопоставляются через меру схожести $sim(ch^{ERP}, ch^{DSS})$, которая стремится к максимуму, после добавляются новые связи между правилами Cr^{ERP} и Cr^{DSS} .

2. Обнаружение несогласованности, например, для ERP: «ремонтировать», для СППР: «заменить», $K^{agr} = 0.65 < 0.7$, тогда запуск обновления правил.

3. Обратная связь и обновление, при которых данные из ERP включены в Df , обновлены функции принадлежности и веса, K^{agr} увеличился до 0.89, выводы СППР и ERP стали согласованными.

Актуальность данных критична для согласованности между системами, поскольку низкая V^{akt} ведёт к расхождениям и ошибкам интеграции.

Для обеспечения согласованности вывода СППР и ERP-системы разработана методика, основанная на онтологической интеграции, цифровом следе и обратной связи, реализуемая за счёт согласования O^{DSS} и O^{ERP} , обнаружения и устранения несогласованностей с помощью K^{agr} , обновления правил и функций принадлежности на основе Df , самообучения модели и корректировки весов.

4.5 Комплексная оценка эффективности методологии ИППР

4.5.1 Апостериорная оценка эффективности методологии ИППР

Апостериорная оценка эффективности внедрения СППР реализуется через сравнение показателей до (*before*) и после (*after*) внедрения. Оценка проводится на основе объективных метрик (ΔE , K^{rel} , IA , RPR), субъективных оценок (рассмотрены в §4.5.2), интегрального показателя TS (рассмотрен в §4.5.3), обратной связи и цифрового следа Df , что позволяет снизить уровень ошибок интерпретации (ΔE) и повысить объяснимость (XAI), согласованность (K^{agr}) и воспроизводимость вывода (RPR), подтвердить гипотезу исследования о повышении объяснимости и согласованности. В конечном итоге появляется возможность объективного подтверждения научной новизны СОП и практической значимости, разработанной СППР.

Для оценки апостериорной эффективности внедрения СППР обеспечения качества на промышленных предприятиях на основе сценарного подхода сформирован алгоритм. Он реализует сравнительный анализ двух сценариев: работы без применения предложенной методологии и с её использованием.

Алгоритм оценки апостериорной эффективности включает пять шагов:

1. Описание характеристик, в ходе которого формируются ключевые параметры системы управления качеством до и после внедрения методов, включая уровень автоматизации, интеграцию данных (продукт – процесс – система) и механизмы накопления цифрового следа.

2. Определение направлений развития, при котором для каждого сценария (традиционного и нового) определяется логика развития процессов, уделяя внимание долгосрочным эффектам, таким как гибкость БП, снижение затрат и улучшение решений.

3. Расчёт показателей, т.е. разработка процедур для вычисления КРІ, включающих количественные метрики (например, время реакции) и качественные оценки (удовлетворённость сторон).

4. Формирование оценки, когда на основе собранных данных рассчитывается интегральная оценка с использованием комбинированного подхода (измерительно-прогнозного и оценочно-субъективного), применяя методы свёртки показателей.

5. Анализ результатов, при котором проводится сравнение КРІ до и после внедрения, учитываются мнения экспертов, и формируется заключение о целесообразности использования методологии (см. рисунок 4.9).

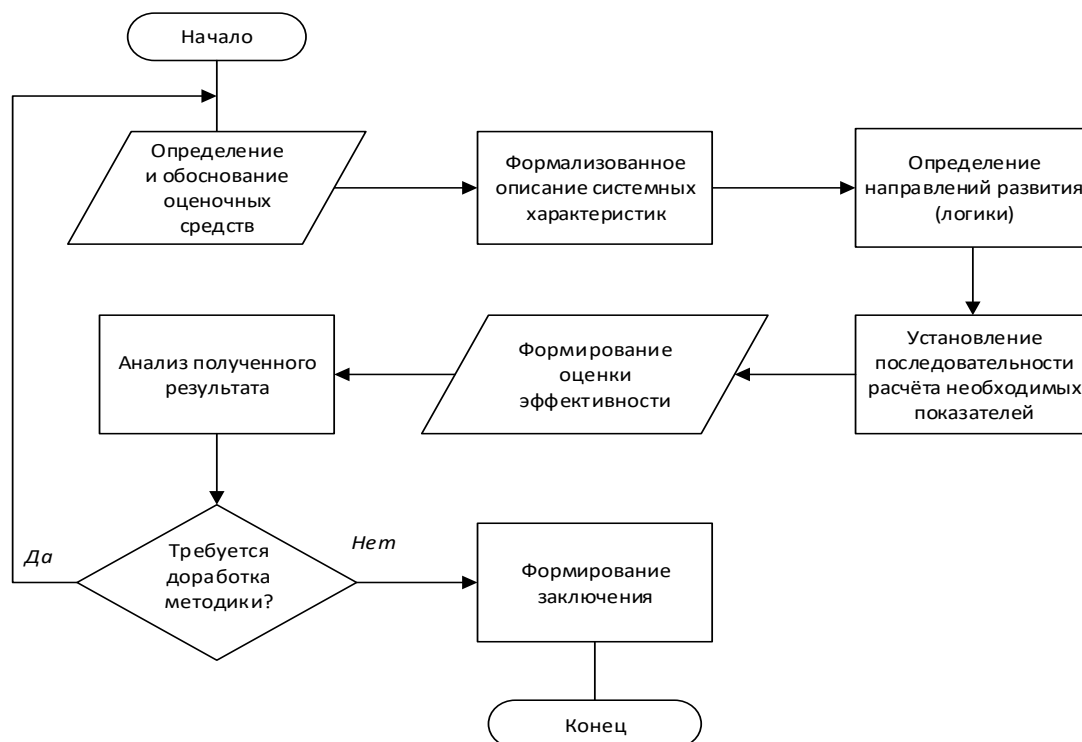


Рисунок 4.9 – Алгоритм оценки апостериорной эффективности внедрения СППР обеспечения качества в промышленности

Основные особенности алгоритма:

- сценарный подход учитывает динамические изменения и прогнозирует последствия за счет моделирования типовых, нетиповых и кросс-уровневых ситуаций, обеспечивая адаптивность системы;
- комбинирование количественных и качественных показателей позволяет провести комплексную оценку эффективности;
- учет мнений экспертов, разработчиков и эксплуатантов повышает объективность результатов, которые собираются через опросы и анализируются методами многокритериального анализа.

Таким образом, алгоритм представляет собой структурированный подход для оценки результатов внедрения методов и выявления областей улучшения СППР, учитывая, как объективные параметры, так и субъективные оценки.

4.5.2 Интеграция объективных и субъективных методов оценки эффективности

Измерительно-прогнозный и оценочно-субъективный методы оценки эффективности СППР легли в основу объективного подтверждения гипотезы исследования о повышении: объяснимости (XAI) через $P_{2.6}$ (см. приложение В), Sat (§4.5.3) и лингвистические переменные, согласованности (K^{agr}) через $P_{2.7}$ и $P_{7.2}$, устойчивости к дрейфу данных (ΔE) через $P_{6.1}$ и $P_{6.2}$, воспроизводимости (RPR) через $P_{2.5}$ и $P_{2.7}$, релевантности знаний (K^{rel}) через актуализацию правил и онтологий.

1. Измерительно-прогнозный подход к оценке эффективности

Измерительно-прогнозный метод оценивает измеримые эффекты от внедрения СППР в сфере обеспечения качества, количественно анализируя её влияние на ключевые аспекты функционирования предприятия. Подход основан на трёхуровневой модели данных (см. §3.1.2). Оцениваются характеристики: эффективность БП, качество решений, прозрачность контроля, удовлетворённость потребителей, конкурентоспособность и др.

Для каждой характеристики разработаны показатели, представленные в примерном перечне измерительно-прогнозных показателей оценки эффективности СППР (см. приложение В).

Анализ чувствительности показал: снижение $P_{2.1}$ на 10% даёт падение общей эффективности на 7% – чувствительность умеренная. Для критических показателей ($P_{3.4}$) вариация $\pm 15\%$ меняет интегральную оценку не более чем на 5% – высокая робастность модели.

Репрезентативность данных предполагает:

- исторические данные за ≥ 12 месяцев (исключение сезонности);
- анализ 3-5 бизнес-процессов (охват операций);
- наличие стратифицированной выборки по удовлетворённости клиентов (разделение по сегментам).

В отличие от KPI-систем, метод включает кросс-функциональные метрики (уровень доверия к решениям и качество моделирования ситуаций). А операционные риски учитываются наравне с финансовыми – в отличие от стандартных методов (например, сбалансированных показателей [154]).

В отличие от апостериорной оценки (§4.5.1), которая сравнивает показатели до и после внедрения, данный метод обеспечивает оценку текущей эффективности СППР, особенно в условиях нетиповых и кросс-уровневых ситуаций, дополняя апостериорную оценку на основе: нечёткой логики и лингвистических переменных, экспертных оценок и взвешивания, обратной связи и цифрового следа.

2. Оценочно-субъективный подход к анализу эффективности

Оценочно-субъективный подход анализирует потенциал изменений в социально-экономической, социальной и организационной сферах предприятия, дополняя измерительно-прогнозный метод (см. таблицу 4.17).

Таблица 4.17 Аспекты реализации оценочно-субъективного подхода

Аспект	Содержание
Социально-экономический	Улучшение процессов принятия решений, рациональное использование ресурсов, повышение качества управления
Социальный	Влияние на работников и общество
Организационный	Управление структурой и процессами предприятия

Для оценки эффективности управления на основе оценочно-субъективного метода предложено использовать интегральную оценку, основанную на мнениях: разработчиков, заказчиков и эксплуатантов. Субъективность экспертных оценок минимизируется через нормирование шкал и взвешенную интеграцию показателей, что обеспечивает учёт социальных, экономических и организационных аспектов. Обобщающая оценка формирует представление о восприятии методов поддержки принятия решений заинтересованными сторонами (см. рисунок 4.10).

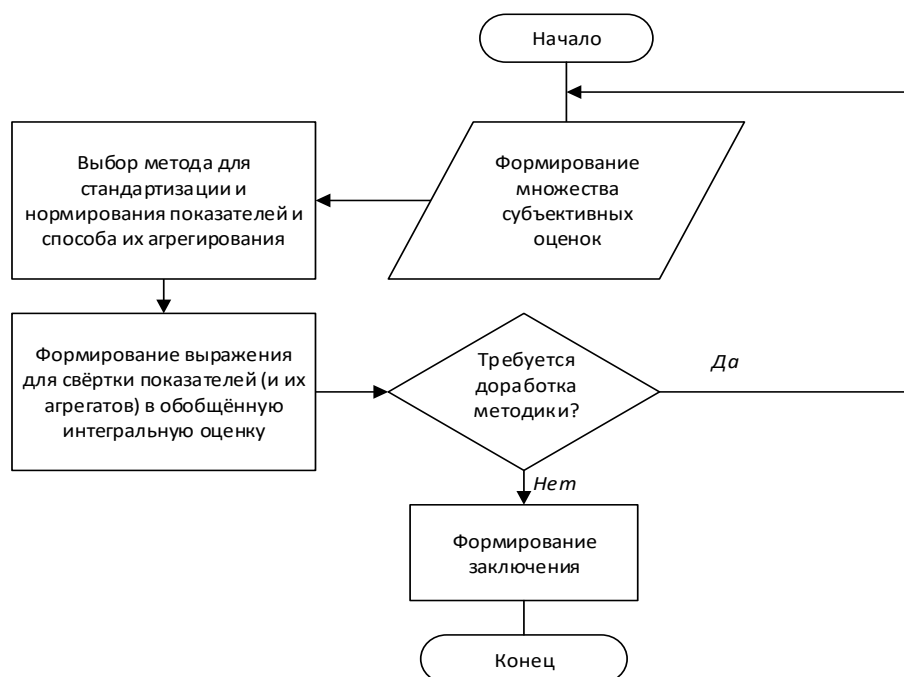


Рисунок 4.10 – Алгоритм формирования обобщающей интегральной оценки

Алгоритм формирования обобщающей интегральной оценки [210]:

1. Формирование множества субъективных оценок – показателей, которые будут использовать эксперты – заинтересованные лица. Семантика показателей должна быть адекватна критериям оценки эффективности, множество показателей должно быть ограниченным; множество показателей должно покрывать значимые аспекты методов поддержки принятия решений.

2. Определение наиболее удобного метода для стандартизации и нормирования показателей и способа их агрегирования. Необходимо применять преобразования, ограничивающие их значения в некотором интервале, т.е. на известной заранее унифицированной шкале. Причём показатели должны принимать дискретные значения, либо, при необходимости, значения лингвистических

переменных. Границами интервала должны быть минимальное и максимальное значения оценки измеряемой характеристики.

3. Формирование выражения для свёртки показателей (и их агрегатов) в обобщённую интегральную оценку.

В [157] описаны методы формирования сверток показателей (см. таблицу 4.18).

Таблица 4.18 Методы свёртки показателей

Название метода	Сущность	Достоинства	Недостатки
Метод сумм	Оценка интегрального показателя: $E = \sum_{i=1}^n (x_{ij1}/x_{ij0})$ где x_{ij1} и x_{ij0} – соответственно фактическое и базисное значение i -го показателя на j -м производственном объекте	Доступность и простота применения	Низкая объективность, высок риск ошибки
Метод суммы мест	С предварительным ранжированием по показателям S_i с учётом весов w_i : $E = \sum_{i=1}^n w_i S_i / \sum_{i=1}^n w_i$	Большая точность по сравнению с методом сумм	Сильное влияние субъективного фактора на оценки
Метод геометрической средней	Расчет коэффициентов для оцениваемых показателей находящихся в пределах $0 \leq a_i \leq 1$, где за 1 принимается максимальное значение показателя $E = [\prod_{i=1}^n a_i]^{\frac{1}{n}}$	Большая по сравнению с предыдущими методами точность	Значительная трудоёмкость
Метод расстояний	Основа метода – учет близости объектов по сравниваемым показателям к объекту-эталону (лучший по показателям). Исходные показатели стандартизируются по формуле: $E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (1 - x_{ij})^2}$, $x_{ij} = a_{ij}/a_{ije}$	Позволяет получить самую объективную оценку из перечисленных методов	Требуется эталон, сложность вычислений, отсутствие наглядности

Метод свёртки выбирается под конкретную ситуацию. Он чувствителен к весам экспертов (w_j). Проверка на согласованность (коэффициент Кронбаха $\alpha > 0.8$) показала, что изменение весов в пределах 20% меняет интегральную оценку не более чем на 3%. При экстремальных сценариях (доминирование одного эксперта) смещение может достигать 15%. Чтобы снизить риск, нужно ограничить вес эксперта в пределах 25-30% и использовать метод Дельфи для итеративной коррекции.

Требования к экспертным группам:

- минимум три категории участников: разработчики, заказчики, эксплуатанты;
- нормализация шкал (1–10) с лингвистическими переменными («низкий», «средний», «высокий») для снижения субъективности.

Оценочно-субъективный метод отличается от традиционных подходов (например, экспертных оценок или метода Delphi) интеграцией лингвистических

переменных и гибридной свёрткой показателей, что снижает субъективность за счёт стандартизированной шкалы (1–10) и учёта весов экспертов. В отличие от метода анализа иерархий, где приоритеты определяются попарным сравнением, предложенная методика использует агрегацию данных по трём группам заинтересованных сторон (разработчики, заказчики, эксплуатанты).

Разработаны и интегрированы объективные и субъективные методы оценки эффективности СППР, основанные на нечёткой логике, свёртке показателей и экспертной оценке, которые позволили повысить объяснимость и согласованность вывода, особенно в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях. На основе данных методов сформирована комплексная методика оценки эффективности.

4.5.3 Комплексная методика оценки эффективности СППР

Интеграция измерительно-прогнозного и оценочно-субъективного методов реализуется представлением интегрального показателя второго как одного из показателей первого. Для определения итогового показателя эффективности сначала рассчитывается оценочно-субъективный интегральный показатель, а затем он включается в общую методику оценки эффективности. Влияние этого показателя на конечную оценку регулируется его весом.

Методика расчета уровня удовлетворенности заинтересованных сторон:

1. Определение показателей на основе экспертизы предметной области и опроса её заинтересованных лиц (экспертов)

Пусть P – множество показателей, отражающих влияние удовлетворённости заинтересованных лиц методикой поддержки принятия решений.

Показатели выбираются по следующим направлениям:

- решение проблем заинтересованных лиц в рамках специализации СППР,
- качество поддержки принятия решений и корректность вывода.

Если показатель оказывает положительное влияние, то он учитывается как положительное число, если – отрицательное влияние, то показатель учитывается как отрицательное число.

2. Назначение весов показателей

Каждый эксперт оценивает значимость каждого показателя по шкале от 1 до 10. Итоговый вес показателя вычисляется по формуле: $V = \sum_{j=1}^m \frac{V_j}{m}$, где V_j – оценка, данная экспертом j .

3. Оценка значений показателей до и после применения методов поддержки принятия решений

Для каждого показателя P_i по каждому эксперту e_j фиксируются:

- $S1_i^j$ – значение показателя после применения;
- $S2_i^j$ – значение показателя до применения.

Оценка проводится по шкале от 1 до 10, где 1 – минимальный, а 10 – максимальный эффект.

4. Интеграция качественных оценок

Показатель удовлетворённости всех экспертов e_j методом поддержки принятия решений по каждому показателю S_i : $S_i = \sum_{j=1}^m \frac{(S1_i^j - S2_i^j)}{m}$.

Для обработки нечётких лингвистических оценок до и после внедрения l_{ij}^{bef} и l_{ij}^{aft} где $L = \{l_1, l_2, \dots, l_k\}$ – множеством лингвистических термов вводятся функции принадлежности $\mu(l) \in [0,1]$, где, например, $\mu(\text{плохо}) = 0.1$, а $\mu(\text{хорошо}) = 0.7$ и т.д.

Тогда показатель удовлетворённости переписывается следующим образом: $S_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [\mu(l_{ij}^{aft}) - \mu(l_{ij}^{bef})]$, где m – число экспертов.

5. Расчёт интегрального показателя удовлетворённости (Sat)

Интегральный показатель удовлетворённости Sat вычисляется как взвешенная сумма изменений показателей: каждый показатель умножается на свой вес. При $S_i = 0$ показатель исключается.

Учитывая, что данный показатель (Sat) будет использоваться для расчёта эффективности методов наряду с измерительно-прогнозными показателями, он должен быть нормирован с ними по одной шкале.

6. Анализ и интерпретация результатов. Полученный интегральный показатель Sat анализируется на соответствие критериям эффективности

Например: $Sat < 3$ – низкий уровень удовлетворенности, $3 \leq Sat < 7$ – удовлетворительный уровень, $Sat \geq 7$ – высокий уровень удовлетворенности.

Визуализируем описанный алгоритм (см. рисунок 4.11)

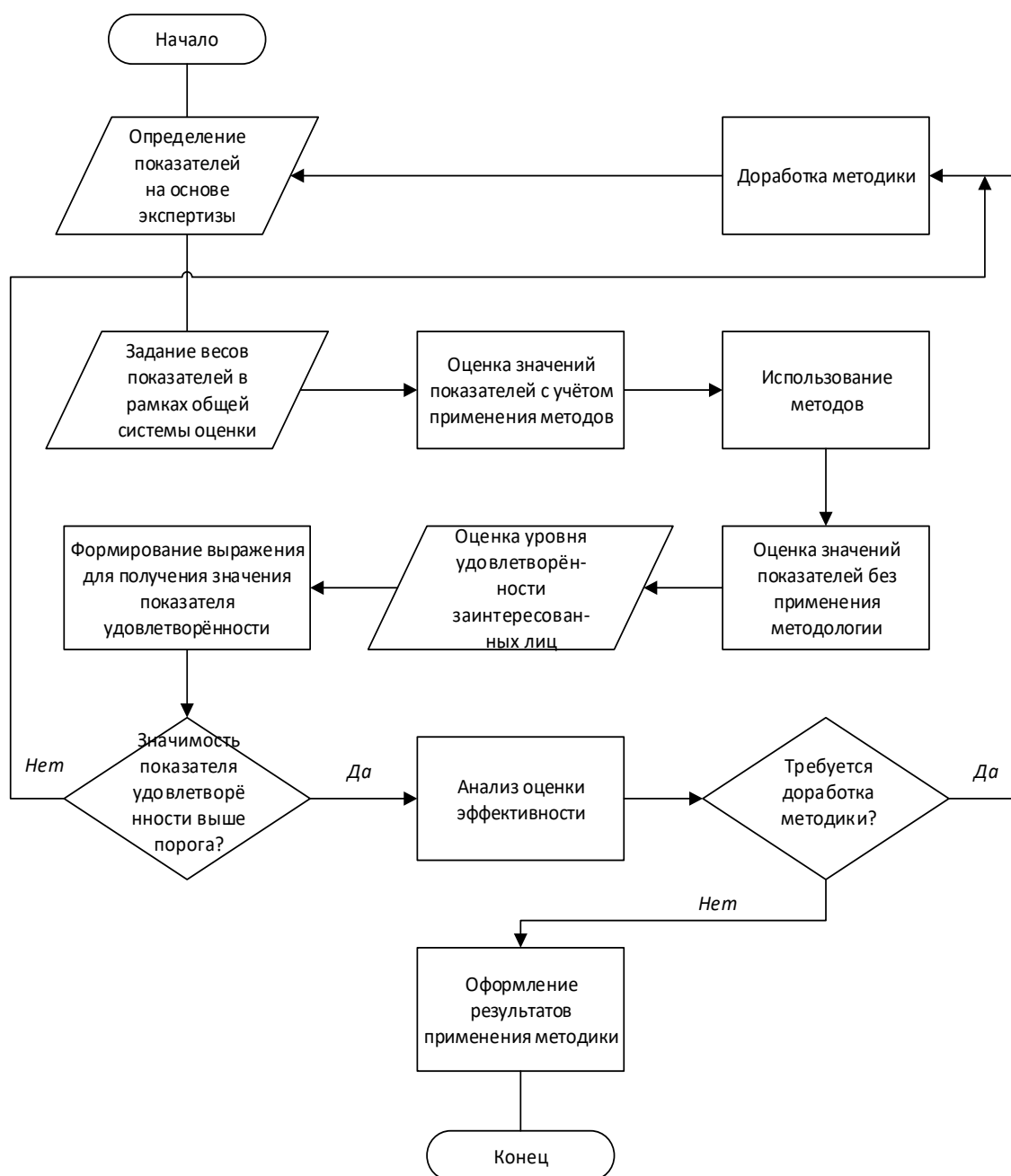


Рисунок 4.11 – Алгоритм методики формирования показателя удовлетворённости экспертов методом поддержки принятия решений

Для формирования показателя удовлетворённости экспертов методом поддержки принятия решений модератор инициирует сбор данных посредством опросов для выявления ключевых показателей, их весов и оценки решений до и после применения методики, эксперты предоставляют субъективные оценки, подвергаемые обработке для формирования системы показателей и весов, на основе

собранных данных рассчитываются интегральные метрики и проводится анализ эффективности методики. Визуализация алгоритма – см. рисунок 4.12.

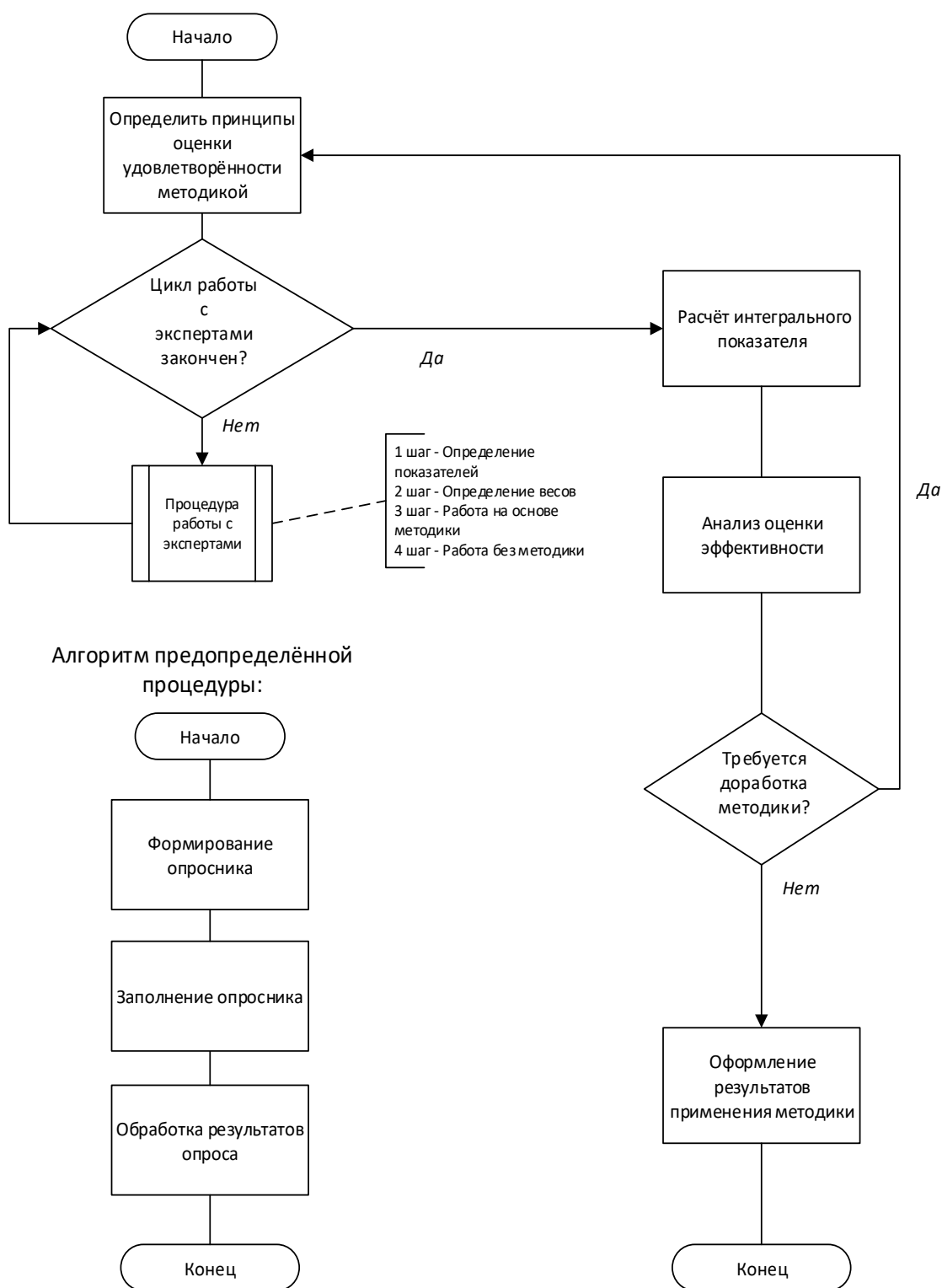


Рисунок 4.12 – Алгоритм работы с экспертами для формирования показателя удовлетворённости методикой принятия решений

Комплексная методика оценки эффективности методологии ИППР в сфере обеспечения качества интегрирует измерительно-прогнозный и оценочно-

субъективный подходы, обеспечивая объективную и всестороннюю оценку влияния внедрения методов на ключевые показатели предприятия с учетом количественных и качественных аспектов. Сформируем шаги методики:

1. Выбор показателей (из приложения В или дополнительных).

Выборка показателей P_i , где $i \in \{1, \dots, n\}$ проводится из приложения В на основе их полезности и применимости для предметной области. Показатель включается, если его значимость, оценённая экспертами, превышает пороговое значение. Перечень показателей и методы расчёта могут быть уточнены под задачу.

2. Определение показателя удовлетворённости экспертов

Показатель Sat формируется на основе экспертных оценок, собранных по трём группам: разработчики, заказчики, эксплуатанты, с использованием лингвистических переменных и нормализованных шкал.

3. Выбор метода свёртывания показателей

На основе многокритериального анализа выбирается наиболее подходящий метод свёртки: метод сумм, геометрическая средняя, метод расстояний. При этом учитываются характеристики: точность, время оценки, сложность применения и удобство расчёта, что позволяет выбрать наиболее релевантный метод для конкретного контекста.

4. Взвешивание показателей

Веса определяются индивидуально во взаимосвязи с БП. Для обеспечения адаптивности методики веса могут корректироваться по результатам предыдущих циклов оценки. Обновлённое значение веса w'_i вычисляется по формуле $w'_i = w_i + \Delta w_i$, где w_i – исходный вес i -го критерия, а Δw_i – величина изменения веса, зависящая от степени соответствия выбранного решения ожидаемым результатам. Оно вычисляется по правилу: если решение признано успешным (по оценке E^S), вес остаётся без изменений или увеличивается; если неуспешным – уменьшается. На практике это реализовано через модуль обратной связи, который фиксирует результаты решений в цифровом следе и пересчитывает веса при каждом цикле актуализации модели (см. §4.3.1).

5. Критерии эффективности

Критерии зависят от процесса. Пример шкалы для TS (см. таблицу 4.19).

Таблица 4.19 Пример шаблона таблицы критериев для интегрального показателя

Оценка результата	Диапазон
«очень плохо»	$TS < x_{down}$
«плохо»	$x_{down} \leq TS < x_{mid}$
«хорошо»	$x_{mid} \leq TS < x_{up}$
«очень хорошо»	$x_{up} \leq TS$

6. Интегральный показатель (TS)

Оценка до и после внедрения показана в таблице 4.20.

Таблица 4.20 Пример шаблона таблицы значений показателей

Показатель	Метод расчёта	Входные данные		Результат
		до	после	
описание показателя 1 (P_1)	$P_1 = f(P_{1a} - P_{1b})$	$P_{1b} = x_{1b}$	$P_{1a} = x_{1a}$	P_1
описание показателя 2 (P_2)	$P_2 = f(P_{2a} - P_{2b})$	$P_{2b} = x_{2b}$	$P_{2a} = x_{2a}$	P_2
...				
описание показателя N (P_N)	$P_N = f(P_{Na} - P_{Nb})$	$P_{Nb} = x_{Nb}$	$P_{Na} = x_{Na}$	P_N

Здесь x_{ib} – значение показателя до внедрения, x_{ia} – значение после внедрения.

Интегральный показатель эффективности рассчитывается с использованием актуальных (в том числе скорректированных) весов $TS = f(w'_i, P_i)$, где w'_i – вес i -го показателя после возможной корректировки, P_i – значение i -го показателя.

7. Анализ соответствия

После расчёта TS сравнивают с критериями (таблица 4.19) и делают вывод об эффективности внедрения методики. При необходимости методика уточняется: корректируются веса (в том числе через механизм Δw_i), метод свёртки или состав показателей (см. алгоритм на рисунке 4.13).

Например, при получении недостаточно точного результата (на границе диапазона), можно поменять метод свёртки показателей или изменить их состав и посчитать снова.

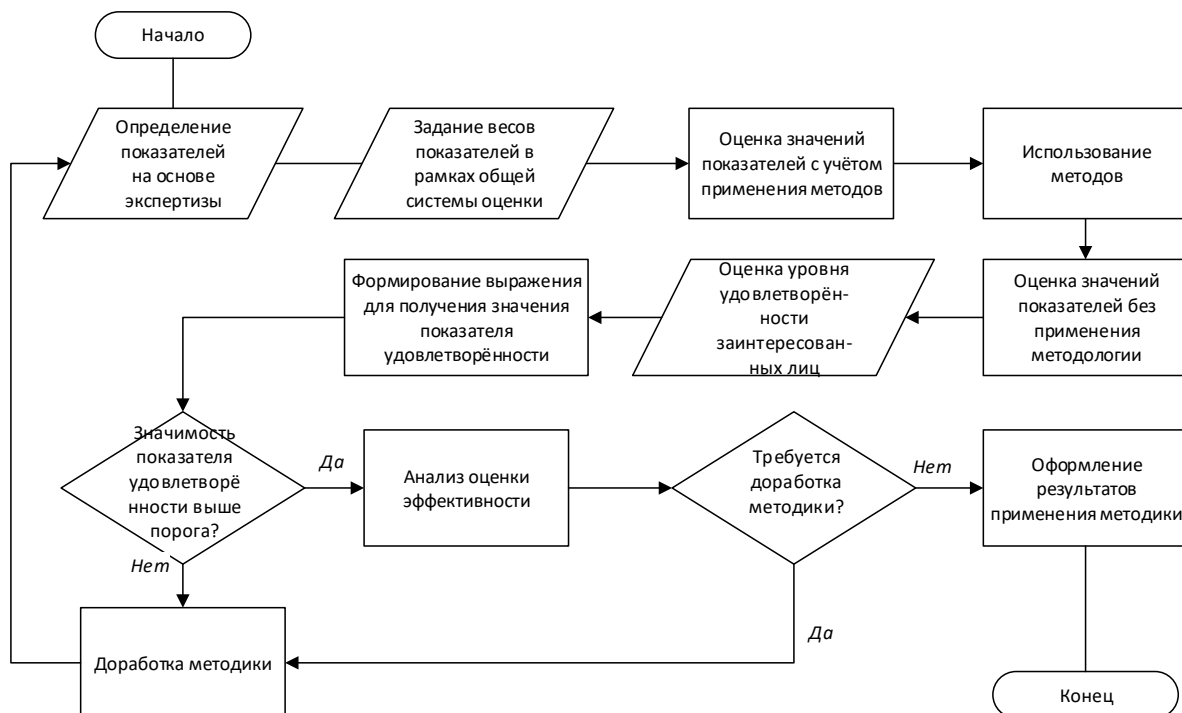


Рисунок 4.13 – Алгоритм оценки эффективности методов поддержки принятия решений в сфере обеспечения качества на промышленных предприятиях

Метрика согласованности K^{agr} , введённая в §3.4.1, является основой методики согласования вывода между уровнями управления, которая реализуется через следующие этапы:

1. Формализация решений на уровнях управления.

Для каждой ситуации $s \in S$ фиксируются решения на уровне продукта ($d_1 \in D^S$) и их степень согласованности A_1 , решения на уровне процесса ($d_2 \in D^S$) и A_2 , решения на уровне системы ($d_3 \in D^S$) и A_3 .

Каждому уровню присваивается вес w_i , отражающий его значимость в текущей ситуации: $K^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$, где $A_i \in [0, 1]$ – степень согласованности на i -м уровне (0-1), n – число уровней (продукт, процесс, система).

2. Оценка согласованности вывода

Рассчитывается значение K^{agr} . Если $K^{agr} \geq 0.89$, то вывод согласован. Если $K^{agr} < 0.7$, то запуск обновления правил и онтологий. Иначе согласование продолжается.

3. Обнаружение несогласований

Выявляют конфликты между уровнями, их причины (устаревшие правила, дрейф данных, нетиповые сценарии) и влияние на систему.

4. Обратная связь и обновление

При $K^{agr} < 0.7$ обновляют базу знаний: корректируют веса w_i и функции принадлежности $\mu(ch^S)$, добавляют правила Cr^{new} , обновляют онтологии через Df .

5. Обучение модулей

Модель обучают на новых данных, чтобы повысить устойчивость к неопределённости и дрейфу данных в кросс-уровневых ситуациях.

Анализ чувствительности показателя TS показал: влияние на критических параметрах чуть ниже среднего, на некритичных – незначительное. Рекомендуется метод главных компонент для снижения размерности данных.

Комплексная методика оценивает XAI , K^{agr} , ΔE , RPR , K^{rel} (§4.5.2), а также V^{DM} через $P_{2.1}$ и IA , через $P_{2.7}$.

Репрезентативность:

- включение $\geq 70\%$ ключевых показателей из таблицы 6.1;
- валидация на БП разных масштабов (малые, средние, крупные);
- для динамических процессов (например, управление рисками [34]) – скользящее окно 6 месяцев.

Методика отличается от существующих (метод сумм или геометрической средней) комбинацией измеримых и субъективных показателей. В отличие от метода расстояний, она не требует эталона, использует динамические веса и нормированные шкалы, что применимо в условиях неопределённости.

Обоснованность:

- высокая согласованность экспертных оценок (коэффициент Кронбаха $\alpha > 0.8$);
- вариация весов в пределах $\pm 20\%$ влияет на $TS \pm 3\%$.

Методика даёт объективную оценку эффективности и свидетельствует о научной новизне работы. Показатели $P_{1.1} - P_{8.2}$, Sat , динамическая корректировка

весов и цифровой след повышают XAI , K^{rel} , RPR , снижают ΔE в нетиповых и кросс-уровневых ситуациях.

4.6 Выводы по главе

В соответствии с подзадачами, сформулированными в таблице 4.1, в данной главе сформированы результаты:

- метод применения методологии ИППР (таблица 4.2, рисунок 4.1), который формализует шаги применения методологии для достижения воспроизводимости и объяснимости вывода (§4.1.1);
- объяснимость решений реализована через визуализацию ПСС, ролевые интерфейсы и генерацию отчётов с адаптацией вывода под уровень пользователя (онтологические графы, лингвистическая интерпретация) (§4.2.1-4.2.3);
- визуализация ПСС представляет логику вывода через онтологические графы, лингвистические переменные и функции принадлежности для ЛПР разных уровней (§4.2.1);
- цифровой след формализован как множество прецедентов с функциями подобию, корректировкой функций принадлежности через поправочный коэффициент и обновлением базы знаний и поддержан метриками K^{rel} , RPR , V^{akt} (§4.3.1);
- самообучение через обратную связь реализовано через операции с множествами S , D^S и P^{DS} и добавление новых правил согласования Cr^{new} (§4.3.2);
- иерархическая модель включает контуры регулирования (продукт), адаптации (процесс) и обучения (система) с ролями ЛПР, экспертов и учётом внешних и внутренних воздействий (§4.4.1-4.4.2);
- согласование СППР с ERP реализовано через онтологическую интеграцию O^{DSS} и O^{ERP} , с мерой схожести $sim(ch^{DSS}, ch^{ERP})$ по характеристикам, обнаружением рассогласований и обновлением правил (§4.4.3);
- апостериорная оценка выполнена как пятишаговая процедура сравнения показателей до и после внедрения по метрикам ΔE , K^{rel} , IA , RPR (§4.5.1);

- согласование между уровнями управления оценено через K^{agr} с порогом 0.7 для запуска обновления правил и онтологий через цифровой след (§4.5.3);
- комплексная оценка эффективности СППР объединяет измерительно-прогнозный и оценочно-субъективный подходы: расчёт Sat через лингвистические переменные, динамическая корректировка весов и интегральный показатель TS (§4.5.2-4.5.3).

В методологии ИППР на основе СОП впервые были интегрированы ситуационный анализ, онтологическое моделирование и самообучение через цифровой след для реализации сквозной согласованности решений на уровнях продукта, процесса и системы. В отличие от нормативного, прецедентного и онтологического подходов, методология замыкает цикл управления через обратную связь, обеспечивая непрерывную актуализацию знаний и объяснимость выводов в условиях неопределённости.

Практическая значимость разработанных результатов подтверждена внедрением. В АО «Айпл Консалтинг» доля повторяющихся замечаний снизилась на 80%, в ООО «Газпромнефть – Цифровые решения» – на 35%.

Достоверность результатов комплексной методики подтверждена: расхождение экспертных оценок минимально (Кронбах $\alpha > 0.8$), вариация весов $\pm 20\%$ меняет TS менее чем на 3%.

Глава 5. Разработка комплексного метода интеграции СОП-моделей в бизнес-процессы предприятия

Задача главы – разработка комплексного метода интеграции СОП-моделей в БП и ДО предприятия. Он включает четыре подзадачи:

- ДНП OWL ↔ СОП-модель (§5.1);
- Трёхуровневая проверка: синтаксис-семантика-прагматика (§5.2);
- поддержание актуальности модели через цифровой след и обратную связь (§5.3);
- двунаправленная интеграция онтологий в нормативные документы (§5.4).

Структура подзадач приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Структура подзадач главы 5

Подзадача	Назначение и функционал	Роль в реализации задачи
Разработка метода ДНП OWL ↔ модель СОП	Связывает онтологии и ТММ в обе стороны	Переводит нормативы в ситуации, решения и сценарии
Разработка модели трёхуровневой системы проверки (синтаксис–семантика–прагматика)	Согласует онтологии с нормативами через многоуровневую проверку	Обеспечивает соответствие моделей стандартам и требованиям предприятия
Разработка метода поддержания актуальности модели	Синхронизирует онтологии с изменениями в нормативах и процессах	Повышает устойчивость СППР и снижает вероятность ошибок
Разработка метода двунаправленной интеграции онтологий в ДО	Встраивает онтологии в нормативы с синхронизацией в обе стороны	Ускоряет актуализацию документов при смене стандартов

Глава 5 дополняет и развивает методы глав 3 и 4 обеспечивая их интеграцию с ДО, устойчивость к изменениям нормативной базы и практическое применение в условиях промышленного управления.

5.1 Семантическое сопоставление онтологий и нормативов

5.1.1 Основы двунаправленного преобразования OWL ↔ СОП-модель

Для обеспечения согласованности между онтологическими моделями и нормативным базисом предприятия разработан механизм ДНП, основанный на семантическом сопоставлении OWL-онтологий и нормативных документов, обнаружении конфликтов и генерации новых правил, интеграции лингвистических переменных в онтологическую модель.

Шаги метода могут быть описаны следующим образом:

1. Извлечение терминов из документов – используются технологии обработки естественного языка (NLP) [255] для анализа текста нормативных документов и выделения понятий (T) и их связей (Lk).

2. Семантическое сопоставление, при котором каждое понятие из множества T сопоставляется с соответствующим классом OWL-модели (O^S) через функцию совпадения $f_{\text{match}}: f_{\text{match}} \rightarrow O^S$, где O^S – множество классов онтологии.

3. Выявление противоречий, реализуемое по правилу:

если термин $t \in T$ не соответствует ни одному классу O^S , фиксируется конфликт: $Cr^{\text{conflict}} = \{t\} \cap O^S = \emptyset$.

4. Генерация рекомендаций: для каждого конфликта создаются новые правила (Cr^{new}) или корректируются существующие: $O^{\text{new}} = O^{\text{old}} \cup \{T^{\text{new}}, Lk^{\text{new}}\}$.

5. Интеграция лингвистических переменных

Для устранения разнородности знаний и интеграции с нормативами используется лингвистическая модель [21], включающая:

- Φ – функция процесса;
- T – термин или понятие процесса;
- C – отношение между понятиями или функциями в процессе.

Подробнее механизм устранения разнородности знаний на основе лингвистической модели описан в §5.1.2.

Метод ДНП онтологий и нормативов является основой для обнаружения и устранения конфликтов между моделью и документами, и реализует первый этап комплексной интеграции СОП-моделей в ДО.

5.1.2 Механизмы обнаружения конфликтов и актуализации знаний

В лингвистических моделях обычно применяются фонологическая и признаковая модели. Модель первого типа оперирует системой фонем языка, а модель второго типа – базируется на множестве признаков, характеризующих звуки естественного языка [199].

Для решения проблемы совмещения источников знаний целесообразно выделить следующие семантические элементы: понятия, признаки, свойства описываемого БП как в его модели, так и в стандарте (см. рисунок 5.1).

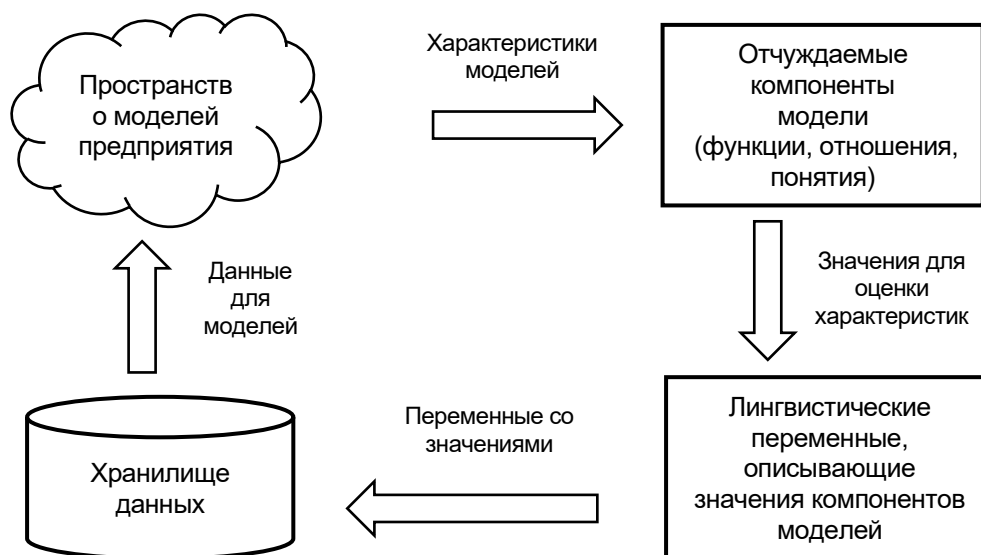


Рисунок 5.1 – Схема сохранения моделей через лингвистические переменные

Допустим для процесса «Внутренний аудит» лингвистические переменные принимают следующие значения:

- Функции процесса (Φ): «Ф1: подготовка», «Ф2: проведение аудита», «Ф3: документальное оформление несоответствия», «Ф4: составление плана корректирующих мероприятий», «Ф5: устранение несоответствий»;

- Термины процесса (T): «Т1: аудитор», «Т2: проверяемое подразделение», «Т3: документ», «Т4: соответствие», «Т5: несоответствие», «Т6: корректирующее действие»;

- Отношения процесса (C): «С1: следует из предыдущего», «С2: ассоциируется», «С3: является результатом».

При выявлении конфликтов активируется механизм обновления онтологии (см. п.4 метода ДНП). Для повышения точности и актуализации знаний используется обратная связь и цифровой след, которые фиксируют историю конфликтов и обновлений.

5.1.3 Интеграция OWL-онтологий в модель СОП

Рассмотрим подход по автоматизации преобразования OWL-моделей в формализованные структуры ситуационно-онтологической модели. Данный процесс обеспечивает формализацию требований, правил и критериев для адаптивного управления сложными системами.

OWL-модель, используемая для формализации требований и правил принятия решений, содержит компоненты, которые соответствуют структуре модели СОП (§2.1.2), показанные в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Структура онтологической модели в OWL

Компонент	Элемент модели OWL	Описание	Пример
Классы (Classes)	Situation	Описывает состояния системы, требующие реагирования	«Снижение выхода продукции», «Критический дефект»
	Decision	Представляет действия по корректировке ситуаций	«Анализ технологических параметров», «Остановка процесса»
	Scenario	Определяет последовательность реализации решений	«Проверка настроенности оборудования»
	Characteristic	Характеристики, влияющие на ситуацию	«Размер», «Прочность»
	Measure	Допустимые значения характеристик	«Допуск на размер»
Объектные свойства (Object Properties)	hasCharacteristic	Связывает ситуацию, решение или сценарий с характеристикой	Ситуация «снижение выхода годных» hasCharacteristic «Размер»
	hasMeasure	Устанавливает соответствие между характеристикой и мерой	«Размер» hasMeasure «Допуск на размер»
	requiresAction	Определяет переход от ситуации к решению	«Снижение выхода продукции» requiresAction «Анализ параметров»
	implementsAction	Связывает решение с соответствующим сценарием	Решение «Анализ параметров» implementsAction «Проверка оборудования»
Свойства данных (Data Properties)	value	Числовое или качественное значение характеристики	Значение размера «100 мм»
	priority	Приоритет решения или сценария	Приоритет решения «Анализ параметров» = «высокий»
Индивиды (Individuals)	Экземпляры классов	Конкретные реализации ситуаций, решений, сценариев	Индивид класса Situation: «Снижение выхода продукции», индивид класса Decision: «Анализ параметров»

Рассмотрим, как данные элементы могут сочетаться с элементами ситуационно-онтологической модели. В таблице 5.3 представлено сопоставление компонентов OWL-модели с элементами ситуационно-онтологической модели.

Таблица 5.3 Отношения элементов OWL и ситуационно-онтологической модели

Элемент OWL-модели	Элемент СОП-модели	Описание
Класс Situation	Множество ситуаций (S)	Описывает возможные состояния системы (например, «Критический дефект»).
Класс Decision	Множество решений (D)	Представляет действия для корректировки ситуации (например, «Анализ параметров»).
Класс Scenario	Множество сценариев (P)	Описывает последовательность шагов для реализации решения (например, «Проверка оборудования»).
Класс Characteristic	Характеристики (Ch)	Качественные или количественные параметры, определяющие ситуацию (например, «Размер», «Температура»).

Элемент OWL-модели	Элемент СОП-модели	Описание
Класс Measure	Меры (L)	Допустимые значения характеристик (например, «Допуск на размер = 100 ± 2 мм»).
Свойство hasCharacteristic	Связи между S, D, P и Ch	Устанавливает, какие характеристики относятся к ситуации, решению или сценарию.
Свойство hasMeasure	Связи между Ch и L	Определяет допустимые значения для характеристик.
Свойство requiresAction	Функции переходов (F)	Связывает ситуацию (S) с соответствующим решением (D).
Свойство implementsAction	Функции переходов (F)	Связывает решение (D) с сценарием (P).

С целью автоматизации преобразования OWL-моделей в формализованные множества ситуаций (S), решений (D^S), сценариев (P^{DS}), характеристик (Ch), мер (L) и критериев (Cr) сформируем алгоритм преобразования OWL в ситуационно-онтологическую модель. Данный процесс также должен обеспечивать обратное преобразование, что позволяет обновлять OWL-модели на основе изменений в ситуационно-онтологической модели.

Алгоритм ДНП OWL $\leftrightarrow$ СОП-модель:

I. Преобразование OWL $\rightarrow$ СОП-модель

1. Классы и индивиды.

Индивиды классов Situation, Decision, Scenario переходят в множества S, D^S, P^{DS} . Пример: $S = \{\text{«Снижение выхода продукции»}, \text{«Критический дефект»}\}$.

2. Характеристики и меры.

Характеристики (Ch) связывают с мерами (L) через свойство hasMeasure. Пример: $Ch = \{\text{«Размер»}\}, L = \{\text{«}100 \pm 2 \text{ мм»}\}$.

3. Множества ситуаций, решений и сценариев.

Индивиды Situation $\rightarrow S$, Decision $\rightarrow D^S$, Scenario $\rightarrow P^{DS}$.

Пример:

$S = \{\text{«Снижение выхода продукции»}, \text{«Критический дефект»}\};$

$D^S = \{\text{«Анализ технологических параметров»}, \text{«Остановка процесса»}\};$

$P^{DS} = \{\text{«Проверка оборудования»}, \text{«Формирование плана»}\}.$

4. Зависимости между уровнями.

Свойства requiresAction и implementsAction становятся функциями переходов $f: S \rightarrow D^S$ и $D^S \rightarrow P^{DS}$.

Пример: $f(S \rightarrow D^S)$: «Снижение выхода продукции» $\rightarrow$ «Анализ технологических параметров»; $f(D^S \rightarrow P^{DS})$: «Анализ технологических параметров» $\rightarrow$ «Проверка оборудования».

5. Критерии на основе правил OWL:

Лингвистические переменные и правила OWL (например, «Если параметр температуры вне допуска, то запустить процедуру анализа») преобразуются в критерии (Cr).

Пример: $Cr = \{\text{«Если } Ch = \text{«Температура»} \wedge L = \text{«Выход за допуск»}, \text{ то } D^S = \text{«Остановка процесса»}\}$.

II. Преобразование ситуационно-онтологическая модель $\rightarrow$ OWL:

1. Новые ситуации, решения и сценарии:

Из множеств множества ситуаций (S), решений (D^S), сценариев (P^{DS}) выделяются элементы, отсутствующие в текущей OWL-модели.

2. Новые классы и индивиды в OWL:

Для новых элементов S , D^S , P^{DS} создаются соответствующие классы и индивиды. Пример: Добавление индивида «Новый критический дефект» в класс Situation.

3. Обновление характеристик и мер:

Новые характеристики и меры добавляются в OWL как индивиды классов Characteristic и Measure. Пример: добавление меры «Новая температурная норма = 150 ± 5 °C» в класс Measure.

4. Синтез правил OWL на основе критериев:

Критерии (Cr) преобразуются в правила OWL с использованием импликативной логики. Пример правила: «Если $Ch = \text{«Температура»} \wedge L = \text{«Выход за допуск»} \rightarrow D^S = \text{«Остановка процесса»}$ записывается как:

```
SubClassOf (
  ObjectIntersectionOf (
    Situation [hasCharacteristic some Характеристика_Температура],
    Situation [hasMeasure some Мера_Выход_за_допуск]),
  requiresAction some Решение_Остановка_процесса)
```

Алгоритм (см. рисунок 5.2) обеспечивает двунаправленную трансформацию $OWL \leftrightarrow СОП$. Он обновляет и адаптирует онтологии для управления качеством на уровне процесса.

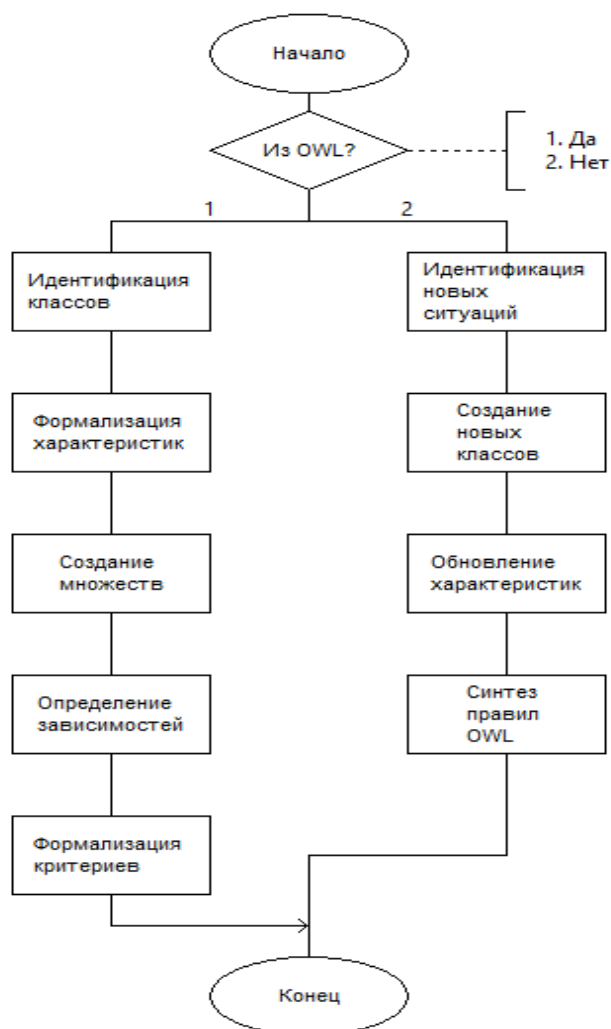


Рисунок 5.2 – Преобразование $OWL \leftrightarrow СОП$

Математическое описание преобразования:

1. Множества:

$S = \{\text{Индивиды класса Situation из OWL}\}$

$D^S = \{\text{Индивиды класса Decision из OWL}\}$

$P^{DS} = \{\text{Индивиды класса Scenario из OWL}\}$

2. Характеристики и меры:

$Ch = \text{individual} \in \text{Characteristic} \cup \langle \text{имя характеристики} \rangle$;

$L = \text{individual} \in \text{Measure} \cup \langle \text{значение меры} \rangle$.

3. Связи между уровнями:

$$f(S \rightarrow D^S) = \{(s, d^S) \mid \exists \text{ правило OWL: } s \rightarrow d^S\}$$

$$f(D^S \rightarrow P^{DS}) = \{(d^S, p^{DS}) \mid \exists \text{ правило OWL: } d^S \rightarrow p^{DS}\}$$

4. Критерии как логические выражения:

$$Cr = \{\forall s \in S, d^S \in D^S, p^{DS} \in P^{DS} \mid \exists \text{ правило OWL: } (s \rightarrow d^S) \vee (d^S \rightarrow p^{DS})\}$$

Пример преобразования ситуации «Критический дефект»:

1. Извлечение из OWL:

- класс Situation: «Критический дефект» добавляется в множество S ;
- класс Decision: «Анализ причин» добавляется в множество D^S ;
- класс Scenario: «Формирование плана» добавляется в множество P^{DS} ;
- характеристики: «Температура», «Вибрация» добавляются в Ch .
- меры: «Температура > 150°C», «Вибрация = опасная» добавляются в L .

2. Правила (Cr)

Правило OWL: «Если «Характеристика_Температура» = «опасная», то «Решение_Анализ_причин» преобразуется в критерий: $Cr1 = \{\{Ch = \text{«Температура»}\} \text{ in } \{L = \text{«опасная»}\} \rightarrow \{d^S = \text{«Анализ_причин»}\}\}$

3. Обратное преобразование:

Если в ситуационно-онтологической модели обновляется критерий $Cr1$ (например, добавляется новая мера для температуры), OWL-модель обновляется через добавление нового индивида «Температура_новая_мера = 155°C» в класс Measure и соответствующего правила:

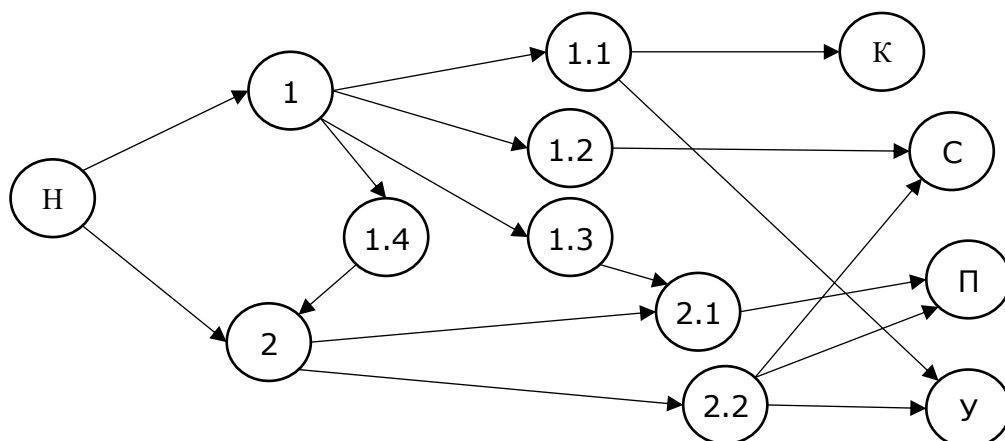
```
SubClassOf(
  ObjectIntersectionOf (
    Situation [hasCharacteristic some Характеристика_Температура],
    Situation [hasMeasure some Мера_155°C]),
  requiresAction some Решение_Анализ_причин)
```

Метод автоматизирует интеграцию OWL-моделей в СППР, формализует правила и поддерживает актуальность онтологий. Обратное преобразование обеспечивает адаптивность системы в динамической среде.

5.2 Формализация правил принятия решений через онтологическую декомпозицию

5.2.1 Трансформация онтологий в модель СОП

Достижение целей требует комплекса взаимосвязанных решений, исход которых варьируется от успеха до катастрофы (см. рисунок 5.3).



Н – начальное решение; 1, 2, 1.х, 2.х – этапы решения; У – успешный результат; С – нейтральный результат; П – плохой результат; К – катастрофический результат

Рисунок 5.3 – Пример разброса вариантов результатов сложного решения

Сложность принимаемых решений обуславливает необходимость сбора и формализации в виде моделей информации, формируя онтологию предприятия, которую можно описать с помощью СОП.

Для наглядного представления трансформации онтологических связей в множества можно использовать графы. На рис. 5.4 продемонстрирован пример применения метода «5 почему» для анализа причины дефекта, что иллюстрирует работу многоуровневой модели.

После сопоставления онтологий с нормативами и интеграции лингвистических переменных Φ , T , C осуществляется декомпозиция онтологий в модель $S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle$.

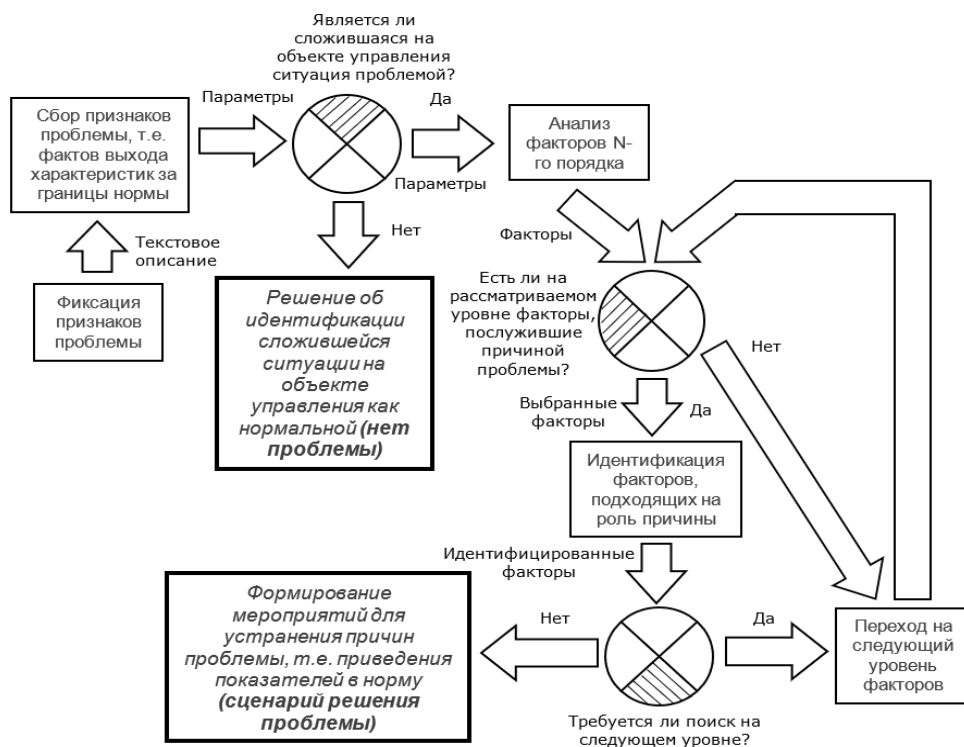


Рисунок 5.4 – Схема процесса принятия решения на примере поиска решения проблемы

Для формализации правил принятия решений используется модель: $Cr^S: (Ch^S, L^S) \rightarrow D^S$, $Cr^{DS}: (Ch^{DS}, L^{DS}) \rightarrow P^{DS}$, $Cr^{PDS}: (Ch^{PDS}, L^{PDS}) \rightarrow Df$, где обозначения взяты из §2.1.2, а Df – цифровой след.

Процесс помогает интегрировать семантические модели обеспечения качества и ТТМ, чтобы создать универсальную структуру описания сложных систем. Сформируем метод трансформации онтологий в модель (см. рисунок 5.5).

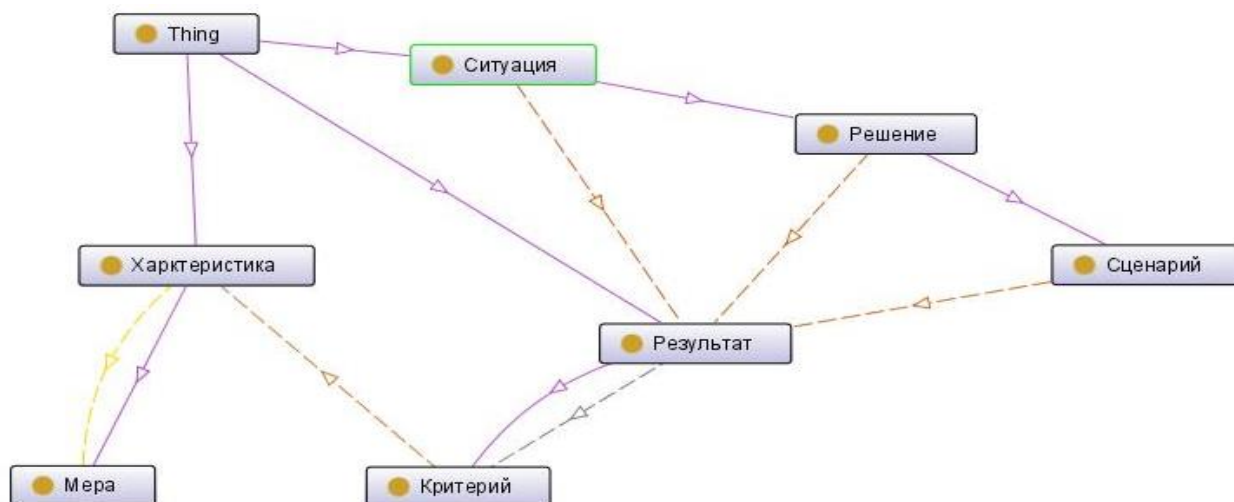


Рисунок 5.5 – Онтология OWL как описание связей ситуации, решения и сценария

Онтологии представляют собой иерархическую структуру, где каждый уровень описывает объекты, их свойства и взаимодействия. Для преобразования онтологической модели в комплекс множеств выполним декомпозицию онтологий:

1. Идентификация сущностей

Выявляют ключевые компоненты предметной области: параметры, процессы, нормативные документы. Примеры: «параметры изделия», «стандарт, определяющий требования к качеству».

2. Формализация отношений

Между сущностями устанавливают ПСС. Их описывают множествами правил $R = \{e_i, e_j, r_k\}$, где e_i и e_j – сущности, а r_k – тип отношения между ними. Пример: правило «если параметр А, то влияние на стандарт В» $\rightarrow$ (параметр А, стандарт В, влияние).

3. Трансформация связей в множества ситуаций, решений и сценариев

Ситуации, решения или сценарии – множества. Ситуации (S) характеризуют состояние системы, решения (D^S) – действия по корректировке состояния, а сценарии (P^{DS}) – последовательность шагов. Пример: «снижение выхода продукции» $\rightarrow$ решение «анализ технологических параметров» $\rightarrow$ сценарий «проверка настроенности оборудования».

Пример трансформации онтологии «качество продукта» в регламент:

- Характеристики: размер (Ch_{size}), вес (Ch_{wght}), прочность (Ch_{stgth}).
- Меры: допуск на размер (L_{size}), единицы прочности (L_{stgth}).
- Процессы: производство, испытание, упаковка.
- Стандарты: внутренние технические условия (ТУ).

Алгоритм преобразования ($OWL \rightarrow СОП$) можно представить, как совокупность шагов:

1. Идентификация связей

Определяются ПСС между сущностями. Например, «рост дефектности связан с несоответствием параметров размера».

2. Формализация в множества

Каждое отношение преобразуется в правило. Например, правило «если характеристика размер выходит за допуск на 1% или прочность меньше 20 единиц, то ТУ считаются нарушенными» записывается как:

$$(Ch_{size} \geq \pm 1\% \text{ и } Ch_{stgth} \geq 20 \text{ед.}) \rightarrow (\text{Несоответствие ТУ}).$$

3. Интеграция с нормативами

Интеграция правил $Cr^S \rightarrow Cr^{DS} \rightarrow Cr^{PDS}$ с нормативами реализуется за счёт сопоставления Cr^S с Cr^{norm} из нормативных документов, обнаружения конфликтов $Cr^{confl} = Cr^S \cap Cr^{norm} = \emptyset$, автоматического обновления правил и онтологий через цифровой след.

Математическое описание данных переходов осуществляется через формулы из §2.1.5, обеспечивающие формализацию отношений между компонентами модели, причём онтология предприятия O^S преобразуется в модель $S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle$ и далее в правила $Cr^S \rightarrow Cr^{DS} \rightarrow Cr^{PDS}$. Для повышения точности преобразования могут использоваться методы, агрегирующие нечёткие правила в чёткие выводы.

Разработан метод трансформации онтологий в ситуационно-сценарную модель $S \rightarrow D^S \rightarrow P^{DS}$ как основа для Трёхуровневой проверки онтологий и повышения устойчивости к изменениям.

5.2.2 Верификация решений на основе СМК

Для повышения технологической и методологической результативности требуется современный ИТ-инструмент, который усилит интеграцию менеджмента качества в работу предприятия.

Ключевым элементом СМК является её документация, представимая в виде онтологии. Метод её верификации – проверка соответствия требованиям, содержащим показатели, критерии и ограничения. Проверки, аудиты и квалитетические методики используются для этой цели, на уровне продукта (контроля качества) [125, 163]. Функционал СМК, связанный с целями в области качества, показателями качества процессов, КРІ работников и т.д. расширяет подход на все БП предприятия. В таблице 5.4 показано подобие по структуре между стандартом ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [135] и артефактами организации, связанными с иерархическими уровнями источников опыта для принятия решений.

Таблица 5.4 Фрагмент структуры связей ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и источников опыта для принятия решений

Элементы стандарта	Уровень источника опыта для принятия решений
4 Среда организации 4.1 Понимание организации и ее среды	уровень культуры принятия стратегических решений руководством
5 Лидерство 5.1 Лидерство и приверженность	уровень культуры принятия стратегических решений руководством
7.5 Документированная информация 7.5.1 Общие положения 7.5.2 Создание и актуализация 7.5.3 Управление докум. информацией	уровень общей корпоративной культуры исполнителей, уровень стандартов организации и выполнения БП
8 Деятельность на этапах жизненного цикла продукции и услуг 8.1 Планирование и управление деятельностью ...	уровень культуры принятия стратегических решений руководством, уровень культуры принятия оперативных решений, уровень общей корпоративной культуры исполнителей
8.2 Требования к продукции и услугам 8.2.1 Связь с потребителями	уровень культуры принятия оперативных решений, уровень общей корпоративной культуры исполнителей, уровень стандартов организации и выполнения БП

Для внедрения прогнозных и советующих функций онтологий необходимо перейти от хранения документов в бумажном или файловом виде к реляционным базам данных, использующим правила на основе прецедентов и других методов, что позволяет создать самоактуализирующуюся СППР, охватывающую всю управленческую иерархию, автоматически преобразующую данные в знания и обеспечивающую их доступность при меньших затратах на внедрение.

5.2.3 Интеграция нормативных документов в правила принятия решений

Интеграция нормативных документов в правила на которых работает СППР важна при обеспечении качества в промышленности. Данная задача требует формализации содержания нормативных документов и их преобразования в машинно-читаемый формат через онтологические модели. Принципы декомпозиции (парсинга) нормативных документов:

- классификация требований, т.е. разделение требований на категории;
- идентификация зависимостей, т.е. определение ПСС между требованиями;
- нормализация формулировок, т.е. приведение текстовых требований к единому формату для последующего анализа.

Для автоматизации процесса интеграции нормативных документов в СППР используем комбинированный подход, основанный на семантическом анализе и структурировании информации, реализующийся за следующие шаги:

1. Анализ структуры документа. Идентификация ключевых разделов (*например*, определение терминов, общие положения, требования, процедуры).

2. Извлечение требований. Преобразование текстовых требований в формат логических утверждений. Для обработки неполных формулировок в тексте нормативов используется нечёткая логика.

3. Формализация через OWL-модель. Создание онтологической модели на языке OWL, где каждый класс представляет конкретное требование или правило.

4. Генерация правил. Преобразование онтологических связей в формат «ЕСЛИ-ТО» правил для интеграции в СМК. При генерации правил из онтологии учитываются нечёткие зависимости, возникающие в ситуациях, где нормативы не покрывают все сценарии.

На рис. 5.6 показан алгоритм интеграции нормативных документов в СППР.

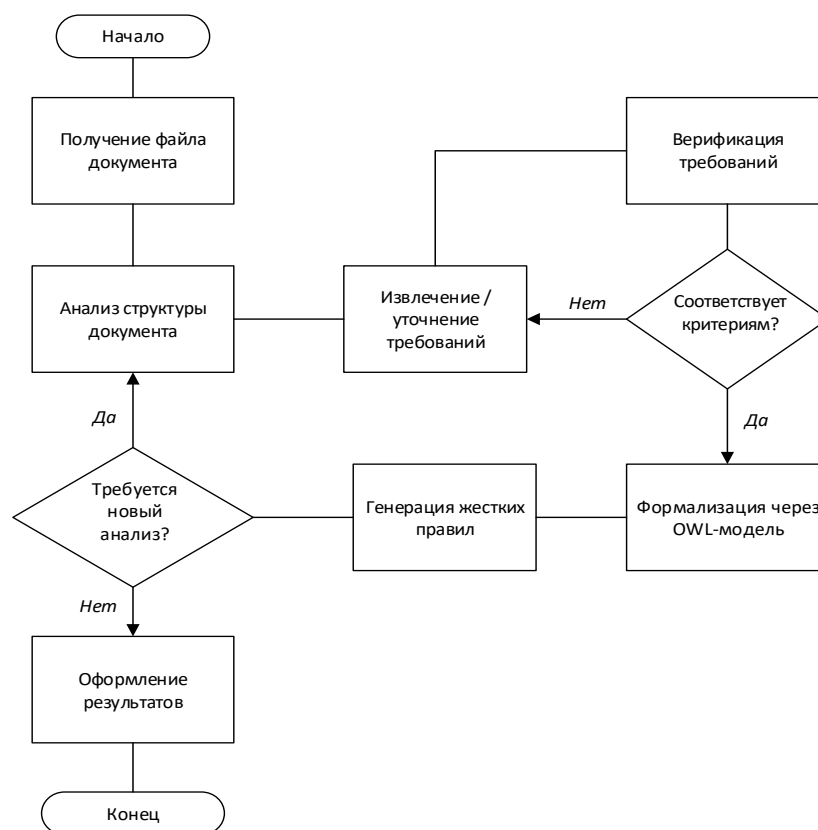


Рисунок 5.6 – Схема алгоритма интеграции нормативных документов в СППР

Полученные данные позволяют уточнить модель для работы в нетиповых ситуациях. Пример OWL-модели, построенной на основе ГОСТ Р 52745-2021, представлен на рис. 5.7. Правила для принятия решений на основе данного ГОСТ сформируем с использованием языковой модели ИИ.

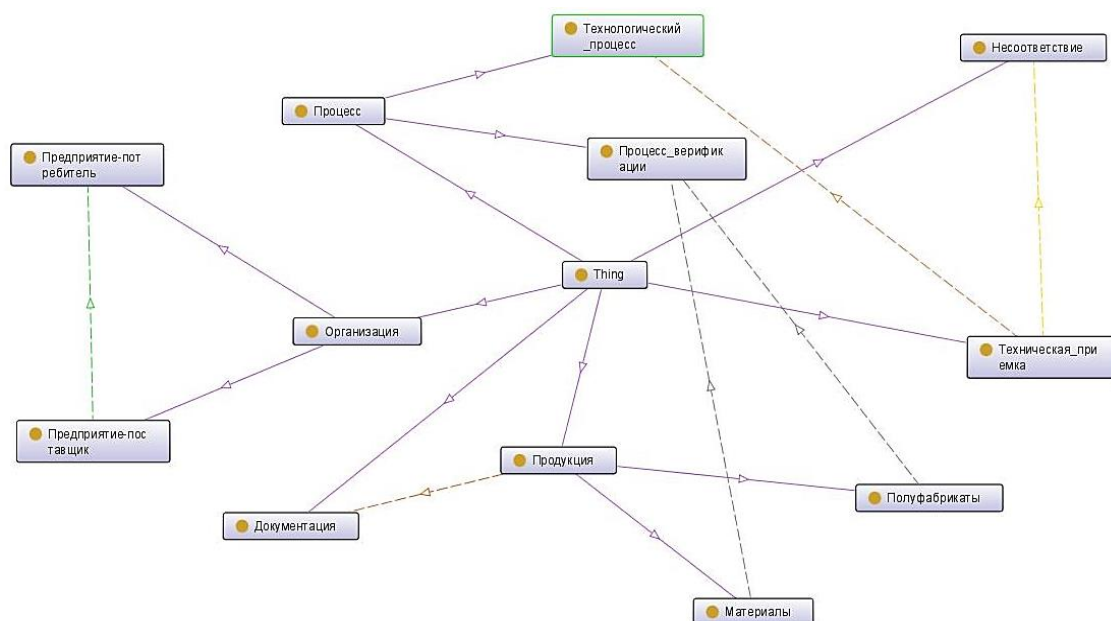


Рисунок 5.7 – OWL-модель для содержимого стандарта ГОСТ Р 52745-2021

Пример фрагмента автоматически сгенерированных правил, полученных генеративным алгоритмом на рисунке 5.8.

1. **Материалы без документации не допускаются к верификации.**
 - Пример формализации:
Если материал без документации → Отклонить материал.
2. **Все материалы должны соответствовать НД.**
 - Пример формализации:
Если материал не соответствует НД → Запустить процедуру корректировки.
3. **Необходимо своевременно уведомлять поставщиков о несоответствиях.**
 - Пример формализации:
Если выявлено несоответствие → Уведомить поставщика.
4. **Средства измерений должны быть поверены/откалиброваны.**
 - Пример формализации:
Если средство измерений не поверено → Приостановить использование.
5. **Проверка комплектности и внешнего вида материалов обязательна.**
 - Пример формализации:
Если комплектность или внешний вид нарушен → Отклонить материал.
6. **Результаты верификации должны быть задокументированы.**
 - Пример формализации:
Если результаты не задокументированы → Повторить процедуру.
7. **Контроль параметров технологического процесса обязателен.**
 - Пример формализации:
Если параметр процесса вне допуска → Запустить процедуру анализа.
8. **Необходимо обеспечивать прослеживаемость продукции.**
 - Пример формализации:
Если отсутствует прослеживаемость → Приостановить выпуск продукции.
9. **Маркировка продукции должна соответствовать требованиям.**
 - Пример формализации:
Если маркировка некорректна → Исправить маркировку.
10. **Консервация продукции должна быть выполнена согласно НД.**
 - Пример формализации:
Если консервация не выполнена → Отклонить продукцию.
11. **Лаборатории должны быть аккредитованы для проведения испытаний.**
 - Пример формализации:
Если лаборатория не аккредитована → Не принимать результаты испытаний.
12. **При выявлении повторяющихся дефектов необходимо приостановить приемку.**
 - Пример формализации:
Если выявлены повторяющиеся дефекты → Приостановить приемку.
13. **Необходимо контролировать сроки хранения продукции.**
 - Пример формализации:
Если срок хранения истек → Отклонить продукцию.
14. **При невыполнении корректирующих мероприятий приемка прекращается.**
 - Пример формализации:
Если корректирующие мероприятия не выполнены → Приостановить приемку.
15. **Необходимо обеспечивать раздельное хранение годной и несоответствующей продукции.**
 - Пример формализации:
Если обнаружено смешанное хранение → Разделить продукцию.

Рисунок 5.8 – Фрагмент автоматически сгенерированных правил по ГОСТ Р 52745-2021

Правила требуют проверки экспертом, но генерация ускоряет работу примерно на 90%.

Трёхуровневая проверка нормативов и онтологий (V):

1. Синтаксический уровень (функция V_{stx}). Проверяет формальное соответствие документа стандартам OWL и XML:

$$V_{\text{stx}}(\text{Document}) \rightarrow \{\text{"соответствует"}, \text{"не соответствует"}\}$$

2. Семантический уровень (функция V_{smc}). Сравнивает термины документа с базой знаний. Для уровня ситуации:

$$V_{\text{smc}}(Ch^S, L^S, Cr^S) = \{\text{"согласовано"}, \text{"конфликт"}\}$$

3. Прагматический уровень (функция V_{pmc}). Оценивает применимость документа к ситуации через обратную связь. Использует нечёткую оценку:

$V_{\text{pmc}}(s_i) = f(Ch^S, L^S, Cr^S) \in [0, 1]$, где 1 – полное соответствие, 0 – полное несоответствие.

Верификация считается успешной, если все три уровня дают положительный результат. Она интегрирована в СОП и позволяет проверять нормативные документы на соответствие текущей ситуации.

Результат. Метод интеграции нормативов в правила СППР включает декомпозицию, классификацию требований и формализацию через OWL. Он переводит текстовые нормы в машинно-читаемые правила.

5.3 Поддержание актуальности модели через цифровой след и самообучение

5.3.1 Структура нормативных документов для извлечения требований

На промышленном предприятии используются следующие типы нормативных документов:

- руководства (например, Руководство по качеству), являющиеся обобщающими документами, описывающими политику и стратегию;
- стандарты организации (СТО), являющиеся основными документами, устанавливающими порядок взаимодействия, функции, допуски и требования;

- должностные инструкции, являющиеся документами, определяющими функции, права и обязанности сотрудников;
- положения о подразделениях, регламентирующие функции и ответственность структурных подразделений;
- рабочие инструкции, описывающие алгоритмы выполнения операций, включая внештатные ситуации.

Каждый тип документа имеет разную степень структурированности, объём и уровень детализации, что влияет на возможность его формализации в онтологию и интеграции в СППР. В качестве основы для исследования выбран СТО, поскольку он охватывает ключевые аспекты обеспечения качества, имеет структуру, подходящую для онтологического моделирования, широко используется в промышленности, является основой для разработки инструкций, регламентов и других нормативных документов.

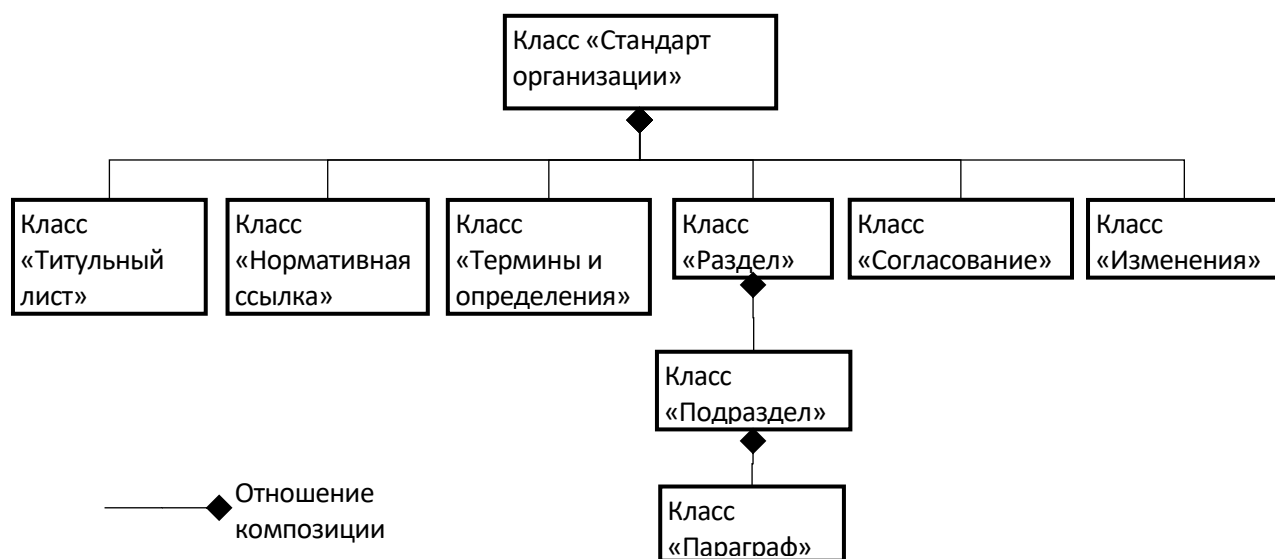


Рисунок 5.9 – Объектная структура стандарта организации в Idef5[45]

Для формализации структуры нормативного документа и его интеграции в СППР рассмотрены разные подходы к моделированию:

- IDEF5 для объектно-ориентированного описания структуры СТО (рис. 5.9);
- OWL для семантического моделирования и логического вывода (рис. 5.10);
- BPMN, EPC, UML для описания процессов, но менее пригодны для формализации требований.

IDEF5 обеспечивает понимание структуры документа и возможность её трансформации в онтологию, но OWL лучше подходит как основа для семантической интеграции, в силу известной структуры, лучше позволяет обеспечивать обратную связь через цифровой след, поскольку алгоритм выгрузки из файла формата RDF поддерживается известными библиотеками языков программирования.

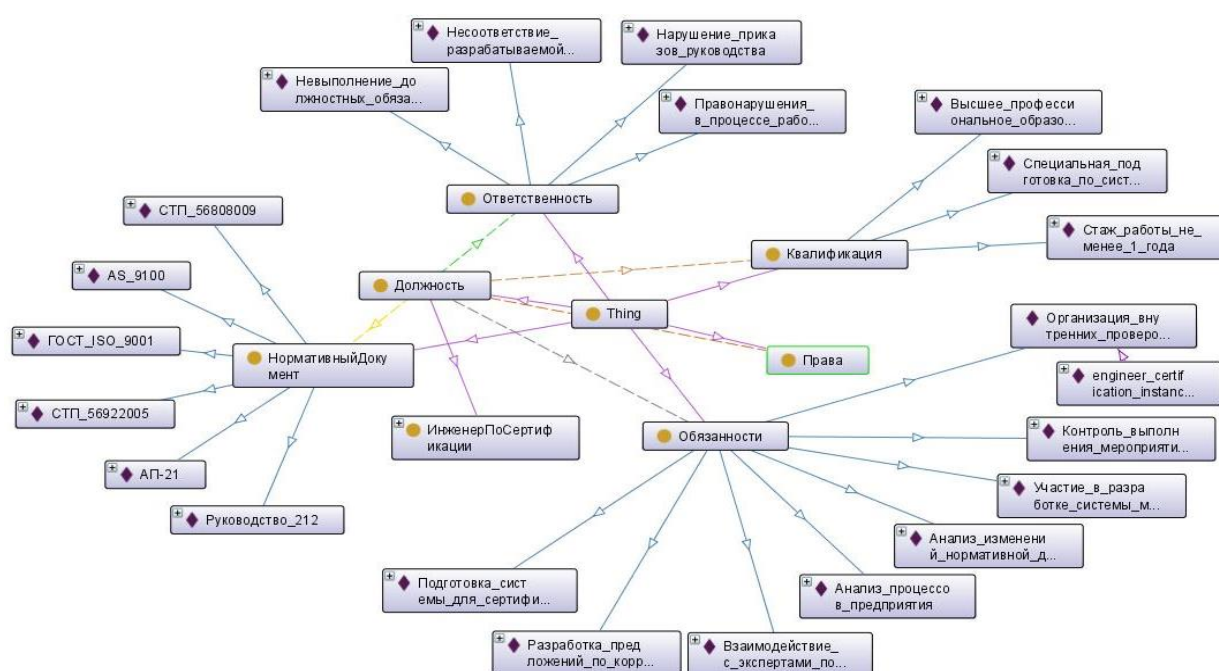


Рисунок 5.10 – Структура должностной инструкции в виде owl-модели в Protege 4.3

Анализ нормативных документов показал, что СТО – наиболее подходящий тип документа для онтологического моделирования, а для моделирования лучше подходит язык OWL.

5.3.2 Сопоставление структуры нормативных документов и онтологических моделей

Поддержание актуальности модели при изменениях в нормативах и процессах предприятия требует декомпозиции и ДНП нормативных документов и онтологий, что реализуется за счёт сопоставления структуры нормативных документов и онтологических моделей на примере стандарта организации. Пример формализации разделов стандарта организации приведён в таблице 5.5, показывающий интерпретацию элементов документа в терминах СОП и их интеграцию в СППР.

Таблица 5.5 Интерпретация разделов СТО

Раздел СТО	Элемент онтологии	Описание	Пример
Область применения	Ch^S, E^S	Характеристики и оценка ситуации	Ch^S : «диссертация», «рукопись», «на русском языке» E^S : «соответствует требованиям» / «не соответствует»
Нормативная ссылка	L^S, Mp (см. описание к (5.1))	Меры и классификация требований	L^S : «библиографическая ссылка», «выходные сведения» Mp : Cr^S = «ГОСТ 2.105, ГОСТ 7.11»
Термины и обозначения	$Ch^S, L^S, Ch^{DS}, D^S, P^{DS}, Rt$, где Rt – результат, не являющийся D^S, P^{DS}	Лингвистические переменные и понимание терминологии	L^S : «предельное отклонение», «допуск» Ch^S : «тип документа», «язык», «формат»
Требования	$Ch^S, L^S, Ch^{DS}, L^{DS}, Ch^{PDS}, L^{PDS}, D^S, P^{DS}, R, Cr^S, Cr^{DS}, Cr^{PDS}$	Правила согласования и сценарии действий	Cr^S : «если диссертация кандидатская, то структура = рукопись» Cr^{DS} : «если есть рисунки, то они нумеруются и ссылаются в тексте»
Ответственность / ресурсы	D^S, P^{DS}	Решения и сценарии реализации	D^S : выбор формата, оформление списка литературы P^{DS} : подготовка, редактирование, сдача диссертации

Таблица 5.5 демонстрирует, как структура стандарта организации (СТО) может быть интерпретирована через элементы модели СОП $S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle$, что позволяет рассматривать нормативные документы как источник знаний, из которого извлекаются характеристики, меры, правила и оценки.

На основе этих данных построена модель:

$$Nm = \langle O, Dm, Mp, Df \rangle, \quad (5.1)$$

в которой Nm – структура правил в виде множества; O – онтологическая модель предметной области, включающая Ch^S, Ch^{DS}, Ch^{PDS} – характеристики всех уровней, L^S, L^{DS}, L^{PDS} – лингвистические переменные, выступающие как меры, Cr^S, Cr^{DS}, Cr^{PDS} – правила согласования, E^S, E^{DS}, E^{PDS} – оценки соответствия; Dm – как множество нормативных, технологических и рабочих документов, на которые ссылается стандарт; Mp – функция отображения правил из онтологии на нормативы, реализующая описание правил отображения, например, Cr^S : «если есть рисунки, то они нумеруются и ссылаются в тексте» $\rightarrow Dm$: ГОСТ 2.105, Cr^S : «если есть сокращения, то они расшифровываются» $\rightarrow Dm$: ГОСТ 7.11; Df – цифровой след, фиксирующий историю применения правил и актуализации модели.

Модель (формула 5.1) реализует двунаправленное соответствие между нормативными документами и онтологией.

Как показано на рис. 5.11, модель O может совершенствоваться за счёт введения новых сущностей (например, «версия», «временной период»), обновления характеристик, мер и правил в зависимости от времени, применения лингвистических переменных для нечёткого описания изменений.

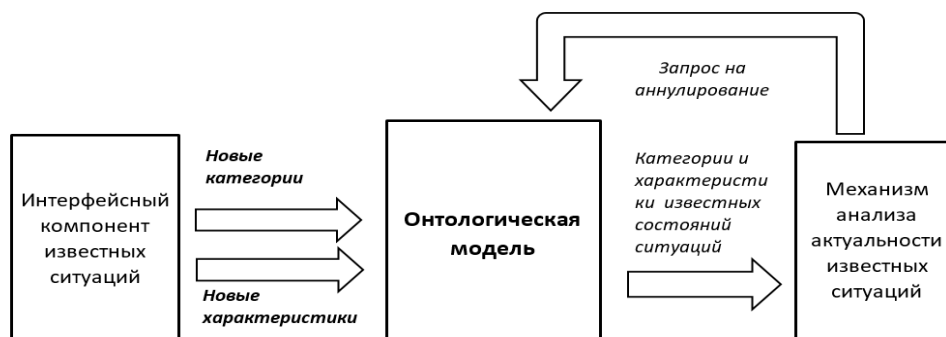


Рисунок 5.11 – Схема адаптации онтологической модели

Такая схема позволяет обновлять онтологию в зависимости от изменений в нормативах и практике, сохранять историю изменений в Df , автоматически генерировать новые разделы стандарта на основе правил Cr^S, Cr^{DS}, Cr^{PDS} , поддерживать актуальность модели через цифровой след и обратную связь. Она обеспечивает гибкость и устойчивость СППР при изменении стандартов.

На основе СОП предложен формализованный механизм преобразования нормативных документов (стандартов, технических условий, регламентов) в онтологическую модель ситуации и обратный процесс, как метод семантического сопоставления OWL-моделей с нормативными документами. Данный метод позволит обеспечить двунаправленную связь между нормативной базой предприятия и СППР, минимизируя разрывы при изменении требований или выявлении новых ситуаций. Возьмём в качестве эталона нормативного документа стандарт и рассмотрим данный метод, отталкиваясь от его структуры.

1. Преобразование стандарта в модель ситуации

Пусть стандарт Z^{Std} представлен множеством нормативных требований R_n . Каждое требование $r \in R_n$ методом контент-анализа [61] или лингвистического моделирования (на основе онтологий) [35] преобразуется в характеристики Ch^r , меры L^r , решения D^r и правила Cr^r . Преобразование $Z^{Std} \rightarrow Z^{OWL}$ формирует онтологию как совокупность множеств характеристик, мер и правил:

$$f_{trans}(R_n) = \{Ch, L, D, Cr\}, \quad (5.2)$$

где $Ch = \{Ch^r | r \in R\}$ – множество характеристик; $L = \{L^r | r \in R\}$ – множество мер, $D = \{D^r | r \in R\}$ – множество решений, $Cr = \{Cr^r | r \in R\}$ – множество правил. Неструктурированная часть требования отбрасывается.

Данное множество троек и есть онтологическая модель Z^{OWL} .

Например, если в стандарте указано «Температура должна быть $\leq 80^\circ\text{C}$ », то формируется характеристика $Ch^r = \text{«температура»}$, мера $L^r = [0, 80]$ и правило $Cr^r = \text{«ЕСЛИ } ch \text{ В } l, \text{ ТО норма»}$.

2. Преобразование модели ситуации в стандарт

Обратное преобразование $Z^{OWL} \rightarrow Z^{Std}$ выполняется через функцию $f_{reverse}$ и для каждой тройки (Ch^S, L^S, Cr^S) генерирует текстовое требование и его обоснование:

$$f_{reverse}(Ch^S, L^S, Cr^S) \rightarrow (r, jst), \quad (5.3)$$

где r – новое требование, jst – обоснование требования.

Например, если система выявила новую кросс-уровневую ситуацию «Высокая температура $\rightarrow$ несоответствие прочности», то это преобразуется в новое требование «Температура должна быть $\leq 75^\circ\text{C}$ » с обоснованием «Уменьшение риска деформации».

Формула (5.2) описывает, как требования из стандарта R_n трансформируются в элементы онтологии Ch^S, L^S, Cr^S . Формула (5.3) реализует обратный процесс: из модели $s_i = \langle Ch^S, L^S, Cr^S \rangle$ генерируются новые требования r с обоснованием jst .

ТММ обеспечивает двунаправленную трансформацию между нормативными документами (Z^{Std}) и онтологическими моделями (Z^{OWL}), что обеспечивает: автоматическую генерацию новых требований при изменении условий производства; обновление онтологии при появлении новых данных; уменьшение разрывов между статическими нормативами и динамичными БП.

Отметим, что механизм преобразования можно интегрировать с цифровым следом за счёт использования исторических данных для корректировки содержания отчётов $Df_{nt}: (s_i, d_j, p_k) \rightarrow G_{rep}$, где Df_{nt} – множество данных цифрового следа, G_{rep} – множество для формирования отчётов.

5.3.3 Метод обнаружения конфликтов и актуализации знаний

Поддержание актуальности модели при изменениях в нормативном базисе и БП требует обнаружения несоответствий между моделью и нормативами, актуализации знаний через цифровой след и интеграции модели в ДО предприятия (см. рисунок 5.12).

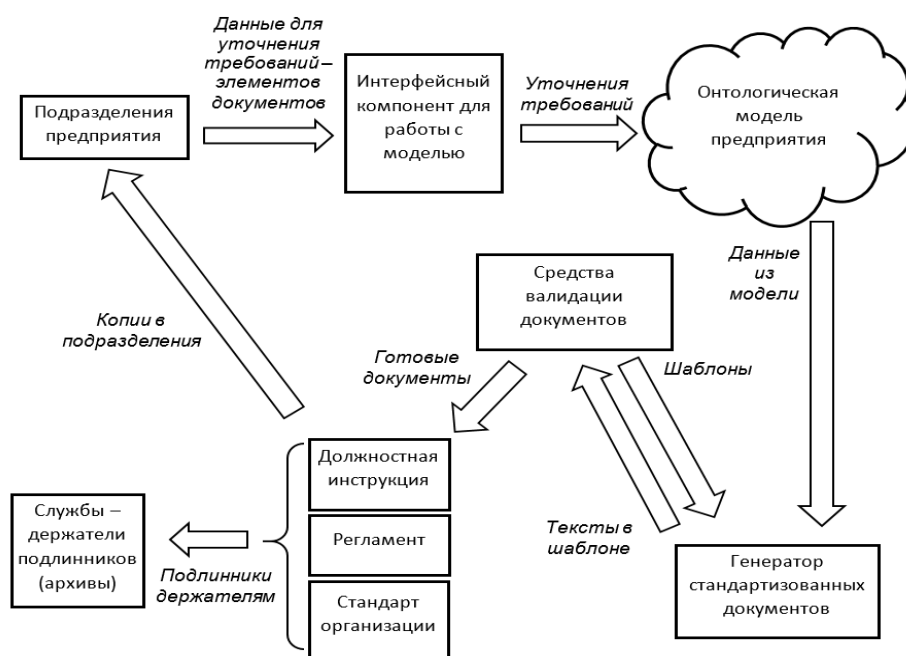


Рисунок 5.12 – Схема поддержания актуальности модели объекта управления

Алгоритм метода обнаружения конфликтов и актуализации знаний:

1. Обнаружение конфликтов

Несоответствия выявляются при сравнении: характеристик, выделенных из нормативных документов; мер и правил, зафиксированных в модели; данных цифрового следа и изменений в нормативном базисе.

Конфликты классифицируются как:

- синтаксические ($V^{stx}: \text{Document} \rightarrow \{\text{соответствует, не соответствует}\}$);
- семантические ($V^{smc}: Ch^S \cap Cr^S \rightarrow \{\text{согласовано, конфликт}\}$);
- прагматические ($V^{pmc}: P^{DS} \rightarrow \{\text{применимо, не применимо}\}$).

Пример: если в новом стандарте Z^{Std} появилось требование $r = \langle \text{Если температура} > 75^\circ\text{C, то необходимо провести корректировку параметров} \rangle$, а в онтологии O^S правило Cr^S всё ещё содержит 70°C , то генерируется $Cr^{\text{conflict}} = (r \cap Cr^S) = \emptyset \rightarrow S^{cft} = \langle \text{Конфликт требований} \rangle$.

В дополнение к трём уровням конфликтов ($V^{stx}, V^{smc}, V^{pmc}$) возможно использование нечёткой оценки степени конфликта (см. §5.2.3).

2. Актуализация знаний

При обнаружении конфликтов запускается механизм обновления онтологии $O^{new} = O^{old} \cup \{T^{new}, Lk^{new}, Cr^{new}\}$, где T^{new} – новые термины, Lk^{new} – новые связи, Cr^{new} – новые правила согласования.

При этом цифровой след фиксирует историю решений, служит основой для обучения модели, запускает обновление правил при снижении $K^{agr} < 0.7$.

3. Интеграция модели в нормативный базис

Алгоритм интеграции модели в нормативы показан на рис. 5.13.

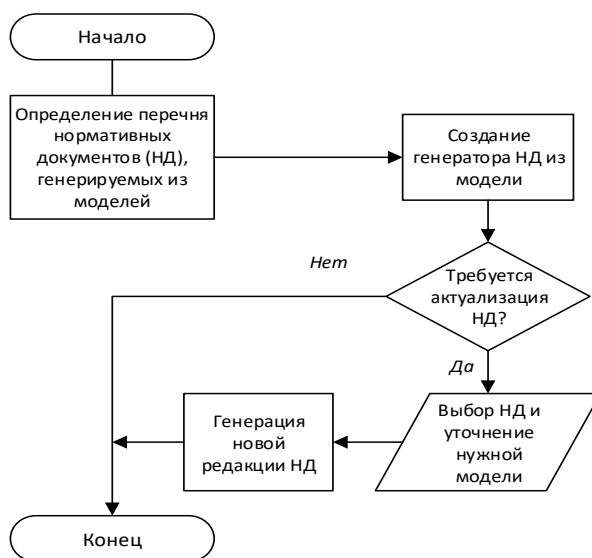


Рисунок 5.13 – Общая схема алгоритма интеграции модели в нормативный базис

Для обеспечения двунаправленного соответствия используется формализация требований через ТММ на основе (5.1): $Nm = \langle Cd, At, Rl, Ll, Qth \rangle$, где: Nm – множество объектов-требований, $Cd = \langle Ch^{Nm}, L^{Nm}, Cr^{Nm}, E^{Nm} \rangle$ – множество условий и характеристик, $At = \langle At^S, At^D, At^P, At^{Ex} \rangle$ – множество действий на уровне ситуации (At^S), решения (At^D) или сценария (At^P), либо связанной с принятием решения функции (At^{Ex}), Rl – множество ролей, Ll – множество указаний на трудоёмкость работы, $Qth = \langle Qt, Rf, St, Ds \rangle$, в котором Qt – множество цитат из нормативных документов, Rf – множество ссылок, St – множество оценок силы требований и Ds – множество комментариев.

4. Синхронизация модели и нормативов

Для предотвращения устаревания модели изменения в нормативах вносятся на основе обновления онтологии, новые версии документов генерируются автоматически из модели, работа экспертов и ЛПР фиксируется в Df для обучения и актуализации.

5. Ограничения метода

Отметим, что интервал между обновлениями нормативов может достигать 3 лет, СТО относится к категории общих документов, а модели концептуального уровня не генерируются напрямую. При этом детальные модели на уровне БП всегда доступны, поэтому их можно использовать для актуализации нормативов и обучения СППР. Метод позволяет интегрировать рабочие инструкции, регламенты и другие документы с требованиями.

5.3.4 Метод обеспечения актуальности моделей в ситуациях разных типов

Для обеспечения актуальности онтологических моделей при обеспечении качества в типовых, нетиповых и кросс-уровневых ситуациях предложен метод, основанный на принципах СОП, обеспечивающий динамическое обновление онтологий, обучение на цифровом следе, интеграцию с системами управления изменениями, автоматическую генерацию отчётов и документации.

Для обеспечения актуальности моделей используются следующие методы:

1. Динамическое обновление онтологий, выражающееся в том, что при обнаружении ситуации требующих обновлений ($K^{agr} < 0.7$) система автоматически анализирует характеристики Ch^S , уточняет меры L^S и обновляет правила Cr^S для формирования новых компонентов модели: $O^{new} = O^{old} \cup \{Ch^{new}, L^{new}, Cr^{new}\}$, где $Ch^{new}, L^{new}, Cr^{new}$ – соответственно, новые характеристики, меры и правила, а O^{new}, O^{old} – новое и старое состояние онтологической модели.

2. Обучение на цифровых следах, при котором результаты принятия решений анализируются для корректировки алгоритмов СППР (например, если рекомендация «пересмотреть инвестиции» привела к положительному эффекту, это правило усиливается в базе знаний). Результаты используются для обновления правил: $Cr^{upd} = Df \rightarrow \{cr^S\}$, где Cr^{upd} – дополненное множество данных, Df – множество данных цифрового следа, cr^S – правило для уровня ситуации; корректировки весов

и функций принадлежности, а также повышения точности вывода и объяснимости (XAI) в нетиповых ситуациях.

3. Интеграция с системами управления изменениями, для того чтобы изменения в нормативной базе (*например*, обновление стандартов) автоматически отражались в моделях: $O^{sync} = O^{old} \cup \{Cd^{new}, At^{new}, Rl^{new}, Qth^{new}\}$, где Cd^{new} , At^{new} , Rl^{new} , Qth^{new} – новые множества условий, действий, ролей и формальных категорий соответственно.

4. Генерация отчётов и документации

Для практической реализации данного метода используется генератор документов, который идентифицирует необходимые артефакты в модели и преобразует их в текстовые и графические представления. Формализация процесса генерации отчётов основана на преобразовании ПСС в графическую структуру: $G^{rep} = \{(s_i, s_j) \mid s_i, s_j \in S, \exists cr \in Cr: s_i \rightarrow s_j\}$, где S – множество ситуаций, а связь «причина – следствие» между s_i и s_j фиксируется в онтологии через правило cr из множества Cr .

Для оценки эффективности метода предлагаются ключевые метрики, рассчитываемые на интервале времени Δt (например, месяц) (см. таблицу 5.6)

Таблица 5.6 Метрики метода обеспечения актуальности моделей

№	Метрика	Расчёт	Единица измерения
1	Скорость актуализации онтологий (V^{akt})	$V^{akt} = N_{new}/T_a$, где N_{new} – число новых связей или правил, T_a – время внедрения (часы)	связей/час
2	Точность рекомендаций (Ac)	$Ac = 2 \cdot (Prec \cdot Rec) / (Prec + Rec)$, где $Prec$ – точность и Rec – полнота вычисляются по тестовой выборке	Безразмерная (0 - 1)
3	Снижение конфликтов (ΔK)	$\Delta K = (K_{t-1} - K_t)/K_{t-1} \cdot 100$, где K_{t-1} – конфликтов до, K_t – после	0 - 100 %
4	Ускорение создания отчётов (V^{RC})	$V^{RC} = (T_{old} - T_{new})/T_{old} \cdot 100$, где T_{old} – время генерации до, T_{new} – после	0 - 100 %

Например, в цехе обнаружена кросс-уровневая проблема – дефекты деталей из-за несоответствия стандартов. Метрики такие: новых связей в онтологии $N_{new} = 5$ (вносились вручную), время $T_a = 18$ часов, откуда $V^{akt} = 5/24 = 0.28$ связей/час; $Prec = 0.6$, $Rec = 0.7$, откуда $Ac = 0.32$; конфликтов $K_{t-1} = 12$; отчёт генерировался за $T_{old} = 60$ минут.

В результате внедрения: связей в онтологии $N_{new} = 12$ (автоматически), а время $T_a = 3$ часа, получаем $V^{akt} = 12/3 = 4$ связей/час; точность $Prec = 0.8$, полнота $Rec = 0.9$, значит $Ac = 0.42$; конфликтов $K_t = 3$; отчёт генерируется за $T_{new} = 10$ минут.

Расчёт по метрикам дал результаты:

- $V^{akt}_{до} = 0.28$, $V^{akt}_{после} = 4$, рост в 14.4 раза;
- $Ac_{до} = 0.32$, $Ac_{после} = 0.42$, рост около 30%;
- $\Delta K = (12 - 3) / 12 = 0.75$, снижение на 75%;
- $V^{RC} = (60 - 10) / 60 = 0.83$, ускорение около 83%.

Метод показал, что позволяет снизить число конфликтов на 75%, увеличить скорости актуализации в 14 раз, повысить точность рекомендаций на 30% и ускорить генерацию отчётов на 83%.

5.4 Метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО

5.4.1 Механизмы обновления онтологий при изменении нормативного базиса

Для обеспечения двунаправленной интеграции онтологий и нормативов в таблице 5.7 показана связь с цифровыми системами предприятия и ДО.

Таблица 5.7 Источники обновления онтологий и их роль в интеграции

Источник данных	Роль в обновлении онтологий	Интеграция в ДО	Пример
IoT-датчики [101]	Автоматическое обнаружение несоответствий нормативам	Обновление правил и характеристик в онтологии	Температура $> 80^{\circ}\text{C}$ – обновление допусков в ТУ
Машинное обучение [180]	Выявление скрытых паттернов и прогнозирование рисков	Генерация новых правил согласования	Связь влажности и брака – добавление ограничения в модель
Нейросети [212]	Автоматическая генерация отчётов и инструкций	Формализация правил в нормативном виде	Генерация инструкции на основе онтологии и СНиП
Цифровые двойники [60, 192, 248]	Проверка модели в виртуальной среде	Обнаружение устаревших норм и их обновление	Энергоэффективность – изменение требований под ISO 50001 [153]
ERP / MES [109]	Централизация и унификация данных	Синхронизация онтологий и нормативных документов	Обновление стандартов в MES через онтологию

В рамках разработанной методологии ИППР использование таких технологий становится неотъемлемой частью процесса интеграции, обеспечивая гибкость и масштабируемость системы.

5.4.2 Метод двунаправленной интеграции онтологий и нормативных документов

Для обеспечения двунаправленной интеграции онтологий и нормативного базиса предприятия разработан метод, основанный на модели ситуации (формула 2.1) и реализующий семантическое сопоставление правил модели и норматива, обновление онтологии и реализацию обратной связи через цифровой след.

Этапы метода:

1. Формализация онтологических моделей

Выполняется идентификация модели СОП $S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle$ (метод ДНП в §5.1.3), онтология предприятия формализуется в OWL-формат (§5.2.1), вводятся лингвистические переменные для объяснимости вывода.

2. Интеграция нормативных документов через NLP и OWL

На основе метода ДНП $OWL \leftrightarrow СОП$ -модель (§5.1.1) нормативные документы ($Document = \{ T, Lk \}$) анализируются с помощью метода Natural Language Processing [111, 255], извлекаются ключевые термины и их связи, строится семантическая модель, в которой термины становятся классами онтологии, связи – отношениями между классами, а правила реализуются как $Cr^S \rightarrow Cr^{DS} \rightarrow Cr^{PDS}$. При несоответствии $T \notin O^S$, ситуация классифицируется как конфликт (§5.1.2) и формируются новые классы: $T^{new} = T \notin O^S$ и связи: $Lk^{new} = Lk_i \notin O^S$.

3. Выбор метода принятия решений

Для выбора лучшего метода вывода в зависимости от типа ситуации выполняется их классификация по типам (§5.3.4):

- типовая: $Cr^S \rightarrow D^S$ (жёсткие правила, статистика);
- нетиповая: $Cr^S \rightarrow D^S$ (нечёткая логика, неопределённость);
- кросс-уровневая: $Cr^{DS} \rightarrow P^{DS}$ (многокритериальный анализ).

4. Объяснимость решений

Выполняется визуализация вывода через семантические графы OWL и диаграммы Исикавы [151], генерация текстовых отчётов на естественном языке, адаптация отчётов под уровень пользователя (инженеры, руководители и т.д.) (§5.2.3).

5. Автоматизация и обратная связь

Для повышения точности и актуальность модели при изменениях реализуется интеграция онтологий с ERP, MES через OWL/JSON-интерфейсы (§5.4.1), обновление онтологии на основе цифрового следа (§5.3.4), отслеживание дрейфа данных через метрики ΔE (уровень ошибок интерпретации) и K^{agr} (согласованность между уровнями управления).

Алгоритм в виде графической схемы (см. рисунок 5.14).

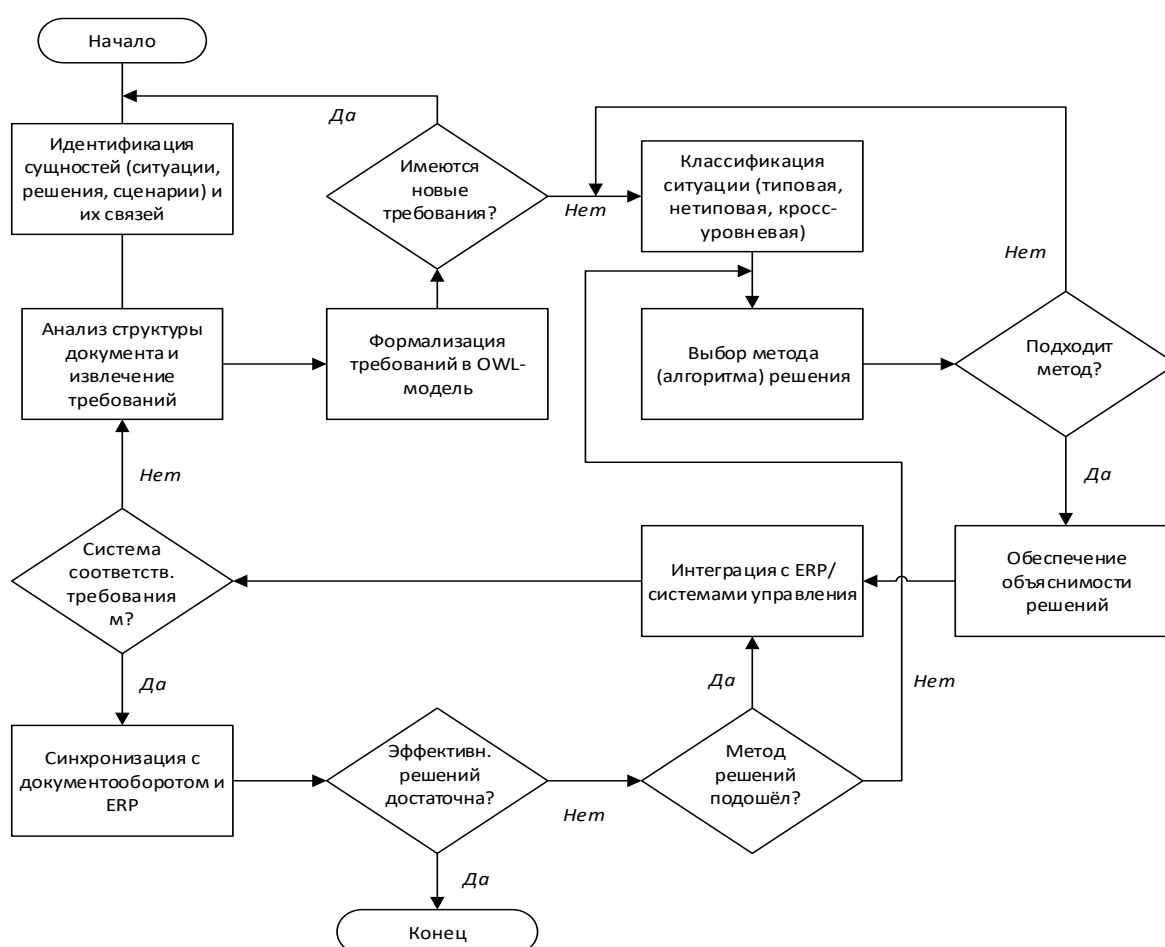


Рисунок 5.14 – Схема алгоритма интеграции онтологической модели в нормативный базис

6. Внедрение в БП

Для обеспечения согласованности действий между уровнями управления и интеграции СППР в ДО и БП реализация трансформации онтологий в правила и сценарии (§5.2.1), автоматической генерации протоколов и регламентов на основе онтологии и нормативов (§5.2.3), синхронизация онтологий и нормативов предприятия через $Cr^S \rightarrow Cr^{norm}$ (§5.3.4), координация решений на уровнях продукта, процесса и системы.

Пример практического применения разработанного алгоритма. Ситуация связана с выявлением критического дефекта в продукции.

1. Формализация онтологии. В онтологии фиксируется связь: «Дефект → несоответствие параметра прочности». На её основе генерируется правило: если прочность материала падает ниже 20 единиц, активируется решение «анализ причин».

2. Интеграция нормативных документов. Из технических условий (ТУ) извлекается требование: прочность должна быть не менее 20 единиц. Требование сопоставляется с онтологией: решение «анализ причин» привязывается к разделу 5 ТУ.

3. Выбор метода. Ситуация классифицируется как кросс-уровневая, поскольку дефект влияет на технологический процесс и стандарты предприятия. Для выбора решения применяется онтологический сценарий с многокритериальным анализом.

4. Объяснимость. Система генерирует сообщение: «Дефект обнаружен из-за нарушения требования 5.2 ТУ. Рекомендуемое решение — анализ причин, сценарий — проверка оборудования. Ожидаемый эффект — снижение брака на 10%».

5. Автоматизация. Сценарий запускается через интеграцию с системой управления предприятием. После анализа онтология обновляется: добавляется новое правило, а при падении прочности ниже 18 единиц – процесс останавливается.

6. Внедрение в ДО. Автоматически формируется протокол контроля с указанием причинно-следственных связей и ссылками на нормативные требования.

Важную роль играет метрика времени документирования решения T^{doc} , показывающая скорость преобразования онтологического вывода в формализованный документ, которая здесь выступает как показатель эффективности интеграции с ДО.

Разработан метод двунаправленной интеграции онтологий и нормативных документов, реализующий полный цикл: модель – документ и документ – модель, основанный на модели СОП и включающий семантическое сопоставление и выявление конфликтов, обновление онтологии через цифровой след, объяснимость и воспроизводимость, интеграцию с ERP и ДО.

В отличие от существующих подходов, метод обеспечивает согласованность на всех уровнях управления, реагирует на изменения в нормативном базисе, включает механизм самообучения через цифровой след.

5.4.3 Пример декомпозиции стандарта и формализации правил принятия решений

Для демонстрации работы метода двунаправленной интеграции онтологий и нормативов был проведён анализ стандарта ГОСТ Р 52745-2021 [130] (техническая приемка в промышленности). Он был подвергнут семантической декомпозиции с использованием NLP-инструментов и лингвистических алгоритмов.

1. Анализ структуры документа ГОСТ Р 52745-2021

Данный стандарт содержит разделы, указанные в таблице 5.8.

Таблица 5.8 Разделы, извлечённые из ГОСТ Р 52745-2021

Название	Описание
Общие сведения (предисловие)	Область применения стандарта, нормативные ссылки на другие стандарты, определяет термины и определения
Основные положения	Цели и задачи технической приемки (ТП), взаимодействие между ТП и предприятиями-поставщиками/потребителями
Верификация исходных материалов и ингредиентов	Проверка материалов, требования к документации и действия при несоответствиях
Контроль технологических процессов	Порядок проверки технологических процессов, оценку оборудования, средств измерений и квалификации персонала, корректирующие мероприятия при выявлении нарушений
Приемка продукции	Процедура приемки готовой продукции, действия при выявлении дефектов, правила приостановки приемки в случае системных проблем
Контроль хранения продукции	Условия и сроки хранения, периодический контроль качества
Претензионно-рекламационная работа	Порядок работы с претензиями и рекламациями, анализ причин несоответствий
Контроль освоения производства новой продукции	Участие ТП в освоении новых производств: контроль документации и испытаний опытных партий
Контроль сертифицированного производства	Участие ТП в сертификации и надзор за сертифицированным производством
Учет отгруженной продукции	Ведение учёта для предотвращения поставок некачественной продукции, требования к маркировке

2. Извлечение требований

На основе структуры ГОСТ Р 52745-2021, можно выделить ключевые элементы для интеграции в правила принятия решений (см. таблицу 5.9).

Таблица 5.9 Разделы ГОСТ Р 52745-2021

Название раздела	Значимые требования	Формализация в виде правил
1. Требования к верификации исходных материалов	Все материалы имеют сопроводительную документацию; материалы без документации не допускаются к верификации; при	Если материал без сопроводительной документации – отклонить материал; если параметр материала не соответствует НД – запустить процедуру корректировки

Название раздела	Значимые требования	Формализация в виде правил
	выявлении несоответствий необходимо уведомить предприятие-поставщик	
2. Требования к контролю технологических процессов	Проверка состояния оборудования и средств измерений; контроль параметров технологических процессов; актуализация документации при изменениях	Если оборудование не аттестовано – приостановить производство; если параметр процесса вне допуска – запустить анализ причин
3. Требования к приемке продукции	Контроль характеристик продукции; проверка сопроводительной документации; при выявлении дефектов – возврат продукции	Если характеристики продукции не соответствуют НД – отклонить продукцию; если документация неполна – приостановить приемку
4. Требования к хранению продукции	Соблюдение условий хранения; периодический контроль качества; уничтожение фальсифицированной продукции	Если условия хранения нарушены – переместить продукцию; если продукция фальсифицирована – утилизировать продукцию
5. Претензионно-рекламационная работа	Рассмотрение претензий и рекламаций; разработка корректирующих мероприятий; уведомление всех сторон о результатах	Если получена претензия – запустить процедуру анализа; если причина выявлена – разработать план корректировки

Пример декомпозиции стандарта ГОСТ Р 52745-2021 показал, что требования нормативов могут быть интегрированы в онтологию и использованы в СППР.

5.5 Выводы по главе

В соответствии с подзадачами из таблицы 5.1, получены:

- метод ДНП $OWL \leftrightarrow СОП$ -модель (табл. 5.2, рис. 5.2) транслирует онтологии в множества S , D^S , P^{DS} и обратно, формализует правила (Cr) и синхронизирует их с нормативами через цифровой след (§5.1);
- Трёхуровневая проверка (синтаксис – семантика – прогматика) проверяет нормативные документы и онтологии на синтаксическом, семантическом и прагматическом уровнях, выявляет конфликты и даёт рекомендации по их устранению (§5.2);
- метод поддержания актуальности через цифровой след и самообучение (см. формулу 5.1) обнаруживает конфликты при изменении нормативов, обновляет онтологии и генерирует новые требования (§5.3);
- метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО (рис. 5.14) реализует полный цикл «модель в документ» и «документ в модель»: сопоставление правил ($Cr^S \leftrightarrow Cr^{norm}$), генерация нормативных документов из онтологий и автоматическое документирование решений (§5.4).

В отличие от однонаправленных подходов и систем с ручной актуализацией, метод ДНП обеспечивает автоматическую генерацию правил из стандартов и

обратное обновление онтологий через цифровой след. Он даёт сквозную согласованность уровней управления и устойчивость к изменениям.

Работоспособность метода подтверждена: декомпозиция ГОСТ Р 52745-2021 в правила принятия решений; генерация документов из онтологий (Python, Protege); сравнение с BPMN и IDEF0 показало преимущество в автоматизации обновления документации.

Глава 6. Апробация и достоверность разработанной методологии интеллектуальной поддержки принятия решений

Глава посвящена доказательству достоверности результатов исследования через апробацию прототипа СППР, экспертный анализ, деловые игры и проектные работы студентов. Демонстрируется эффективность ситуационно-онтологического подхода в реальных и учебных условиях.

6.1 Методы подтверждения достоверности и апробации

Достоверность научных результатов, полученных в ходе исследования, является ключевым требованием при оценке качества диссертационной работы. В соответствии с положениями ГОСТ Р 7.0.11-2011, подтверждение достоверности должно основываться на объективных и воспроизводимых методах проверки.

Для проверки методологии ИППР на основе СОП использованы четыре метода.

1 Публикации

Статьи в рецензируемых журналах указывают на достоверность и эффективность результатов. Они показывают признание разработок экспертным сообществом. Публикации по методологии СОП и связанным темам вышли в журналах ВАК К1 и К2 [94, 95, 96, 97, 98, 161, 162, 172].

2 Экспертный анализ

На ранних этапах провели серию экспертных оценок для:

- проверки корректности ТММ ситуаций;
- оценки качества онтологической модели нормативных документов;
- проверка логики выбора методов принятия решений.

Экспертиза проводилась с участием 14 специалистов с промышленных предприятий и научных организаций, имеющих опыт в области менеджмента качества, включая управление и обеспечение качества, цифровой трансформации и системного анализа.

Результаты данной экспертизы приведены в таблице П.Г1 приложения Г.

3 Имитационное моделирование и прототипирование (§6.2)

Центральным инструментом апробации выступает прототип интеллектуальной СППР, реализованный на основе онтологического моделирования и архитектуры СОП. Прототип служит не только как демонстрационный инструмент, но и как средство количественной и качественной оценки эффективности методологии.

Прототип позволяет моделировать типовые, нетиповые и кросс-уровневые ситуации, выбирать наилучшие алгоритмы принятия решений, генерировать сценарии действий, обеспечивать объяснимость вывода, фиксировать цифровой след (*Df*) для обратной связи и обучения.

Выбор прототипа СППР в качестве основного инструмента апробации обоснован его способностью воспроизводить реальные условия функционирования предприятия, обеспечивать объективную оценку метрик, поддерживать двунаправленную связь между моделью и ДО, демонстрировать научную новизну и практическую значимость результатов.

4 Деловые игры в учебном процессе (§6.4.1)

Для проверки воспроизводимости и практической применимости методологии были разработаны деловые игры, имитирующие реальные задачи управления качеством на промышленном предприятии.

В рамках игр студенты выполняют следующие несколько заданий, связанных с использованием прототипа интеллектуальной СППР. Участники делились на три группы, использующие: только СТО, СТО и ERP-систему (на примере 1С: Предприятие), СТО и прототип СППР на основе СОП.

В зависимости от задания оценивались разные метрики: время решения, точность идентификации, ошибки интерпретации, объяснимость, согласованность и другие.

Результаты деловых игр приведены в таблице П.Г1 - П.Г7 приложения Г.

5 Проектные работы магистрантов (§6.4.2)

Методология была апробирована в рамках выпускных квалификационных работ (ВКР) магистрантов по направлению «Реинжиниринг бизнес-процессов».

В проектах реализованы автоматическая генерация рабочих инструкций из онтологий, интеграция онтологий с ERP-подобными системами, моделирование кросс-уровневых ситуаций с применением VIKOR и TOPSIS, самообучение модели через цифровой след *Df*.

Работы продемонстрировали возможность практической реализации всех ключевых компонентов СОП.

6 Внедрение на предприятиях и в проектных фирмах (§6.3)

Акты внедрения от промышленных предприятий и проектных организаций подтверждают применимость методологии в реальных условиях. Они фиксируют интеграцию в БП и ДО, включая внедрение ERP-систем.

В отличие от лабораторных испытаний, производственная среда даёт оценку эффективности в условиях неопределённости и сложных управленческих взаимодействий. Внедрение дополняет экспертный анализ и моделирование реальным применением. Комбинация методов (экспертный анализ, имитационное моделирование, деловые игры, проектные работы) подтвердила достоверность теории, эффективность методов и применимость СОП в изменяющейся среде.

Все методы апробации проверяют эффективность методологии ИППР на основе СОП для задач из §1.4.

6.2 Прототип СППР на основе СОП

6.2.1 Общая архитектура прототипа

Прототип СППР реализован как модульная программная система, основанная на СОП и предназначенная для интеллектуальной поддержки при управлении в сфере обеспечения качества на промышленных предприятиях. Архитектура прототипа обеспечивает формализацию знаний, объяснимость вывода, гибкость при работе с типовыми, нетиповыми и кросс-уровневыми ситуациями, двунаправленную интеграцию с нормативным базисом и ERP-системами, актуализацию модели через цифровой след.

Архитектура прототипа включает следующие ключевые модули:

1 Модуль онтологического моделирования (OWL)

Данный модуль предназначен для формализации знаний о предметной области в виде онтологии, представленной на языке OWL (Web Ontology Language).

Онтология включает:

- классы: Situation, Decision, Scenario, Characteristic, Measure,
- объектные свойства: hasCharacteristic, hasMeasure, requiresAction, implementsAction,
- свойства данных: value, priority,
- правила: в форме импликативных логических выражений (например, SubClassOf(...)).

Модуль позволяет автоматически генерировать онтологию из нормативных документов (ГОСТ, СТО), осуществлять ДНП между OWL ↔ СОП-модель, обеспечивать согласованность и объяснимость вывода.

Пример загруженной в прототип интеллектуальной СППР OWL-модели показан на рис. 6.1.

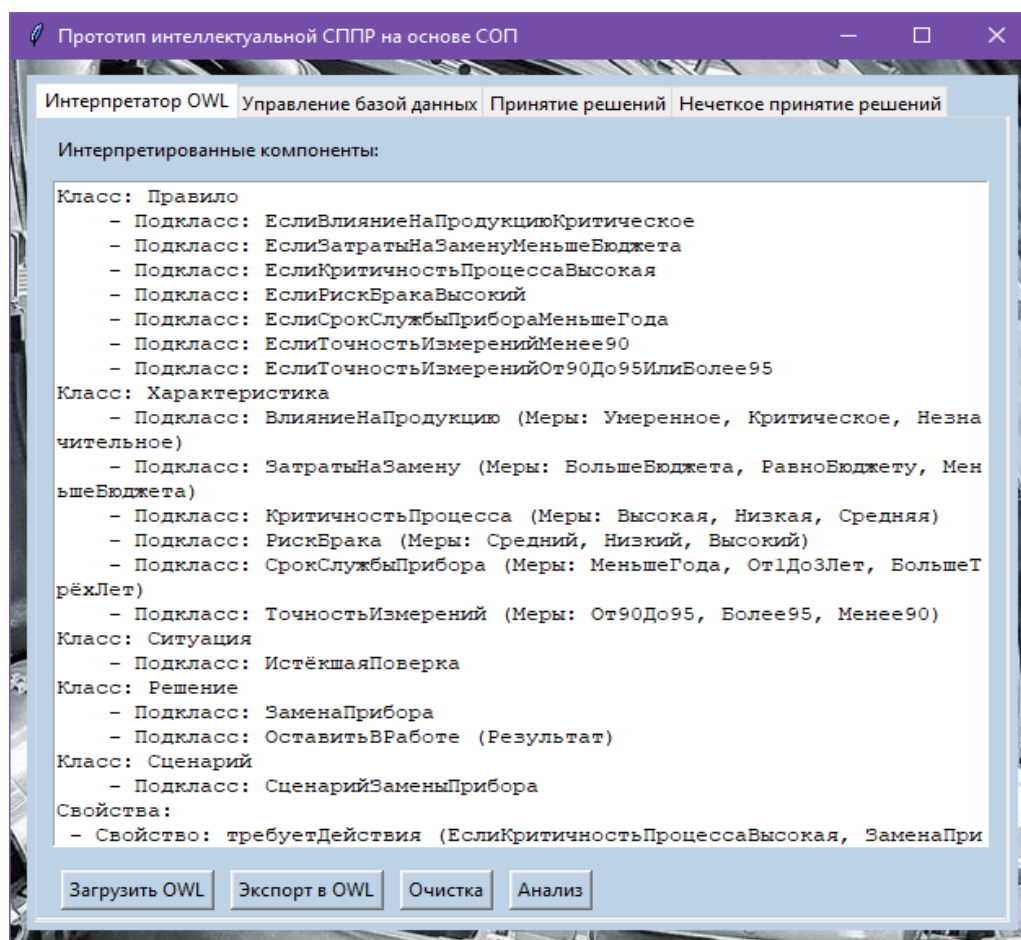


Рисунок 6.1 – Загруженная в прототип интеллектуальной СППР OWL-модель

2 Модуль анализа ситуации

Модуль реализует ТММ ситуации $S = \langle Ch^S, L^S, Cr^S, E^S \rangle$, где Ch^S – характеристики, L^S – допустимые значения, Cr^S – правила согласования, E^S – оценка соответствия. На основе этих компонентов выполняется классификация ситуации по типам (типовая, нетиповая, кросс-уровневая) и уровням управления, выполняя классификацию входных данных по характеристикам, выявление отклонений от норм, определение типа ситуации (типовая, нетиповая, кросс-уровневая).

3 Модуль выбора метода принятия решений

На основе анализа ситуации выбирается оптимальный алгоритм решения по типам ситуации. Выбор метода осуществляется на основе анализа типа ситуации, уровня управления и степени неопределённости. Для типовых ситуаций применяются жёсткие правила и статистика, для нетиповых – нечёткая логика, для кросс-уровневых – многокритериальный анализ (см. рисунок 6.2).

Прототип интеллектуальной СППР. Настройка решателя

Характеристики системы

Тяжесть последствий:	14	0 (нет последствий) - 100 (катастрофические)	Трапецевидная
Влияние на продукцию:	0.0	0 (нет влияния) - 100 (полная непригодность)	Трапецевидная
Срочность решения:	11	0 (нет срочности) - 100 (критическая срочность)	Трапецевидная
Стоимость исправления:	21	0 (нет затрат) - 100 (очень дорого)	Трапецевидная
Вероятность повторения:	5	0% - 100%	Трапецевидная
Сложность диагностики:	7	1 (просто) - 10 (очень сложно)	Трапецевидная

Добавить еще 3 характеристики

Метод нечёткой логики

☐ Метод центра тяжести
☒ Метод среднего максимума
☐ Метод левого максимума
☐ Метод правого максимума

Рассчитать решение

Результат

Отчет по анализу:

Тяжесть последствий: 14.0 (норм: 0.14), ф-я: Трапецевидная
 Влияние на продукцию: 0.0 (норм: 0.00), ф-я: Трапецевидная
 Срочность решения: 11.0 (норм: 0.11), ф-я: Трапецевидная
 Стоимость исправления: 21.0 (норм: 0.21), ф-я: Трапецевидная
 Вероятность повторения: 5.0 (норм: 0.05), ф-я: Трапецевидная
 Сложность диагностики: 7.0 (норм: 0.67), ф-я: Трапецевидная

Метод: Метод среднего максимума
Итоговый показатель: 0.667

Рекомендуемое решение:
Испытания перезапустить сначала

Рисунок 6.2 – Пример использования нечёткой логики в прототипе интеллектуальной СППР

4 Модуль сценарного вывода

После выбора метода генерируется сценарий действий, включающий последовательность шагов (например, проверка оборудования, анализ параметров, уведомление ответственных лиц, корректирующие мероприятия). Сценарий действий формализуется как $P^{DS} = \langle Ch^{PDS}, L^{PDS}, Cr^{PDS}, E^{PDS} \rangle$, что обеспечивает воспроизводимость и объяснимость. Текст отчёта генерируется на основе шаблонов, адаптированных под уровень пользователя.

Модуль обеспечивает визуализацию сценария (графы OWL), адаптацию текста отчёта под уровень пользователя (техник, менеджер, руководитель), воспроизводимость и согласованность действий.

5 Интеграция с ERP-подобной системой (имитация)

Прототип интегрирован с ERP-подобной системой, имитирующей учёт продукции, управление оборудованием, ДО, контроль качества.

Интеграция осуществляется через API-интерфейсы, пакетирование данных в JSON/OWL, синхронизацию изменений в онтологии и ERP-базе.

6 Цифровой след для обратной связи и обучения

Модуль фиксирует историю принятых решений в виде цифрового следа $Df = f(S^P, D^S, P^{DS})$, включающего контекст ситуации, выбранный метод, результат действия и экспертную оценку. На его основе выполняется актуализация онтологии и обновление правил вывода при снижении K^{agr} ниже порогового значения.

На основе Df реализуется обратная связь (если решение было успешным, то правило сохраняется), обновление онтологии, т.е. добавление новых правил и обучение модели для снижения ошибок интерпретации и повышения согласованности решений со временем.

Процедура обновления правил в прототипе интеллектуальной СППР (рис. 6.3)

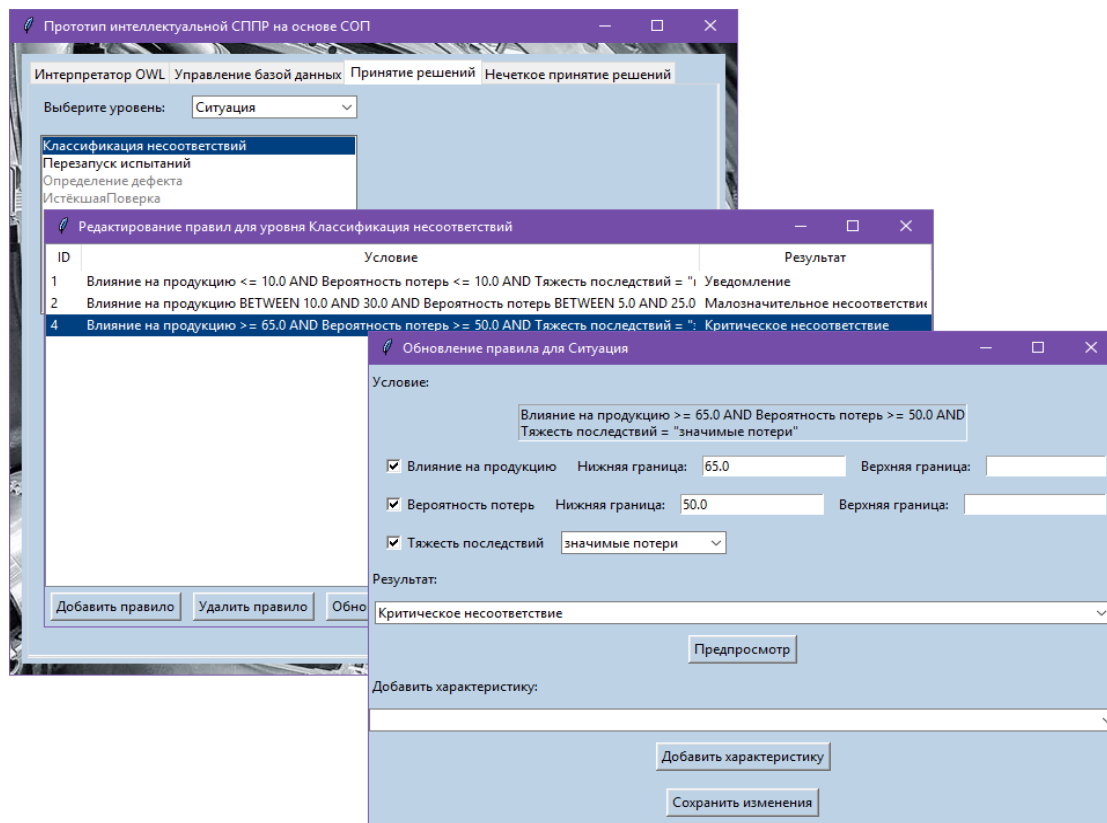


Рисунок 6.3 – Обновление правил в прототипе интеллектуальной СППР

На рисунке 3.1 (глава 3) представлена схема взаимодействия модулей: входные данные поступают в модуль анализа ситуации, затем передаются в модуль выбора метода, после генерируется сценарий, который интегрируется с ERP и фиксируется в цифровом следе для обратной связи.

Предложенная архитектура прототипа обеспечивает связь модулей как адаптивных инструментов, реализуя идеи СОП, воплощённые в методологии ИППР, что делает прототип эффективным инструментом для апробации научных результатов исследования и демонстрации их практической значимости.

6.2.2 Реализация в прототипе ключевых компонент СОП

В рамках разработки прототипа интеллектуальной СППР на основе СОП реализованы все ключевые компоненты методологии. Каждый этап адаптирован для практического использования в условиях промышленного предприятия и реализован в виде программных модулей, обеспечивающих формализацию знаний, анализ данных, выбор решения и обратную связь.

Рассмотрим реализацию метода применения СОП к ИППР в сфере обеспечения качества промышленных предприятий, предназначенного для практической реализации методологии ИППР:

1. Описание и анализ процесса как целого и как компонента более сложной системы

Этап описания процесса как целого лежит в основе последующей формализации (см. таблицу 6.1).

Таблица 6.1 Декомпозиция бизнес-процесса

Характеристика	Описание
Использование прототипа интеллектуальной СППР	Выполняется декомпозиция БП на подпроцессы, определяются входные/выходные параметры, контроллеры и механизмы взаимодействия, учитываются требования нормативов (ГОСТ, СТО) и влияние на смежные процессы
Используемые методы	- Разработка ТММ ситуации - Метод анализа ПСС - Использование BPMN или IDEF0 для построения модели процесса
Реализует модуль	Модуль предобработки онтологической информации
Реализация в прототипе	Диаграммы BPMN построены в редакторе Bizagi Modeler; экспортированы в Excel для последующей обработки
Уровень экспертов / ЛППР	Эксперты среднего звена (технологи, инженеры), ЛППР – руководители цехов
Роли	Процессный аналитик, эксперт по качеству

2. Сбор данных для анализа

На данном этапе формируется единая база данных для анализа (см. таблицу 6.2).

Таблица 6.2 Комплексный сбор данных для ситуационного анализа

Характеристика	Описание
Использование прототипа	Собираются данные о характеристиках ситуации: параметры оборудования, показатели качества, внешние факторы, неструктурированные описания проблем, данные классифицируются как структурированные (из ERP) и неструктурированные (отчёты, комментарии)
Научный результат	- Разработка интеллектуальной подсистемы обработки данных - Метод дискретизации ситуаций
Реализует модуль	Модуль анализа данных
Реализация в прототипе	Данные выгружены из ERP-подобной системы в Excel; текстовые описания проанализированы с помощью Python (библиотеки pandas, nltk и т.п.) для извлечения ключевых характеристик
Уровень экспертов / ЛППР	Операторы, технологи, системные администраторы
Роли	Инженер по данным, специалист по качеству

3. Построение онтологической модели

Онтология служит ядром интеллектуальной СППР (см. таблицу 6.3).

Таблица 6.3 Формирование OWL-онтологии из процессов

Характеристика	Описание
Использование прототипа	Формируется онтология в OWL, описывающая связи между ситуациями, решениями и сценариями, в неё включаются классы: Situation, Decision, Scenario, Characteristic, Measure и свойства: hasCharacteristic, requiresAction
Научный результат	- Метод ДНП OWL ↔ модель СОП - Разработка ТММ формализации правил
Реализует модуль	Модуль предобработки онтологической информации
Реализация в прототипе	Онтология создана в Protege; правила вывода реализованы через Object SomeValues From и SubClassOf
Уровень экспертов / ЛППР	Научные сотрудники, онтологи, ведущие технологи
Роли	Онтолог, эксперт по нормативам

4. Определение уровня управления

Определение уровня управления позволяет выбрать зону ответственности (см. таблицу 6.4).

Таблица 6.4 Классификация по уровням управления

Характеристика	Описание
Использование прототипа	Ситуация классифицируется по уровням: продукта (дефект детали), процесса (нарушение режима), системы (стратегическое изменение), что позволяет выбрать соответствующий уровень ответственности и алгоритм реакции
Научный результат	- Разработка иерархической модели управления - Метод кросс-уровневого согласования онтологий
Реализует модуль	Модуль принятия решений
Реализация в прототипе	Классификация реализована в Python: на вход идёт набор признаков, на выход – уровень (логическая функция), результат передаётся в модуль вывода
Уровень экспертов / ЛППР	Технологи, руководители отделов, топ-менеджмент
Роли	Системный аналитик, ЛППР

5. Определение типа ситуации

Типизация ситуации определяет стратегию реагирования (см. таблицу 6.5).

Таблица 6.5 Идентификация нетиповых и кросс-уровневых ситуаций

Характеристика	Описание
Использование прототипа	Ситуация классифицируется как типовая, нетиповая (>40% неопределённости) или кросс-уровневая (влияет на несколько уровней), что определяет выбор метода решения
Научный результат	- Адаптация метода PDCA для динамических условий - Метод анализа ПСС
Реализует модуль	Модуль анализа данных
Реализация в прототипе	Алгоритм классификации реализован в Python (scikit-learn, fuzzy), признаки для классификации: наличие аналогов, степень расхождения с нормативами, количество затронутых уровней
Уровень экспертов / ЛППР	Эксперты по качеству, аналитики, ЛППР
Роли	Эксперт по рискам, аналитик

6. Выбор метода (алгоритма) решения

Выбор метода зависит от типа и уровня ситуации (см. таблицу 6.6).

Таблица 6.6 Выбор алгоритма принятия решения

Характеристика	Описание
Использование прототипа	На основе уровня управления, типа ситуации и степени неопределённости выбирается метод решения: статистика, нечёткая логика, VIKOR, TOPSIS, выбор осуществляется в два этапа: сначала тип метода, затем конкретный алгоритм
Научный результат	- Разработка метода подбора алгоритма принятия решений - Разработка адаптированного метода нечёткого вывода
Реализует модуль	Модуль принятия решений
Реализация в прототипе	Реализован в Python: матрица приоритетов, Fuzzy Logic Controller (библиотека skfuzzy), результат – выбранный метод и весовые коэффициенты
Уровень экспертов / ЛПР	Эксперты, ЛПР, системные аналитики
Роли	Аналитик, консультант, ЛПР

7. Подготовка данных

Данные приводятся к виду, пригодному для анализа (см. таблицу 6.7).

Таблица 6.7 Подготовка данных для вывода

Характеристика	Описание
Использование прототипа	Данные нормализуются, кластеризуются, преобразуются в лингвистические переменные (например, «температура высокая»), для кросс-уровневых ситуаций синхронизируются между уровнями
Научный результат	- Разработка интеллектуальной подсистемы обработки данных - Метод кросс-уровневого согласования онтологий
Реализует модуль	Модуль анализа данных
Реализация в прототипе	Нормализация и кластеризация в Python (pandas, scikit-learn); лингвистические переменные в skfuzzy; синхронизация через общую онтологию в Protege
Уровень экспертов / ЛПР	Инженеры, аналитики, системные администраторы
Роли	Инженер по данным, эксперт по онтологиям

8. Настройка решателя СППР

Решатель проверяется на тестовых данных (см. таблицу 6.8).

Таблица 6.8 Настройка решателя СППР

Характеристика	Описание
Использование прототипа	Выбранный метод интегрируется в решатель СППР, проверяется на тестовых данных: например, распознавание дефекта на основе нечёткой базы правил
Научный результат	- Реализация модульной архитектуры СППР - Метод нечёткого вывода
Реализует модуль	Модуль принятия решений
Реализация в прототипе	Решатель реализован в Python (Flask API), интегрирован с онтологией через SPARQL-запросы
Уровень экспертов / ЛПР	Программисты, ЛПР, системные аналитики
Роли	Разработчик, тестировщик, ЛПР

9. Интеграция модели в БП и ДО

Модель интегрируется в ДО и ERP (см. таблицу 6.9).

Таблица 6.9 Интеграция модели в бизнес-процессы и ДО

Характеристика	Описание
Использование прототипа	Обеспечивается интеграция онтологии с ERP, CRM, автоматически генерируются регламенты, инструкции и отчёты при несоответствиях
Научный результат	- Метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО - Метод поддержания актуальности модели
Реализует модуль	Модуль визуализации и интерпретации
Реализация в прототипе	Генерация документов в Python совместно с Jinja2, интеграция с ERP в имитации через CSV/API, онтология в Protege.
Уровень экспертов / ЛПП	Руководители, юристы, специалисты по ДО

10. Применение СППР для решения поставленных задач

Принятые решения фиксируются для обучения модели (см. таблицу 6.10)

Таблица 6.10 Обратная связь через цифровой след

Характеристика	Описание
Использование прототипа	Реализуется управление предприятием на уровне продукта, процесса или системы на основе иерархической модели, принятые решения фиксируются в цифровом следе
Научный результат	Метод самообучения модели через обратную связь, адаптация PDCA для динамических условий
Реализует модуль	Модуль обратной связи
Реализация в прототипе	Цифровой след реализован в SQLite, данные используются для переобучения модели
Уровень экспертов / ЛПП	Все уровни управления: от оператора до директора
Роли	Оператор, технолог, ЛПП, система

Реализация всех этапов метода применения СОП в прототипе интеллектуальной СППР подтвердила возможность практической реализации методологии ИППР при обеспечении качества. Каждый этап реализован с использованием научных результатов диссертации, имеет чёткую привязку к модулям системы и соответствует ролям участников. Прототип демонстрирует гибкость, объяснимость и устойчивость к изменениям, что подтверждает его готовность к апробации в промышленных условиях.

Подробная реализация этапов метода для принятия решений в 4-х ситуациях разных типов представлена в §6.2.3.

6.2.3 Примеры обработки ситуаций в прототипе

Реализуем метод для различных ситуаций, разного типа.

Шаг 1: Описание и анализ процесса

Ситуация 1:

Аудитор обнаружил, что рабочий неправильно указал дату выполнения операции в сопроводительном паспорте, контролёр не обратил на это внимание.

Ошибка была выявлена на аудите во время проверки документации, связанной с производственным процессом. Неверная дата не повлияла на качество продукции, но повлияла на прослеживаемость, что могло вызвать проблемы в будущем, если бы потребовался ретроспективный анализ и расследование причин отклонений.

По ситуациям 1 и 3 БП является операционный контроль, реализуемый отделом технического контроля в организации (см. рисунок 6.5).

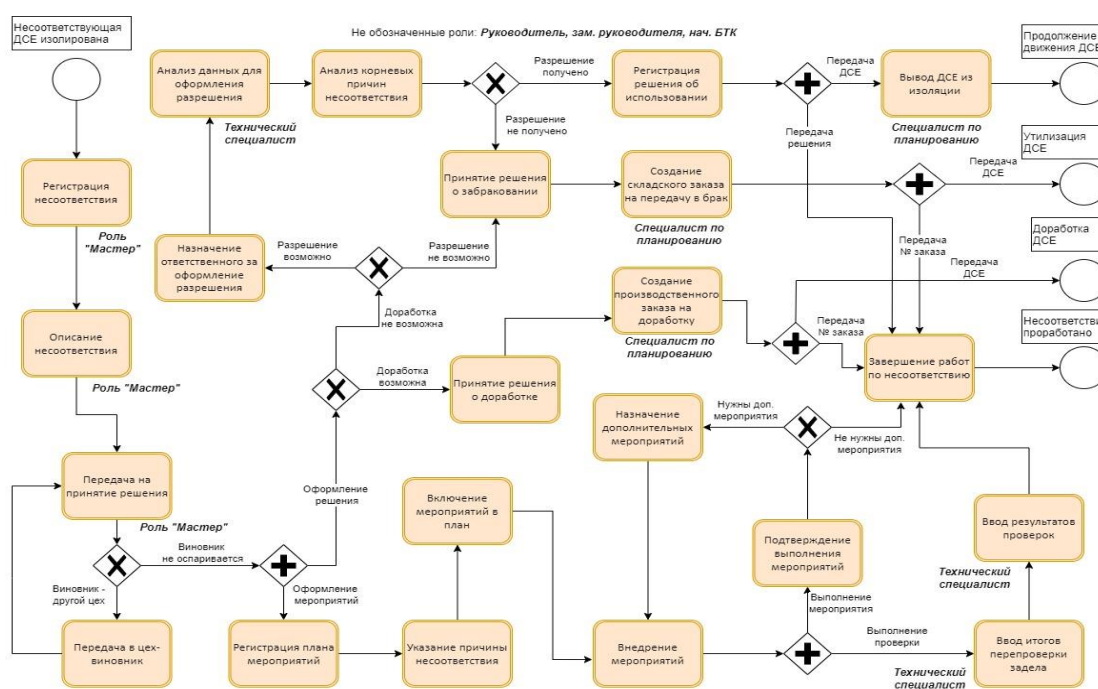


Рисунок 6.4 – Схема операционного контроля и управления несоответствиями на предприятии дискретного производства

Ситуация 2:

В ходе работы с документацией выяснилось, что инструкция по температурному режиму, находящаяся на рабочем месте термометриста, являлась неучтённой копией, что не выявила команда технологов при реализации мероприятий, по оценке культуры производства. Анализ показал, что инструкция соответствует по содержанию учтённой копии. Но потенциально использование неучтённой копии инструкции могло привести к снижению качества продукции. Ситуация 2 связана с обеспечением культуры производства (см. рисунок 6.6).

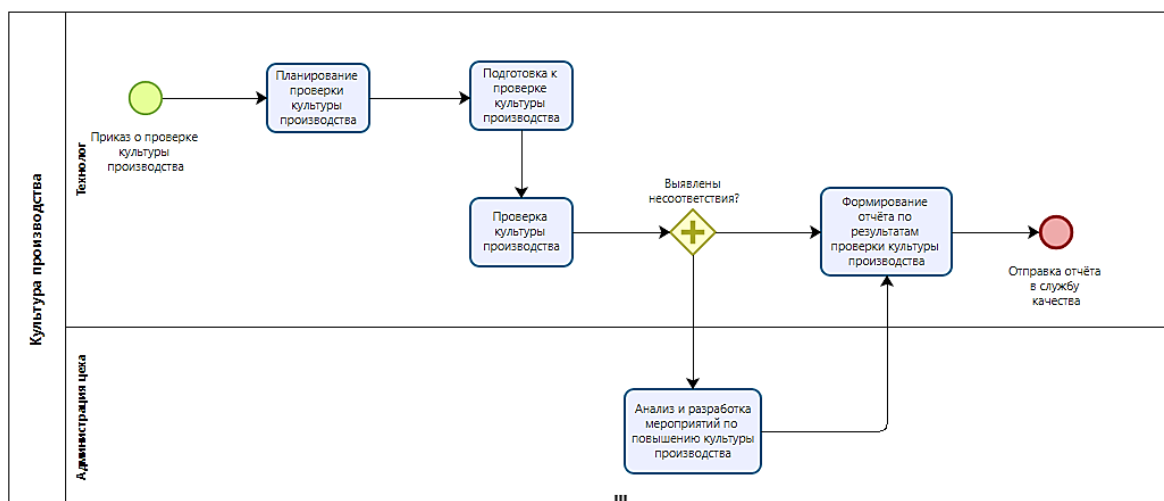


Рисунок 6.5 – Схема процедуры обеспечения культуры производства на предприятии

Ситуация 3:

ОТК не был своевременно уведомлён о выявленных отклонениях в процессе производства. Проблема была обнаружена во время внутреннего аудита, когда проверяющие заметили расхождение между данными в производстве (дефектный узел на столе у мастера участка) и в отделе технического контроля (нет записи в журнале линейного контроля). Данное несоответствие могло привести к увеличению времени на исправление дефектов и дополнительным затратам.

Ситуация 4:

При составлении отчёта по анализу качества на основе данных по дефектам продукции из трёх источников: отчёты по дефектам цеха, отчёты по дефектным комплектующим на входном контроле, отчёты по дефектам материалов из заводской лаборатории, были выявлены риски роста числа несоответствий продукции требованиям технической документации. Ситуацию обнаружил менеджер по качеству при проверке трендов и статистических данных. Наиболее распространённой причиной, помимо традиционного отклонения в технологическом процессе, аномально стали настройки оборудования. Ситуация 4 связана с анализом качества на основе данных о дефектах (см. рисунок 6.7).

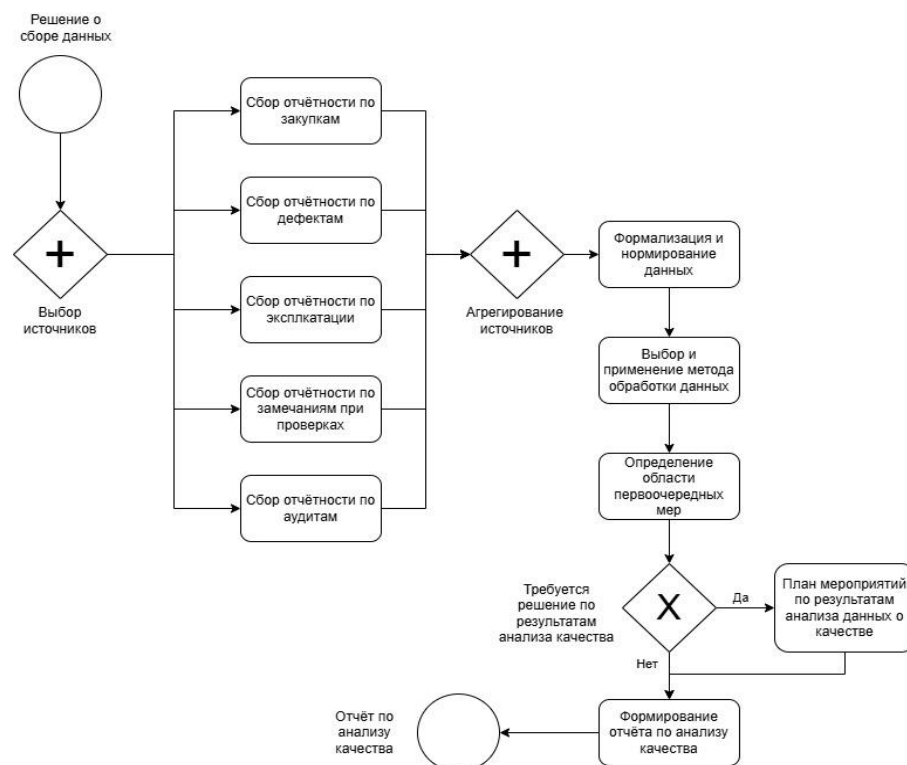


Рисунок 6.6 – Схема процедуры анализа качества на предприятии

Здесь описаны ситуации и схемы БП, в которых они возникают.

Шаг 2: Сбор данных для анализа

Источники данных, методы сбора и возможные последствия ситуаций продемонстрированы в таблице 6.11.

Таблица 6.11 Данные, собранные из описаний ситуаций 1-4

Ситуация	Источники данных	Обнаружил	Методы сбора данных	Возможные последствия
Ситуация 1. Незаполненные графы в журнале	Журнал контроля качества	Аудитор (при проверке документации)	Наблюдение, аудит, анализ документов	Проблемы с прослеживаемостью продукции, сложности при расследовании причин отклонений
Ситуация 2. Неучтённая инструкция	Осмотр рабочего места	Аудитор (при оценке культуры производства)	Наблюдение, аудит, анализ документов	Потенциальное снижение качества продукции, ошибки персонала
Ситуация 3. Нарушение сроков уведомления	Журнал линейного контроля, данные о дефектах	Аудитор (при проверке процессов)	Наблюдение, аудит, анализ документов	Снижение эффективности работы ОТК, риск выпуска брака
Ситуация 4. Прогнозирование рисков	Отчёты по дефектам цеха, отчёты по входному контролю комплектующих и т.д.	Менеджер по качеству (при оценке трендов)	Наблюдение, аудит, анализ документов	Рост числа дефектов продукции, финансовые потери

Шаг 3: Построение онтологической модели

Подробное рассмотрение этапов построения онтологической модели OWL для всех четырёх ситуаций вынесено в приложение Д.

Рассмотрим анализ уровней управления и типов ситуаций.

Шаг 4: Определение уровня управления

Рассмотрим таблицу уровней принятия решений (см. таблицу 6.12).

Таблица 6.12 Уровни принятия решений

Ситуация	Уровень принятия решений	Комментарий
1. Неправильная дата в документах	Продукт	Чёткие критерии: влияние на продукцию минимально (5%), решение принимается автоматически.
2. Неучтённая инструкция	Система, процесс, продукт	Конфликт критериев, необходимость согласования.
3. Нарушение сроков уведомления ОТК	Процесс, продукт	Необходимость анализа частоты нарушений и их влияния на процесс, выбор сценария корректировки.
4. Прогнозирование рисков	Система, процесс	Многофакторный анализ на исторических данных

На данном шаге методики определены уровни принятия решений для всех пяти случаев. Это позволяет классифицировать ситуации и выбрать подходящие методы решения, минимизируя риски и повышая эффективность действий.

Шаг 5: Определение типа ситуации

Рассмотрим таблицу типов ситуаций (см. таблицу 6.13).

Таблица 6.13 Типы ситуаций

Ситуация	Признаки выбора типа ситуации	Тип ситуации
1. Неправильная дата в документах	повторяемость: редкая (≤ 1 раз в месяц); чёткость данных: высокая (дата легко проверяется); влияние на продукцию: минимальное (5%); уровень управления: продукт	Типовая
2. Неучтённая инструкция	повторяемость: отсутствует; чёткость данных: средняя; влияние на продукцию: значительное; уровень управления: система, процесс и продукт	Кросс-уровневая, нетиповая
3. Нарушение сроков уведомления ОТК	повторяемость: отсутствует; чёткость данных: средняя; влияние на процесс: умеренное; уровень управления: процесс и продукт	Кросс-уровневая, нетиповая
4. Прогнозирование рисков	повторяемость: отсутствует; чёткость данных: низкая (многофакторная структура); влияние на систему: высокое; уровень управления: система	Кросс-уровневая, типовая

Выбор типа ситуации осуществляется на основе признаков повторяемости, чёткости данных, влияния на уровень управления и степени неопределённости. Это позволяет классифицировать ситуации как типовые, нетиповые или кросс-уровневые, что определяет дальнейший подход к принятию решений.

Шаг 6: Выбор (алгоритма) метода принятия решений

Выберем метод (алгоритм) принятия решений. Алгоритм принятия решения обычно требуется на этапе решения и выполняется в 2 этапе: выбор типа метода, а затем подбор самого метода по метрикам.

Ситуация 1. Незаполненные графы в журнале

Выберем тип метода за счёт многокритериального анализа (см. таблицу 6.14).

Таблица 6.14 Выбор типа метода для ситуации 1

Показатель	Вес	Класс методов						
		1	2	3	4	5	6	7
объяснимость результата	1	2	3	2	3	3	1	1
устойчивость к неопределённости	2	1	2	3	2	2	2	2
сложность реализации	3	3	3	2	2	1	1	1
адаптивность к новым условиям	2	2	2	2	3	1	1	1
точность прогнозирования	3	2	3	2	3	3	2	1
влияние на другие уровни управления	1	1	2	2	2	2	2	2
уровень неопределённости	1	1	2	3	2	2	3	3
Взвешенная сумма		25	33	29	32	25	21	18

Результат: лучше всего подходят Экспертные методы с жесткой логикой и Квалиметрические методы.

Анализ ситуации 1 показывает, что она типовая, уровень управления ограничен продуктом, повторяемость ситуации невысокая, а степень формализации, напротив, – высокая, требования чёткие. Если провести анализ по рекомендациям в таблице 3.12 из §3.2.2, то лучшие всего подходят алгоритм на основе жёстких «если-то» правил.

Ситуация 2: Неучтённая инструкция

Выбор типа метода см. таблицу 6.15.

Таблица 6.15 Выбор типа метода для ситуации 2

Показатель	Вес	Класс методов						
		1	2	3	4	5	6	7
объяснимость результата	1	1	3	2	3	3	1	1
устойчивость к неопределённости	2	1	2	3	2	2	2	2
сложность реализации	3	3	2	2	1	1	1	1
адаптивность к новым условиям	2	2	1	3	2	1	1	1
точность прогнозирования	3	2	3	2	3	3	2	1
влияние на другие уровни управления	3	1	2	2	2	2	2	2
уровень неопределённости	3	1	2	3	2	2	3	3
Взвешенная сумма		28	36	41	35	33	31	28

Результат: лучше всего подходит Нечёткая логика.

Если провести анализ по рекомендациям в таблице 3.12 из §3.2.2, то лучшие всего подходят алгоритм на основе адаптированного метода нечёткого вывода. Для согласования на уровне сценария может потребоваться экспертиза специалиста или экспертное совещание. Следовательно, требуется применение комбинированного метода.

Ситуация 3: Нарушение сроков уведомления ОТК

Выбор типа метода проведём методом многокритериального анализа по аналогии с ситуацией 1 и 2. Результат анализа: Нечёткая логика.

Анализ показывает, что ситуация кросс-уровневая, поскольку основной уровень управления – процесс, но может влиять на продукт, а также ситуация нетиповая, поскольку присутствуют нечёткие правила, которые требуется оценивать экспертно.

Если провести анализ по рекомендациям в таблице 3.12 из §3.2.2, то лучшие всего подходят алгоритм на основе адаптированного метода нечёткого вывода. Решение о воздействии на виновников – экспертиза со стороны руководителя.

Ситуация 4: Прогнозирование рисков

Выбор типа метода проведём методом многокритериального анализа по аналогии с ситуацией 1 и 2. В результат выявлено, что лучше всего подходит класс методов, связанный со сложными интеллектуальными методами, такими как, *например*, машинное обучение.

В данном случае акцент делается на точности анализа и значимости его последствий. Имеются исторические данные – отчёты за предыдущие месяцы и годы. Уровень шума в отчётности минимален, но о сложности зависимостей, которые могут быть выявлены, судить непросто. Но очевидна их связь с сезонностью: количество дней в месяцах различно, а финансирование обычно растёт к концу года. Поэтому последние месяцы года характеризуются максимальным валом, тогда как первые – минимальным. С учётом данной комбинации характеристик лучшим выбором представляется метод градиентного бустинга [31].

Шаг 7: Подготовка данных

Общие рекомендации по подготовке данных приведены в таблице 6.16.

Таблица 6.16 Рекомендации по подготовке данных по ситуациям

Ситуация	Тип ситуации	Действия по подготовке данных	Объяснение
1. Незаполненные графы в журнале	Типовая	Проверка полноты данных, присвоение меток пропущенным значениям, создание сводной таблицы	Данные уже структурированы, требуется минимальная подготовка
2. Неучтённая инструкция	Кросс-уровневая, нетиповая	Классификация требований, преобразование в лингвистические переменные, создание OWL-модели	Данные неструктурированные, требуется предобработка для анализа
3. Нарушение сроков уведомления ОТК	Кросс-уровневая, нетиповая	Сбор данных с разных уровней, проверка согласованности, преобразование временных задержек в числовые значения	Данные связаны с несколькими уровнями, требуется синхронизация и преобразование
4. Прогнозирование рисков	Кросс-уровневая, типовая	Сбор данных с различных уровней, нормализация данных, применение методов кластеризации, создание цифрового следа	Данные разнородные, требуются сложные методы для выявления взаимосвязей и прогнозирования на основе исторических и текущих данных.

Шаг 8: Настройка решателя

Настройка решателя – сложный и тонкий момент построения СППР. Рекомендации по настройке решателя для всех выше рассмотренных ситуаций вынесены в Приложение Е.

Шаг 9: Интеграция в БП

Ситуация 1. Незаполненные графы в журнале

1. Анализ нормативной базы

В данном примере будут рассмотрены только по одному стандарту, хотя в реальной ситуации их может быть больше, но перегружать данный пример не нужно.

Для анализа процесса предъявления продукции ОТК (журналы, квитанции) рассмотрим стандарт ГОСТ Р 50779.52-95, который задаёт правила статистического приемочного контроля и принятия решений.

2. Перечень требований, которые относятся к ситуации

Из ГОСТ Р 50779.52-95 выделены следующие требования, применимые к процессу предъявления продукции ОТК:

- 1) документация должна быть полной и точной, чтобы обеспечивать достоверность данных о качестве продукции (раздел «Общие требования»);
- 2) журналы и квитанции должны соответствовать установленным форматам и содержать обязательные поля (например, дата, номер партии, результат проверки);
- 3) риск поставщика при контроле не должен превышать 0.05 (таблица 2, раздел «Риски потребителя»);

4) правила переключения между планами контроля должны быть четко задокументированы (таблица 3, раздел «Правила переключения»);

5) допустимые планы контроля должны быть согласованы между поставщиком и потребителем (раздел «Согласованность планов»).

3. Преобразование OWL → СОП-модель

Для преобразования OWL-модели в СОП-модель выполняются шаги:

3.1 Классы и индивиды

– Класс Situation: описывает ситуацию с отсутствием или несоответствием данных в журналах/квитанциях.

– Класс Decision: представляет возможные решения (например, «Уведомление», «Анализ причин»).

– Класс Scenario: описывает последовательность действий для исправления ситуации (например, «Проверка документов», «Обновление записей»).

3.2 Характеристики и меры

– Характеристики: наличие/отсутствие данных, соответствие формату.

– Меры: количество ошибок в документах, процент заполненных полей.

3.3 Правила

Пример: если количество ошибок >10%, то активировать решение «Уведомление».

3.4 Связь с нормативными документами

В онтологию добавляются ссылки на ГОСТ Р 50779.52-95 для обоснования требований.

3.5 Обратное преобразование

После анализа ситуации обновляется OWL-модель для поддержания актуальности.

4. Уточнения для OWL модели

Уточнения для OWL-модели (ситуация 1):

– добавить класс Document с подклассами Journal и Receipt, чтобы явно описать типы документов;

- ввести свойства для проверки соответствия формату (например, `hasRequiredFields`, `isComplete`);
- расширить правила, связанные с рисками поставщика и потребителя, используя данные из таблицы 2 ГОСТ Р 50779.52-95;
- добавить механизм автоматической генерации отчетов о состоянии документации.

Для следующих ситуаций рассмотрим сокращённый анализ.

Ситуация 2. Неучтённая инструкция

1. Анализ нормативной базы

ГОСТ 2.501-2013 регламентирует учёт, хранение и обращение конструкторских документов, а также устанавливает требования к управлению документацией. Он регламентирует порядок присвоения литеры, контроль изменений, доступность актуальных версий.

2. Требования из ГОСТ 2.501-2013

- документы должны иметь уникальные обозначения и литеру стадии разработки (п. 4.1);
- изменения фиксируют в журналах или базах данных (п. 6.2);
- устаревшие версии исключают контролем статуса каждого документа (п. 7.1);
- актуальная документация доступна через единую систему управления (п. 8.2);
- при создании новой версии проверяют соответствие ТЗ (п. 5.3);
- изменения регистрируют для поддержания актуальности документации (раздел 6.2).

3. Преобразование OWL → ситуационно-онтологическая модель

Для преобразования OWL-модели в ситуационно-онтологическую модель в классы `Situation`, `Decision` и `Scenario` добавим возможности по представлению возможных решений (например, «Обновление документации», «Обучение персонала») и последовательности действий для исправления ситуации (например, «Проверка версий», «Обновление базы данных»). Дополним модели

характеристиками: версия документа, статус одобрения, дата последнего обновления и мерами: количество ошибок персонала, процент использования актуальных версий. Включим новые правила. Для связи с нормативными документами добавим в онтологию ссылки на ГОСТ 2.501-2013.

4. Уточнения для OWL модели

Для OWL-модели, созданной для ситуации 2: добавим класс `DocumentVersion` с подклассами `CurrentVersion` и `OutdatedVersion`, чтобы явно описать состояние версий, свойства для проверки актуальности (например, `isCurrent`, `lastUpdatedDate`), расширим правила, связанные с рисками использования устаревших версий, используя данные из раздела 7.1 ГОСТ 2.501-2013, добавим механизм автоматической генерации отчетов о состоянии документации.

Ситуация 3. Процедура уведомления ОТК

1. Анализ нормативной базы

Для анализа ситуации несвоевременного уведомления ОТК о выявленных отклонениях в процессе производства используется стандарт ГОСТ Р 56020, который регулирует вопросы качества продукции и процессов, а также взаимодействие различных подразделений предприятия, устанавливая требования к обеспечению качества на всех этапах жизненного цикла продукции.

2. Перечень требований, которые относятся к ситуации

Из ГОСТ Р 56020 выделены следующие три требования, применимые к проблеме несвоевременного уведомления ОТК: организация эффективного взаимодействия между подразделениями (п. 4.2), своевременное ведение документации (п. 5.3), проведение внутренних аудитов для своевременного контроля и исключения подобных ситуаций (п. 6.2).

3. Преобразование OWL → ситуационно-онтологическая модель

Для преобразования OWL-модели в ситуационно-онтологическую модель в классы `Situation`, `Decision` и `Scenario` добавим возможные решения (например, «Уведомление ОТК», «Корректирующие действия»), новую последовательность действий для устранения проблемы (например, «Выявление отклонения», «Заполнение журнала контроля»). Внесём характеристики: время задержки, степень

несоответствия, последствия для качества и меры: частота проверок, скорость реакции на отклонения, качество ведения документации. Сформируем новые правила, например, «Если время задержки превышает допустимое значение, то инициировать корректирующее действие». Для связи с нормативными документами добавим в онтологию ссылки на ГОСТ Р 56020.

4. Уточнения для OWL модели

Для OWL-модели, созданной для ситуации 3: добавим класс `DeviationEvent` для описания событий выявления отклонений; введем свойство `notificationTime` для фиксации времени уведомления ОТК; расширим правила, связанные с контролем качества, используя данные из раздела 6.2 ГОСТ Р 56020; добавим механизм автоматической генерации отчетов о нарушениях сроков уведомления.

Ситуация 4: Прогнозирование рисков

1. Анализ нормативной базы

Для анализа прогнозирования рисков несоответствия продукции на основе данных из отчётов разных уровней управления используется стандарт ГОСТ Р 58876-2020, который регламентирует системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности.

2. Перечень требований, которые относятся к ситуации

Из ГОСТ Р 58876-2020 выделены следующие требования, применимые к прогнозированию рисков: планирование и внедрение действий, связанных с рисками и возможностями, (п. 6.1); статистические методы для анализа данных и прогнозирования результатов для анализа данных (п. 8.5.1.3); анализ данных из различных источников (п. 8.4); мониторинг, измерение, анализ и оценка должны проводиться на основе результатов анализа данных (п. 9.1); система менеджмента качества должна непрерывно улучшаться на основе данных и прогнозов (п. 10.3).

3. Преобразование OWL → ситуационно-онтологическая модель

Для преобразования OWL-модели в ситуационно-онтологическую модель в классы `Situation`, `Decision` и `Scenario` добавим возможные решения (например, «Прогнозирование», «Анализ причин»), последовательность действий для исправления ситуации (например, «Сбор данных», «Анализ трендов»). Определим

характеристики: уровень риска, частота несоответствий, качество данных и меры: вероятность риска, процент прогнозируемых несоответствий. Кроме того, формализуем правило, например, «Если вероятность риска > 80%, то активировать решение 'Прогнозирование'». Для связи с нормативными документами добавим в онтологию ссылки на ГОСТ Р 58876-2020.

4. Уточнения для OWL модели

Для OWL-модели, созданной для ситуации 4, добавим класс RiskAnalysis с подклассами HighRisk, MediumRisk и LowRisk, чтобы явно описать уровень риска, введем свойства для анализа данных (например, hasTrendData, isPredicted), осуществим расширение правил, связанных с использованием статистических методов, используя данные из п. 8.5.1.3, добавим механизм автоматической генерации отчетов о прогнозируемых рисках.

Шаг 10: Анализ эффективности

Анализ эффективности прототипа по каждой из ситуаций вынесен в Приложение Ж.

Шаг 11: Применение СППР

Рассмотрим рекомендации по применению СППР для всех 4 ситуаций.

Ситуация 1: Неправильная дата в документах

- внедрить автоматизированный контроль заполнения обязательных полей, например, за счёт использования ERP-системы [184];
- разработать чёткие инструкции по ведению журнала (см. ГОСТ Р 58876-2020);
- создать систему оповещений о необходимости заполнения данных, например, за счёт автоматической генерации уведомлений.

Ситуация 2: Неучтённая инструкция

- повысить эффективность автоматизированного контроля корректности данных при их вводе;
- разработать механизмы кросс-проверки данных между отделами для повышения эффективности информационного обмена;

- разработать и внедрить базу типовых ошибок и способов их предотвращения (например, при помощи сбора информации в ERP-системе).

- интегрировать автоматизированный контроль корректности данных с ERP-системами, используемыми для контроля качества.

Ситуация 3: Нарушение сроков уведомления ОТК

- разработать систему раннего предупреждения о потенциальных конфликтах интересов за счёт прогнозирования таких рисков, например, за счёт использования экспертиз или машинного обучения.

- повысить эффективность автоматизированного анализа причин возникновения дефектов, например, за счёт использования метода диаграммы Исикавы;

- разработать адаптивные алгоритмы обработки изменений в условиях работы для обеспечения возможности быстрого решения нестандартных ситуаций.

Ситуация 4: Прогнозирование рисков несоответствия продукции

- повысить эффективность системы прогнозирования рисков несоответствия продукции, например, за счёт использования OWL-модели для формализации требований;

- сформировать базу знаний по методам устранения несоответствий продукции для повышения эффективности аналитической работы;

- интегрировать систему прогнозирования рисков с ERP-системами;

- разработать автоматически генерируемые отчёты о прогнозируемых рисках.

Здесь показано комплексное использование методов внедрения СППР для обеспечения качества на промышленном предприятии.

6.3 Апробация результатов исследования на предприятиях

6.3.1 Апробация в производственной организации

Методология ИППР на основе СОП может успешно применяться в условиях действующего промышленного предприятия. Особенностью внедрения научных результатов в производство является практическая реализация СОП в среде высокой

неопределённости и динамических изменений нормативной базы. В отличие от лабораторных условий, производственная среда характеризуется наличием нетиповых и кросс-уровневых ситуаций, неполнотой данных, многообразием ДО, необходимостью быстрого реагирования на проблемы с качеством продукции.

В таблице 6.17 представлены научные результаты, наиболее подходящие для применения в производстве.

Таблица 6.17 Возможности для внедрения полученных результатов на промышленном предприятии

Метод	Назначение	Полезные эффекты	Метрики (диапазон)
Модульная архитектура СППР	Поддержка гибкой интеграции модулей анализа и принятия решений	Обеспечивает адаптацию СППР под разные производства и уровни управления, упрощает масштабирование	V^{DM} (+30–50%), RPR (+35–45%)
Метод подбора алгоритма принятия решений	Автоматический выбор метода в зависимости от типа ситуации	Повышает точность решений при нарушениях качества, снижает зависимость от эксперта	K^{agr} (+40–60%), ΔE (-50–70%)
Интеллектуальная подсистема обработки данных	Анализ структурированных и неструктурированных данных	Ускоряет выявление причин дефектов, включая данные из отчётов и комментариев операторов	IA (+30–40%), V^{akt} (+200–300%)
Адаптированный метод нечёткого вывода	Обработка неточных формулировок из практики и нормативов	Позволяет принимать решения при неполных данных, например, «температура высокая»	XAI (>4.5), K^{rel} (+30–40%)
Метод визуализации ПСС	Отображение зависимостей в виде графов	Повышает прозрачность анализа для технологов и ЛПР, ускоряет диагностику	XAI (+50–60%), T^{resp} (-40–60%)
Методика объяснимости решений	Генерация понятных пояснений к выводам СППР	Укрепляет доверие персонала к системе, снижает сопротивление внедрению	XAI (>4.5), K^{agr} (+40–50%)
Адаптированный метод цифрового следа	Фиксация решений и их последствий для обучения	Обеспечивает непрерывное улучшение системы за счёт накопленного опыта	RPR (+30–40%), ΔK (+0.2–0.3)
Метод самообучения модели через обратную связь	Автоматическое обновление правил на основе практики	Снижает количество повторяющихся ошибок, актуализирует знания без вмешательства	V^{akt} (+250–350%), ΔE (-60–70%)
Метод ДНП OWL ↔ СОП	Синхронизация онтологий с ТММ	Исключает расхождения между системой и нормативами, повышает достоверность	K^{agr} (+40–50%), Ac (+20–30%)
Метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО	Преобразование онтологий в документы и обратно	Автоматизирует обновление инструкций и регламентов, снижает трудозатраты	T^{doc} (-50–70%), K^{rel} (+30–40%)

В результате внедрения в ПАО «ОДК-УМПО» были получены результаты, отражённые в акте внедрения. Количественные эффекты внедрения, описанные в акте, расшифрованы в таблице 6.18.

Таблица 6.18 Соответствие фразы из акта метрикам и методам диссертации

Фраза из акта	Соответствие		Пояснение
	метрике	методам	
«Сокращено время на анализ и принятие решений по дефектам на 60%»	V^{DM}	-	Метрика V^{DM} измеряет, насколько быстро СППР формирует вывод после фиксации ситуации, ускорение на 60% за счёт применения модульной архитектуры и интеллектуальной подсистемы обработки данных
«Сокращено количество повторяющихся дефектов за счёт системного анализа причин и автоматического формирования корректирующих действий»	-	Метод анализа ПСС, методика объяснимости решений, адаптированный цифровой след	Повторяющиеся дефекты устраняются за счёт формализации ПСС и генерации корректирующих сценариев на основе цифрового следа, что реализует принцип самообучения модели через обратную связь
«Сокращено время на согласование и актуализацию нормативной документации на 75% за счёт прямой связи между онтологическими моделями и регламентами»	V^{akt}	Метод ДНП OWL ↔ СОП, методика двунаправленной интеграции онтологий в ДО	Метрика V^{akt} показывает, насколько быстро знания обновляются в системе, а сокращение времени на 75% – это следствие автоматической генерации и синхронизации документов
«Повысилась согласованность действий между цехами, БТК и инженерными службами, что снизило количество спорных ситуаций и пересмотров решений»	K^{agr}	Метод кросс-уровневого согласования онтологий, Трёхуровневая проверка (синтаксис–семантика–прагматика)	Противоречия между уровнями устраняются за счёт согласования онтологий и прагматической проверки на соответствие бизнес-требованиям, поэтому рост согласованности является прямым эффектом применения СОП
«Обеспечена прозрачность и прослеживаемость решений по качеству, что повысило готовность к внутренним и внешним аудитам и сократило время на подготовку док. базы»	XAI	Адаптированный метод цифрового следа, методика объяснимости решений, модель Трёхуровневой проверки	Любое решение имеет доказательную базу, что реализует объяснимость и прагматическую валидацию

Внедрение осуществлялось с пилотного проекта на одном участке сборки. Затем было масштабировано на уровень цеха. Основное внимание уделялось интеграции прототипа СППР в существующую систему управления качеством и ERP-подобную платформу.

Апробация в производственной организации доказала практическую ценность методологии ИППР на основе СОП. Внедрение повысило качество решений, обеспечило согласованность и объяснимость в реальном производстве (см. таблицу 6.18). Акт внедрения ПАО «ОДК-УМПО» приведён в приложении И, п. 1.

6.3.2 Апробация в проектной фирме

Методология ИППР на основе СОП даёт результаты, применимые в проектных организациях при реализации ERP-систем. Внедрение этих результатов позволяет не только повысить качество проектирования и сопровождения ERP-

решений, но и обеспечить их устойчивость к изменениям, соответствие нормативам и высокую степень объяснимости для заказчика (см. таблицу 6.19).

Таблица 6.19 Возможности для внедрения полученных результатов в проектной фирме

Метод	Назначение	Полезные эффекты	Метрики
ДНП OWL-моделей в СОП и обратно	Автоматизация формирования единой модели предприятия	Сокращение трудозатрат на согласование процессов, снижение рисков расхождений	V^{akt} (скорость актуализации), ΔE (ошибки интерпретации)
Автоматическая генерация проектной документации из онтологической модели	Создание рабочих инструкций, чек-листов, регламентов	Сокращение сроков подготовки документации, гарантия соответствия ERP-логике	T^{doc} (время подготовки), K^{rel} (релевантность знаний)
Трёхуровневая проверка (синтаксис – семантика – прагматика)	Проверка соответствия ERP-процессов нормативам на всех уровнях	Снижение количества замечаний при аудитах, повышение доверия заказчика	K^{agr} (согласованность вывода), A_c (соответствие нормативам)
Адаптированный метод цифрового следа	Фиксация изменений, решений и их последствий для непрерывного улучшения	Возможность долгосрочного сопровождения ERP-системы	RPR (воспроизводимость решений), ΔK (рост согласованности)
Методика объяснимости решений	Обеспечение прозрачности решений СППР за счёт генерации пояснений	Повышение доверия заказчика, восприятие системы как «надёжного помощника»	XAI (объяснимость)
Адаптация цикла PDCA для динамических условий	Интеграция с цифровым следом и онтологической моделью для непрерывного улучшения	Преобразование ERP-проекта в систему долгосрочного развития, конкурентное преимущество	IA (точность идентификации ситуации), V^{DM} (скорость принятия решений)
Метод кросс-уровневого согласования онтологий	Обеспечение целостности модели при интеграции ERP с MES и др. системами	Устранение противоречий между уровнями управления, формирование единого информационного пространства	K^{agr} , ΔE (снижение ошибок интерпретации)

В результате внедрения в ООО «Айпл консалтинг» были получены результаты, отражённые в акте внедрения (приложение И, п. 2). Количественные эффекты внедрения, описанные в акте, расшифрованы в таблице 6.20.

Таблица 6.20 Связь бизнес-эффектов из Акта внедрения с научными результатами диссертации

Показатель из акта	Метрика	Методы	Результат	Пояснение
Среднее время подготовки бизнес-сценария	Время документирования решения (T^{doc})	Метод ДНП OWL ↔ СОП, модель Трёхуровневой проверки	Сокращение на 47%	Автоматическая генерация ДБС из онтологической модели (OWL) по шаблону сокращает ручной труд, а Трёхуровневая проверка исключает ошибки на ранних этапах, что уменьшает время на исправления
Количество итераций согласования ДБС с заказчиком	Коэффициент согласованности решений (K^{agr})	Метод кросс-уровневого согласования онтологий, методика объяснимости решений	Снижение на 50-60%	Устранение терминологических и логических противоречий между уровнями управления и генерация пояснений для каждого шага снижают количество спорных вопросов и повторных согласований

Показатель из акта	Метрика	Методы	Результат	Пояснение
Время на актуализацию документации при изменении требований	Скорость актуализации вывода (V^{akt})	Адаптированный метод цифрового следа, механизм самообучения модели через обратную связь	Сокращение на 70-75%	Изменения в процессах и решениях фиксируются в цифровом следе, что автоматически инициирует обновление онтологической модели и всех связанных с ней документов
Доля повторяющихся замечаний при согласовании	Снижение ошибок интерпретации (ΔE)	Трёхуровневая проверка (синтаксис–семантика–прагматика), метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО	Снижение на 80%	Проверка модели на всех уровнях и синхронизация с нормативами исключают расхождения, которые вызывают одни и те же замечания на разных этапах
Время на адаптацию новых проектных команд	Скорость принятия решений (V^{DM})	Методика объяснимости решений, адаптированный метод цифрового следа	Сокращение на 60-70%	Новые сотрудники быстро осваивают методологию за счёт доступа к формализованной базе знаний, объяснимым сценариям и примерам решений из предыдущих проектов
Время на формирование ответа на запрос заказчика	Объяснимость вывода (XAI)	Методика объяснимости решений, причинно-следственные графы, двунаправленная интеграция онтологий в документооборот	Сокращение на 75%	Система автоматически генерирует обоснование для любого решения, что позволяет оперативно отвечать на запросы заказчика без ручного поиска

ООО «Айпл консалтинг» использовало методы ДНП OWL ↔ СОП, кросс-уровневого согласования онтологий, Трёхуровневой проверки, объяснимости решений и цифрового следа для автоматической генерации детальных бизнес-сценариев (ДБС). В результате повысилась эффективность проектной деятельности и подтвердилась перспектива расширения разработанной методологии. В результате внедрения в ООО «Газпромнефть – Цифровые решения» были получены результаты, отражённые в акте внедрения (приложение К, п. 3). Количественные эффекты внедрения, описанные в акте, расшифрованы в таблице 6.21.

Таблица 6.21 Связь бизнес-эффектов из Акта внедрения с научными результатами диссертации

Данные акта	Метрика	Методы	Результат	Пояснение
Время на формализацию и согласование спецификаций функциональности	Время документирования решения (T^{doc})	Метод ДНП OWL ↔ СОП, модель Трёхуровневой проверки	Сокращение примерно на 50%	Автоматическая генерация проектной документации из модели OWL, построенной на основе корпоративных стандартов и технологических процессов, значительно сокращает ручной труд. Трёхуровневая проверка обеспечивает высокую достоверность моделей на этапе проектирования, минимизируя время на исправление ошибок

Данные акта	Метрика	Методы	Результат	Пояснение
Количество итераций при согласовании требований между заказчиком, аналитиками и командой разработки	Коэффициент согласованности решений (K^{agr})	Метод кросс-уровневого согласования онтологий, методика объяснимости решений	Уменьшение на 40-50%	Устранение терминологических и логических противоречий между различными заинтересованными сторонами и автоматическая генерация понятных пояснений к каждому шагу решения снижают количество спорных вопросов и необходимость повторных согласований
Время на актуализацию архитектурных моделей и документации при изменении требований	Скорость актуализации вывода (V^{akt})	Адаптированный метод цифрового следа, механизм самообучения модели через обратную связь	Сокращение на 70-75%	Изменения в требованиях фиксируются в едином цифровом следе, который автоматически инициирует обновление онтологической модели и всех зависимых архитектурных диаграмм и технической документации, замыкая цикл непрерывного улучшения
Число повторяющихся замечаний на стадиях тестирования и интеграции	Снижение ошибок интерпретации (ΔE)	Трёхуровневая проверка, двунаправленная интеграция онтологий в документооборот	Сокращение на 35%	Комплексная проверка модели на всех уровнях абстракции и её синхронизация с корпоративными стандартами исключают системные расхождения, которые приводили бы к однотипным ошибкам на разных этапах жизненного цикла проекта
Время на адаптацию новых членов команд разработки и аналитиков	Скорость принятия решений (V^{DM})	Методика объяснимости решений, адаптированный метод цифрового следа	Сокращение на 30%	Новые сотрудники быстро осваивают предметный контекст за счёт доступа к единой базе знаний, наглядным причинно-следственным графам решений и истории предыдущих проектных решений, зафиксированной в цифровом следе

Компания ООО «Газпромнефть – Цифровые решения» успешно адаптировала ключевые элементы методологии ИППР на основе СОП: метод ДНП OWL-моделей, метод кросс-уровневого согласования онтологий, трёхуровневую верификацию, методику объяснимости решений и адаптированный метод цифрового следа. И применила их для создания комплексного подхода к автоматизации проектирования и поддержке принятия решений в сфере управления нефтегазовыми активами. Внедрение этих методов в рамках стратегических цифровых инициатив позволило компании повысить эффективность управления добычей, качество операционных решений и ускорить разработку информационно-аналитических систем, что подтверждает широкие перспективы применения разработанной в диссертации методологии в различных отраслях промышленности.

6.4 Апробация прототипа СППР в учебном процессе

6.4.1 Деловые игры как средство проверки научных результатов

Предложены 5 деловых игр, реализованных на лабораторных работах, для которых заданы следующие задания:

1. Классификация ситуаций на типовые, нетиповые и кросс-уровневые

Даны описания 10 ситуаций, имеющих по 5 характеристик. Типизация ситуаций произведена, но студентам неизвестна. Студенты делятся на подгруппы по 4 человека. Половине подгрупп предлагается использовать текстовое описание, другой – прототип СППР. Студенты должны классифицировать ситуации и обосновать свой выбор. Результат оценивается по метрикам: среднее время решения задачи, корректность решения, точность идентификации ситуации.

2. Метод выбора алгоритма принятия решений

Даны 5 ситуаций из практики управления качеством на промышленном предприятии, каждая из которых содержит описание: уровня управления (продукт, процесс, система), типа ситуации (типовая, нетиповая, кросс-уровневая), степени неопределённости (больше или меньше 40%).

Нужно выбрать наиболее подходящее решение на основе анализа ситуации, рекомендаций из стандарта организации (СТО) или через прототип СППР.

Методика:

Студенты делятся на подгруппы по 4 человека. Половине подгрупп предоставлены только СТО, другой половине – прототип СППР с поддержкой СОП.

Каждая группа классифицирует ситуацию и выбирает метод: типовые ситуации → статистика и правила, нетиповые → нечёткая логика, кросс-уровневые → многокритериальный анализ (VIKOR, TOPSIS).

Критерии оценки: среднее время принятия решения, обоснованность выбора метода, ошибки интерпретации входных данных, точность идентификации ситуации

3. Объяснимость вывода

Представлены выводы СППР, сгенерированные на основе онтологической модели и цифрового следа, а также выводы, сформированные студентами вручную на основе рекомендаций СТО (без использования прототипа).

Нужно оценить объяснимость вывода, сравнить рекомендации СППР и людей по критериям: понятность, логичность, связь с нормативами, воспроизводимость.

Методика:

Студенты делятся на подгруппы по 4 человека. Каждая группа получает 5 ситуаций и 5 выводов (по одному на ситуацию). Одна половина подгрупп анализирует выводы СППР, другая – выводы, сформированные вручную.

Студенты заполняют анкету, где оценивают: насколько понятно объяснено решение, насколько оно связано с нормативами, насколько логично и воспроизводимо.

Критерии оценки: время выполнения задания, согласованность оценок, средний уровень объяснимости по 5-балльной шкале.

4. Повторяемость решений

Группе дают задание на выбор из альтернатив. Нужно решить 100 задач на выбор решений в области качества, записав верный ответ в файл. Затем группа делится на подгруппы, одна подгруппа пользуется файлом, вторая прототипом СППР. Задачи выдаются каждой подгруппе в случайном порядке с небольшими вариациями входных данных так, чтобы их ответы нельзя было найти автопоиском. На задачу даётся 30 секунд.

Критерии оценки: число правильно отобранных ответов для задачи, согласованность оценок подгрупп, воспроизводимость результата, ошибки интерпретации входных данных,

5. Согласованность решений

Группа выбирает решение сложных задач. Чётные подгруппы выбирают решение на основе анализа СТО и обсуждения, нечётные на основе обсуждения с использованием прототипа. Ответы неочевидны, ситуации не типовые.

Нужно решить правильно как можно больше задач.

Критерии оценки: число правильно решённых задач, среднее время решения одной задачи, согласованность экспертов, т.е. процент решений, в которых эксперты были единодушны.

Результаты данной экспертизы приведены в таблице П.Г2 – П.Г7, приложения Г.

Интеграция с ERP улучшает результаты, но наибольший эффект даёт СОП-подход, что подтверждает достоверность и научную новизну разработанной методологии интеллектуальной поддержки принятия решений.

6.4.2 Проектные работы магистрантов как способ демонстрации научных результатов

Проектные работы магистрантов служат важным инструментом апробации научных результатов, позволяя проверить применимость разработанных методов в реальных условиях промышленных предприятий. В рамках ВКР по реинжинирингу БП студенты реализуют ключевые компоненты СОП, что подтверждает их практическую значимость и воспроизводимость (см. таблицу 6.22).

Таблица 6.22 Проверяемые научные результаты в проектных ВКР магистрантов

Метод	Назначение	Полезные эффекты	Метрики (диапазон)
Модульная архитектура СППР	Гибкая интеграция модулей анализа и принятия решений	Ускорение адаптации СППР под специфику производства	V^{DM} : +30–50%, RPR : +35–45%
Метод подбора алгоритма принятия решений	Выбор метода на основе типа ситуации и уровня неопределённости	Повышение точности решений в нетиповых ситуациях	K^{agr} : +40–60%, ΔE : -50–70%
Метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО	Синхронизация онтологий с нормативными документами	Автоматизация обновления регламентов и инструкций	T^{doc} : -50–70%, K^{rel} : +30–40%
Методика объяснимости решений	Генерация понятных пояснений к выводам СППР	Повышение доверия ЛПР и снижение сопротивления внедрению	XAI : >4.5/5, K^{agr} : +40–50%
Адаптированный метод цифрового следа	Фиксация решений и их последствий для обучения модели	Обеспечение непрерывного улучшения системы	RPR : +30–40%, V^{akt} : +250–350%
Адаптированный метод нечёткого вывода	Обработка неточных формулировок из практики и нормативов	Повышает точность анализа и обеспечивает гибкость при работе с нетиповыми ситуациями	XAI (>4.5), ΔE : -50–70%, K^{agr} : +40–60%

Проверка научных результатов была выполнена в ВКР, указанных в таблице 6.23.

Таблица 6.23 Темы выпускных квалификационных работ магистрантов

Тема ВКР	Методы	Полезные эффекты
Реинжиниринг процесса контроля качества на участке сборки оборудования	1) Метод подбора алгоритма принятия решений 2) Методика объяснимости решений	Снижение ошибок интерпретации на 65%, рост согласованности между уровнями до 0.88
Реинжиниринг ДО в системе управления качеством на основе онтологий	1) Метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО 2) Модульная архитектура СППР 3) Методика объяснимости решений	Сокращение времени подготовки документов на 60%, повышение релевантности знаний на 35%
Разработка СППР для анализа причин дефектов в производстве	1) Адаптированный метод цифрового следа 2) Метод подбора алгоритма принятия решений 3) Адаптированный метод нечёткого вывода	Увеличение скорости актуализации модели на 300%, рост воспроизводимости решений до 0.93
Интеграция СППР с ERP-системой для управления качеством	1) Метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО 2) Методика объяснимости решений	Повышение объяснимости выводов до 4.8 баллов, снижение времени согласования решений на 50%

На результаты исследования, которые использовались магистрантами при работе над ВКР, получены акты внедрения в учебный процесс (Приложение И, п.4).

Проектные работы магистрантов подтвердили применимость и воспроизводимость результатов диссертации в реинжиниринге БП. Методы СОП в ВКР дали измеримые эффекты: снижение ошибок, рост скорости реакции, повышение согласованности и объяснимости.

Результаты диссертации имеют теоретическую новизну и практическую значимость для проектных организаций, работающих с ERP-системами. Они повышают качество проектов, сокращают сроки и стоимость внедрения, укрепляют доверие заказчиков. Эффекты оцениваются по метрикам XAI , K^{agr} , V^{DM} , ΔE , V^{akt} , T^{doc} .

6.5 Выводы по главе

Глава посвящена апробации и практической реализации методологии ИППР на основе СОП в сфере обеспечения качества на промышленных предприятиях.

Обоснованность результатов подтверждается теоретическими разработками по теоретико-множественному формализму, онтологическому моделированию и методам анализа, а также практическими примерами внедрения в производственных и проектных организациях. Достоверность обеспечена комплексным подходом: использованием научно обоснованных методов (многокритериальный анализ,

нечёткая логика, машинное обучение), статистической обработкой данных, экспертными оценками и количественной оценкой метрик эффективности (XAI , K^{agr} , RPR , ΔE , V^{akt} и др.).

Научная значимость заключается в развитии методологии ИППР за счёт интеграции ситуационного анализа, онтологий и цифрового следа, что расширяет понимание механизмов управления качеством в условиях неопределённости и кросс-уровневых взаимодействий. Практическая значимость проявляется в повышении качества принимаемых решений, снижении ошибок интерпретации, сокращении времени на ДО и обеспеченности прослеживаемости. Применение методологии продемонстрировано на примерах анализа типовых, нетиповых и кросс-уровневых ситуаций: несвоевременное уведомление ОТК, использование неучтённых инструкций, прогнозирование рисков на основе данных о дефектах, нарушения в ДО. Результаты внедрены в производственную практику (ПАО «ОДК-УМПО») и проектные фирмы (ООО «Айпл консалтинг», ООО «Газпромнефть – Цифровые решения»), что подтверждено актами внедрения и свидетельствует о готовности методологии к тиражированию.

Заключение

На основе проведённых исследований получены научные результаты:

1. Разработаны методологические основы СОП, которые позволяют обеспечить согласованное взаимодействие между уровнями управления через теоретико-множественный аппарат и онтологические модели. СОП представляет собой систематизированную методологию моделирования и анализа процессов принятия решений, основанную на интеграции ситуационного анализа, онтологического моделирования и теоретико-множественного аппарата. В отличие от известных подходов (Шведина [253], Скобелева [231], Удальцовой [242]), методологические основы СОП обеспечивают сквозную согласованность решений на уровнях продукта, процесса и системы, а также адаптацию к неопределённости через нечёткую логику и машинное обучение включая таксономию ситуаций (типовые, нетиповые, кросс-уровневые), дискретизацию процессов по времени (смены) и месту (участки) на основе теории расписаний, а также адаптацию цикла PDCA для динамических условий. Эффективность теоретико-множественной модели подтверждена расчётами: достигнута точность идентификации ситуации (IA) на уровне 0.87 (+39%) и снижение ошибок интерпретации (ΔE) до 0.23 (–71.2%) при анализе нетиповых ситуаций (Таблица П.Г1).

2. Разработаны методы проектирования адаптивных инструментов СППР, обеспечивающие динамическую настройку логики принятия решений под тип ситуации и уровень неопределённости, включающие:

- модульную архитектуру, поддерживающую параллельную обработку задач и динамическую замену компонентов без остановки системы;
- метод выбора алгоритма, основанный на многокритериальной оценке типа ситуации и уровня неопределённости;
- интеллектуальную подсистему обработки данных, реализующую гибридную обработку через комбинацию машинного обучения и нечёткой логики;
- адаптированный нечёткий вывод, интегрирующий функции принадлежности с онтологическими характеристиками;

– механизм кросс-уровневого согласования онтологий, формирующий семантические «мосты» между уровнями принятия решений.

В отличие от традиционных подходов, основанных на жёстких правилах или изолированных ИИ-методах, предложенные методы формируют единый цикл проектирования адаптивной СППР, в котором формализация знаний и генерация объяснимого решения осуществляются согласованно на основе типа ситуации и уровня неопределённости, что обеспечивает устойчивость к неполным данным, снижает ошибки интерпретации и позволяет системе адаптироваться к изменяющимся условиям. Эффективность подтверждена как расчётами, так и внедрением: скорость принятия решений (V^{DM}) увеличена до 2.8 решений/час (+40%), воспроизводимость (RPR) достигла 0.94 (+36.2%) (Таблица П.Г1), а по данным актов сокращение времени на анализ дефектов на 60% (ПАО «ОДК-УМПО»), снижение повторяющихся замечаний на 80% (ООО «АЙПЛ-Консалтинг») и ускорение подготовки ответов на запросы заказчика на 75% (ООО «Газпромнефть – Цифровые решения») (§6.3).

3. Разработана методология ИППР в сфере обеспечения качества на основе СОП, которая впервые объединяет теоретико-множественное описание ситуаций, адаптивные ИИ-инструменты и механизмы практической реализации в единую систему управления. В отличие от традиционных СППР, ориентированных на изолированные задачи, предложенная методология обеспечивает сквозную поддержку решений на уровнях (продукт, процесс, система) за счёт:

- формализованного метода применения ИППР, охватывающего полный цикл от анализа процесса до обратной связи;
- методики объяснимости, сочетающей визуализацию причинно-следственных связей и ролевые интерфейсы для ЛПР разных уровней;
- механизма самообучения через цифровой след, обеспечивающего актуализацию правил и функций принадлежности на основе реальных результатов;
- иерархической модели управления, согласующей действия между уровнями при кросс-уровневых ситуациях;

– интеграции выводов СППР с ERP-системой на основе онтологической синхронизации и фиксации расхождений в цифровом следе.

Методология позволяет системе не только генерировать решения, но и обеспечивать их воспроизводимость, объяснимость, согласованность и улучшение в условиях промышленного производства. Применение методологии позволило повысить согласованность решений (K^{agr}) с 0.63 до 0.9 и релевантность знаний (K^{rel}) до 0.88, что подтверждено в ходе апробации на бизнес-процессах (Таблица П.Г1). По данным актов повысилась согласованность действий между цехами и службами (ПАО «ОДК-УМПО»), снизилось число итерации согласования на 50-60% (ООО «АЙПЛ-Консалтинг») и на 40-50% (ООО «Газпромнефть – Цифровые решения») (§6.3).

4. Разработанный комплексный метод интеграции модели СОП в БП и ДО промышленного предприятия как составляющая часть методологии интеллектуальной поддержки принятия решений включает методы ДНП: OWL-онтологии ↔ модель СОП и OWL-онтологии ↔ нормативные документы, а также метод Трёхуровневой проверки и метод поддержания актуальности модели. Он отличается от существующих использованием формализма СОП, что минимизирует противоречия при трансляции знаний и обеспечивает строгую семантическую согласованность. Эффективность подтверждена расчётами и внедрением: скорость актуализации модели (V^{akt}) достигла 4.1 связей/час (+273%), объяснимость (XAI) – 4.8/5 (+65.5%) (Таблица П.Г1). По данным актов: сокращение времени на актуализацию документации на 75% (ПАО «ОДК-УМПО»), на 70-75% (ООО «Газпромнефть – Цифровые решения»), сокращение времени подготовки бизнес-сценариев на 47% (ООО «АЙПЛ-Консалтинг») и повышение соответствия нормативам (Ac) до 94% (+25.3%) (§6.3).

5. Разработанная методика оценки эффективности методологии ИППР в сфере обеспечения качества на промышленных предприятиях (§4.5) использует разные методы свертки и многокритериального анализа, комбинируя для анализа количественные и качественные показатели. В отличие от известных методик, таких как квалиметрический анализ, она использует нечёткие переменные для агрегации

показателей, а также интегрирует апостериорный, измерительно-прогнозный и оценочно-субъективный методы оценки эффективности, что обеспечивает снижение субъективности оценок экспертов. Методика применялась на четырёх ситуациях разных типов (типовая, нетиповая, кросс-уровневая) на промышленных предприятиях. Интегральный показатель эффективности составил 85-88% – уровень «очень высокий» по шкале из таблиц П.Ж8-П.Ж11. Результат выше значений до внедрения. Оценка устойчивости: вариация весов экспертов в пределах $\pm 20\%$ меняет интегральную оценку менее чем на 3%. Коэффициент Кронбаха $\alpha > 0.8$ подтверждает высокую согласованность экспертов.

Полученные результаты проверены на промышленных предприятиях и в проектных фирмах – подтверждено актами внедрения (см. приложение И).

Глоссарий и аббревиатуры

1. **Бизнес-процесс** (БП) – последовательность взаимосвязанных действий, направленных на достижение определенной цели или результата [92].

2. **Двунаправленное преобразование** (ДНП) – преобразование из одной модели в другую и обратно.

3. **Дерево решений** – метод, связанный со схематичным представлением проблемы принятия решений, используемый для выбора наилучшего направления действий из имеющихся вариантов [229].

4. **Документооборот** (ДО) – система обращения документов на предприятии.

5. **Интеллектуальная поддержка принятия решений** (ИППР) в диссертации – это адаптивная, онтологически обоснованная система, основанная на ситуационно-онтологическом подходе. В отличие от традиционных СППР [81], она обеспечивает объяснимость, самообучение через цифровой след, кросс-уровневое согласование и интеграцию с ERP и нормативами, что обеспечивает гибкость и устойчивость в условиях неопределённости.

6. **Качество менеджмента** – это интегральная мера профессиональной пригодности управленческого персонала, эффективности инфраструктуры управления и существующей системы мотивации, а также степень адекватности формируемых менеджментом решений для успешного функционирования предприятия в условиях постоянных угроз со стороны внешней среды [188].

7. **Качество процесса** – степень соответствия процесса промышленного предприятия установленным требованиям и способность достигать заданных результатов (на основе [134]).

8. **Кросс-уровневые ситуации** – ситуации, в которых решение на одном уровне управления влияет на процессы другого уровня (§1.1.2).

9. **Менеджмент качества** – деятельность по руководству и управлению предприятием, применительно к качеству [134].

10. **Методология ИППР** на основе [257] – совокупность принципов, методов, моделей, архитектурных решений и практических процедур, предназначенных для

проектирования, разработки и внедрения систем ИППР в предметной области управления качеством на промышленных предприятиях.

11. **Многокритериальный анализ** – совокупность методов для рационального выбора, сравнения и оценки альтернатив, когда необходимо учесть несколько часто противоречащих друг другу целей или критериев одновременно, не сводя решение к одному показателю [216].

12. **Модель предметной области** – система, имитирующая структуру или функционирование исследуемой предметной области и отвечающая основному требованию – быть адекватной этой области [30].

13. **Неопределённость** – отсутствие или недостаток определения или информации о чём-либо [186].

14. **Нетиповые ситуации** – ситуации, связанные с обстоятельствами и рисками, для которых отсутствуют заранее заданные алгоритмы действий (§1.1.2).

15. **Обеспечение качества** (quality assurance) – это часть менеджмента качества, направленная на создание уверенности в выполнении требований [138]. В диссертации под этим термином понимается *комплекс взаимосвязанных практических задач, возникающих на всех стадиях жизненного цикла, для решения которых требуется сбор, анализ и интерпретация данных* (§1.1.1).

16. В рамках исследования понятие **онтология** понимается шире, чем в информатике [195], как формальная, семантически насыщенная, иерархически организованная и логически согласованная модель предметной области, предназначенная для представления, интеграции, интерпретации и актуализации знаний в условиях сложной промышленной системы.

Онтология выступает, не как статический справочник, а как динамическая основа для ИППР, обеспечивающая единое понимание терминов и понятий на разных уровнях управления, семантическую интероперабельность между разнородными системами (ERP, MES, документооборот), объяснимость вывода за счёт прозрачной логической цепочки от ситуации через решение к сценарию, воспроизводимость и согласованность между уровнями и подразделениями, а также механизм самообучения через цифровой след.

17. **Показатель качества** – количественная характеристика свойства объекта, входящего в состав его качества и рассматриваемая применительно к определенным условиям жизненного цикла объекта [44].

18. **Предметная область** – множество всех объектов, явлений и процессов, свойства и отношения между которыми рассматриваются в научной теории [30].

19. **Причинно-следственная связь** (ПСС) – отношение детерминации между причиной и следствием.

20. **Риск** – характеристика ситуации, имеющей неопределённость исхода, при обязательном наличии неблагоприятных последствий [136], либо риск – нежелательная ситуация или обстоятельство, характеризующиеся вероятностью возникновения и потенциально негативными последствиями [132].

21. **Система поддержки принятия решений** (СППР) – автоматизированная информационная система, функционирующая для обеспечения информацией лиц, принимающих решения в сложных условиях для полного и объективного анализа предметной деятельности [239].

22. **Система менеджмента качества** (СМК) – совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих элементов организации для разработки политик, целей и процессов для достижения этих целей [134].

23. **Системная модель (комплекс моделей системы)** – комплекс моделей, которые полно с точки зрения целей исследования описывают предметную область [188].

24. **Ситуационно-онтологический подход** (СОП) – это методологический подход к моделированию и поддержке принятия решений в сложных организационно-технических системах, основанный на интеграции ситуационного и онтологического методов моделирования (§1.3.2).

25. **Ситуация** в работе, в отличие от более широкого общепринятого определения [213], представляет собой формализованный контекст производственной деятельности, в котором возникает необходимость в принятии управленческого решения, связанного с обеспечением качества (§1.1.2).

26. **Таксономия** – это учение о принципах и практике классификации и систематизации [139].

27. **Таксономия организации** – комплексная классификация её информационных ресурсов (выраженных в структурном, функциональном, измерительном, нормативном и т.д. аспектах), как отдельных слоёв [162].

28. **Теоретико-множественная модель** (ТММ) – это способ описания и анализа систем или объектов через понятия теории множеств, где система представляется как совокупность элементов и отношений между ними, выраженная в виде множеств, подмножеств, пересечений и объединений, что позволяет формализовать структуру, свойства и взаимодействия компонентов [196].

29. **Типовые ситуации** – те, для которых существуют заранее разработанные стандартные решения, такие как контроль параметров на конвейере или оформление разрешений на отклонение от конструкторской документации (§1.1.2).

30. **Точка принятия решений** – шаг процесса, на котором принимается решение, соответствует понятию *decision point* (точка решения) в BPMN [70].

31. **Уровни решения** (продукт, процесс, система) – это иерархически организованные слои принятия управленческих и операционных решений, каждый из которых характеризуется собственными целями, ограничениями, шкалами анализа и степенью влияния на производственные результаты (§1.1.1).

32. **Цикл PDCA** – метод управления, построенный на воспроизводстве выполнения следующих стадий управленческой деятельности: планирования, выполнения, контроля и анализа, а также стадии накопления опыта или стандартизации [132].

33. **Экспертная оценка** – оценка исследуемых процессов или явлений путём специальной обработки мнений квалифицированных специалистов, называемых экспертами [159].

Список литературы

1. Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches // Artificial Intelligence Communications. – 1994. – Vol. 7, № 1. – P. 39-59.
2. Afanasyev A., Voit N. Intelligent agent system to analysis manufacturing process models // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 451. – P. 395-403.
3. Ahmed F., Kilic K. Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A performance analysis of various algorithms // Fuzzy Sets and Systems. – 2019. – Vol. 362. – P. 110-128.
4. Aliev R. A., Huseynov O. H. Decision theory with imperfect information // Decision Theory With Imperfect Information. – 2014. – P. 1-444. – DOI 10.1142/9789814611046.
5. Aligning Organizations Through Measurement: The GQM+Strategies Approach / V. Basili, A. Trendowicz [et al.]. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – 203 p.
6. Anand R. Closed-loop AI Key to Transformational Impact [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <https://www.arcweb.com/blog/closed-loop-ai-key-transformational-impact> (дата обращения: 22.02.2025).
7. Artificial intelligence in cancer imaging: Clinical challenges and applications / W. L. Bi, O. Arnaout, I. F. Dunn [et al.] // Ca: a Cancer Journal for Clinicians. – 2019. – Vol. 69, № 2. – P. 127-157. – DOI 10.3322/caac.21552.
8. Baker K. R., Trietsch D. Principles of Sequencing and Scheduling. – Hoboken, NJ: Wiley, 2013. – 506 p. – ISBN 978-1-118-67513-1.
9. Bergmann R. Experience Management: Foundations, Development Methodology, and Internet-Based Applications. – Springer, 2002. – 393 p.
10. Berners-Lee T. Semantic Web Road map [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.w3.org/DesignIssues/Semantic.html> (дата обращения: 18.09.2024).
11. Botu V., Ramprasad R. Adaptive machine learning framework to accelerate ab initio molecular dynamics // International Journal of Quantum Chemistry. – 2015. – Vol. 115, № 16. – P. 1074-1083. – DOI 10.1002/qua.24836.
12. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, № 1. – P. 5–32. – DOI: 10.1023/A:1010933404324.

13. Brockmann E.N., Anthony W.P. Tacit knowledge and strategic decision making // *Group & Organization Management*. – 2016. – Vol. 27, № 4. – P. 436–455.
14. Burstein F., Holsapple W. C. *Handbook on Decision Support Systems 2*. – Springer Berlin, 2008. – 827 p. – DOI 10.1007/978-3-540-48716-6.
15. Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future / H. Panetto, B. Iung, D. Ivanov [et al.] // *Annual Reviews in Control*. – 2019. – Vol. 47. – P. 200-213. – DOI 10.1016/j.arcontrol.2019.02.002.
16. Charu C. Aggarwal. *Neural Networks and Deep Learning: A Textbook* [Электр. ресурс]. – Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. – URL: http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/88552/1/2018_Book_NeuralNetworksAndDeepLearning.pdf (дата обращения: 17.06.2022).
17. Chen Yang, Weiming Shen, Xianbin Wang. The Internet of Things in Manufacturing: Key Issues and Potential Applications // *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*. – 2018. – Vol. 4, № 1. – P. 6–15. – ISSN 2333-942X. – doi:10.1109/msmc.2017.2702391. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/profile/Chen-Yang-151/publication/322563685_The_Internet_of_Things_in_Manufacturing_Key_Issues_and_Potential_Applications/links/5d0459b192851c90043c8cc1/The-Internet-of-Things-in-Manufacturing-Key-Issues-and-Potential-Applications.pdf (accessed 17.06.2022).
18. Cirucci A. M., Pruchniewska U. «A/B Testing» // *Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining*. – 2021. – 26 p. – DOI: 10.4324/9781003181750.
19. Closed-loop separation control using machine learning / N. Gautier, J.-L. Aider, T. Duriez [et al.] // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2015. – Vol. 770. – P. 442 – 457. – DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.95>.
20. Codd E., Salley C. *Providing OLAP to User-Analysts: An IT Mandate*. – Codd & Associates, 1993. – 26 p.
21. Comrie B. *Language Universals And Linguistic Typology*. – University Of Chicago Press, 1989. – 275 p.
22. Crosby P. B. *Quality Is Still Free: Making Quality Certain in Uncertain Times*. – New York: McGraw-Hill, 1996. – 244 p.

23. Decision Making with Uncertainty Using Hesitant Fuzzy Sets / S. Faizi, T. Rashid, W. Sałabun [et al.] // International Journal of Fuzzy Systems. – 2018. – Vol. 20, № 1. – P. 93-103.
24. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications / J. Wang, Y. Ma, L. Zhang [et al.] // Journal of Manufacturing Systems. – 2018. – Vol. 48. – P. 144-156.
25. Defining N-ary Relations on the Semantic Web / N. Noy, A. Rector [et al.] [Электронный ресурс] // W3C Working Group Note. – 2006. – URL: <https://www.w3.org/2006/05/N-aryRelationInSWRus.html> (дата обращения: 28.02.2025).
26. Designing rule-based expert systems with the aid of the model-driven development approach / A.Y. Yurin, N.O. Dorodnykh, O.A. Nikolaychuk [et al.] // Expert Systems. – 2018. – Vol. 35, № 1. – P. 1-23.
27. Digital Footprint of Neurological Surgeons / C. Kim, R. Gupta, A. Shah [et al.] // World Neurosurg. – 2018. – Vol. 113. – P. e172-e178. – doi: 10.1016/j.wneu.2018.01.210. – PMID: 29427816.
28. Duan Y., Edwards J.S., Dwivedi Y.K. Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data – evolution, challenges and research agenda // International Journal of Information Management. – 2019. – Vol. 48. – P. 63-71.
29. Feigenbaum E. Some challenges and grand challenges for computational intelligence // International Journal of Human-Computer Studies. – 2003. – № 58(1). – P. 3-21.
30. Fowler M. Patterns of Enterprise Application Architecture. – Boston: Addison-Wesley, 2002. – 533 p. – ISBN 978-0321127426.
31. Friedman J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine // Annals of Statistics. – 1999. – Vol. 29, № 5. – P. 1189–1232. – DOI: 10.1214/aos/1013203451.
32. Giarratano J., Riley G. Expert Systems: Principles and Programming. – 4th ed. – Boston: PWS Publishing Company, 2005. – 1152 p.
33. Götz M., Jankowska B. Adoption of Industry 4.0 Technologies and Company Competitiveness: Case Studies from a Post-Transition Economy // Foresight and STI Governance. – 2020. – Vol. 14, № 4. – P. 61–78.
34. Grekul V., Korovkina N., Korneva K. Decision making in ITSM processes risk assessment // Computer Modelling New Technologies. – 2015. – Vol. 19, № 5C. – P. 12-16.

35. Gruber T.R. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing // International Journal of Human-Computer Studies. – 1995. – Vol. 43, № 5-6. – P. 907–928. – DOI: 10.1006/ijhc.1995.1081.

36. Hohpe G., Woolf B. Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions. – 2nd ed. – Boston: Addison-Wesley, 2023. – 736 p. – ISBN 978-0-321-20068-6.

37. Hopfield J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // Proc. Natl Acad. Sci. USA. – Vol. 79. – P. 2554-2558.

38. Hulten G. Closed-Loop Intelligence: A Design Pattern for Machine Learning [Электронный ресурс] // MSDN Magazine. – 2019. – Vol. 34, № 4. – URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/archive/msdn-magazine/2019/april/machine-learning-closed-loop-intelligence-a-design-pattern-for-machine-learning> (дата обращения: 12.02.2024).

39. Human-level control through deep reinforcement learning / V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver [et al.] // Nature. – 2015. – Vol. 518, № 7540. – P. 529–533. – DOI: 10.1038/nature14236.

40. IBM SPSS software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ibm.com/spss> (дата обращения: 17.05.2025).

41. Intelligent Organization Management by Means of Categorizing Resources, Processes and Goals / G. Kulikov, V. Antonov, K. Konev // Proceedings of the VIth International Workshop «Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security» (IWCI 2019). – Irkutsk, 2019. – ISBN 978-94-6252-787-4. – DOI 10.2991/iwci-19.2019.20.

42. ISO Survey 2023: Динамика сертификации систем менеджмента [Электронный ресурс]. – URL: https://vk.com/@ria_stk-iso-survey-2023-dinamika-sertifikacii-sistem-menedzhmenta (дата обращения: 25.02.2025).

43. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1993. – Vol. 23, № 3. – P. 665–685. – DOI: 10.1109/21.256541.

44. Juran J. M., Godfrey A. B. Juran's Quality Handbook. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill, 2010. – 912 p. – ISBN 978-0071629737.

45. KBSI. IDEF5 Overview [Электронный ресурс]. – 2006. – URL: <http://www.idef.com/IDEF5.htm> (дата обращения: 15.01.2022).
46. Kim A.V. Introduction to the theory of positional differential games of systems with aftereffect (based on the i-smooth analysis methodology) // Russian Universities Reports. Mathematics. – 2024. – Vol. 29, № 147. – P. 268-295. – doi: 10.20310/2686-9667-2024-29-147-268-295.
47. Kohonen T. Self-Organizing Maps. – 3rd ed. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 501 p.
48. Konev K. The management of Socio-Economic System based on Situational and Ontological models // DSPTech'2015, Ufa, 2015. – P. 180-185.
49. Korenevskiy N. A. Application of fuzzy logic for decision-making in medical expert systems // Biomedical Engineering. – 2015. – Vol. 49, № 1. – P. 33-35. – DOI 10.1007/s10527-015-9494-X.
50. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2012. – Vol. 25. – P. 1097–1105.
51. Lawrie G. J. G., Abdullah N. A. Multi-level strategic alignment within a complex organization // Journal of Modelling in Management. – 2016. – Vol. 11, № 4. – P. 889-910. – DOI:10.1108/JM2-11-2014-0085.
52. LeCun Y. Comment les machines apprennent: la révolution des réseaux neuronaux et de l'apprentissage profond. – Paris: Éditions Odile Jacob, 2018. – 346 p. – ISBN 978-2-7381-4116-9.
53. Lehman J. F. Adaptive Parsing: Self-Extending Natural Language Interfaces. – Springer Science & Business Media, 2012. – ISBN 978-1-4615-3622-2.
54. LSTM: A Search Space Odyssey / K. Greff, R.K. Srivastava, J. Koutník [et al.] // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2015. – Vol. 28, № 10. – P. 2222–2232. – DOI: 10.1109/TNNLS.2016.2582924.
55. Marakas G. M. Decision support systems in the twenty-first century. – Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1999.
56. McKinney W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython. – 2nd ed. – O'Reilly Media, 2017. – 724 p. – ISBN 9781449319793.

57. Methods of fuzzy set theory in the purpose of expansion of the value chains based on the main factors of corporate culture / L. A. Tselykh, E. A. Panfilova, O. S. Prichina [et al.] // *Mediterranean Journal of Social Sciences*. – 2015. – Vol. 6, № 5 S3. – P. 249-258.
58. Michalewicz Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. – Springer Berlin Heidelberg, 1996. – 55 p.
59. Montgomery D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. – 8th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2019. – 768 p. – ISBN 978-1119657118.
60. Negri E. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems // *Procedia Manufacturing*. – Vol. 11. – P. 939–948. – doi:10.1016/j.promfg.2017.07.198. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917304067/pdf?md5=2da66049431a78086d604d837c9feddb&pid=1-s2.0-S2351978917304067-main.pdf> (дата обращения: 17.06.2022).
61. Neuendorf K.A. *The Content Analysis Guidebook*. – 2nd ed. – Los Angeles: SAGE Publications, 2016. – 456 p. – ISBN 9781412979474.
62. Nguyen T. T. Z. A new Gaussian Takagi-Sugeno-Kang fuzzy inference system with principal component weight // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2024. – Vol. 12, № 5. – P. 116–124.
63. OWL Web Ontology Language. Overview [Электронный ресурс] // W3C Recommendation. – 2009. – URL: <http://www.w3.org/TR/owl-features/> (дата обращения: 28.02.2025).
64. Paired patterns in logical analysis of data for decision support in recognition / I.S. Masich, V.S. Tyncheko, V.A. Nelyub [et al.] // *Computation*. – 2022. – Vol. 10, № 10. – P. 185.
65. Pinedo M. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. – 6th ed. – Cham: Springer, 2022. – 670 p. – ISBN 978-3-031-05920-2.
66. Piryonesi M. S., El-Diraby T. E. Role of Data Analytics in Infrastructure Asset Management: Overcoming Data Size and Quality Problems // *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. – 2020. – Vol. 146, iss. 2. – P. 04020022. – ISSN 2573-5438. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/profile/S_Madeh_Piryonesi2/publication/341797131_Role_of_Data_Analytics_in_Infrastructure_Asset_Management_Overcoming_Data_Size_and_Quality_Problems/links/5fb1535d45

851518fda747be/Role-of-Data-Analytics-in-Infrastructure-Asset-Management-Overcoming-Data-Size-and-Quality-Problems.pdf (дата обращения: 17.06.2022).

67. Power BI. Create a data-driven culture with BI for all [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.microsoft.com/en-us/power-platform/products/power-bi> (дата обращения: 28.02.2025).

68. Power D. J. Decision Support Systems: A Historical Overview // Handbook on Decision Support Systems 1. – 2008. – P. 121-140. – DOI:10.1007/978-3-540-48713-5_7.

69. Prikshat V., Malik A., Budhwar P. AI-augmented HRM: Antecedents, assimilation and multilevel consequences // Human Resource Management Review. – 2021. – P. 100860.

70. Silver B. BPMN Method and Style: A levels-based methodology for BPM process modeling and improvement using BPMN 2.0. – Cody-Cassidy, 2009.

71. Singhal A. Adaptive machine learning [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <https://medium.com/analytics-vidhya/adaptive-machine-learning-f4fba2f50bc1> (дата обращения: 22.02.2025).

72. Sinonquel P., Bisschops R. Striving for quality improvement: can artificial intelligence help? // Best Practice & Research Clinical Gastroenterology. – 2021. – P. 101722.

73. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions / H. S. Kang, S. Choi, S. D. Noh [et al.] // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology. – 2016. – Vol. 3, № 1. – P. 111-128. – DOI 10.1007/s40684-016-0015-5.

74. Smart Textile-Integrated Microelectronic Systems for Wearable Applications / J. Shi, S. Liu, L. Zhang [et al.] // Advanced Materials. – 2020. – Vol. 32, № 5. – P. 1901958. – DOI 10.1002/adma.201901958.

75. Snow D. Machine Learning and Data Science Applications in Industry [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/firmai/industry-machine-learning> (дата обращения: 19.06.2022).

76. Sowa J.F., Zachman J. A. Extending and Formalizing the Framework for Information Systems Architecture // IBM Systems Journal. – 1992. – Vol. 31, № 3.

77. Sweigart A. Automate the Boring Stuff with Python: Practical Programming for Total Beginners. – No Starch Press, 2015. – 504 p. – ISBN 1593275994.

78. Tabakov M., Chlopowiec A. B., Chlopowiec A. R. Takagi–Sugene Inference System for Classification Based on Type-2 Fuzzy Sets // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, № 9. – DOI:10.3390/app13095279.

79. The Development of Ontologies to Support the Decisions in Production Systems Management / N. Yusupova, O. Smetanina, A. Agadullina [et al.] // *Proc. 2017 Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)*. – IEEE Xplore Digital Library, 2017. – P. 188–193.

80. TOGAF Skills Framework [Электронный ресурс] // The Open Group. – URL: <https://www.opengroup.org/togaf> (дата обращения: 16.08.2024).

81. Turban E., Aronson J.E., Liang T.-P. *Decision Support Systems and Intelligent Systems*. – 2008. – 574 p.

82. Vrugt J. A. Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation // *Environmental Modelling & Software*. – 2016. – Vol. 75. – P. 273–316. – DOI 10.1016/j.envsoft.2015.08.013. – EDN VFZVPR.

83. Wan S., Zhong L., Dong J. A new method for group decision making with hesitant fuzzy preference relations based on multiplicative consistency // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2020. – Vol. 28, № 7. – P. 1449–1463.

84. Wang J., Ma Q., Liu H.-C. A meta-evaluation model on science and technology project review experts using IVIF-BWM and MULTIMOORA // *Expert Systems with Applications*. – 2021. – Vol. 168. – P. 236–248.

85. Zachman J. A Framework for Information Systems Architecture // *IBM Systems Journal*. – 1987. – Vol. 26, № 3.

86. Zappi C. R. Principale Blocco allo Sviluppo del Machine Learning Sono le Persone [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <https://orgoglionerd.it/il-principale-blocco-allo-sviluppo-del-machine-learning-sono-le-persone/> (дата обращения: 25.09.2023).

87. Zhang K., Hyvärinen A. On the Identifiability of the Post-Nonlinear Causal Model // *Proceedings of the 25th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. – 2009. – P. 647–655.

88. Zhu F. et al. A Classification Algorithm of CART Decision Tree based on MapReduce Attribute Weights // *International Journal of Performability Engineering*. – 2018. – Vol. 14, № 1. – P. 17–25.

89. Zou J., Petrosian O. Explainable AI: Using Shapley Value to Explain Complex Anomaly Detection ML-based Systems // *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. – 2020. – Vol. 332. – P. 152-164.

90. Адлер Ю. П. Бывает ли контроль лишним? / Ю. П. Адлер // *Контроль качества продукции*. – 2020. – № 12. – С. 56–60.

91. Адлер Ю. П., Шпер В. Л. Статистическое управление процессами. Statistical Process Control (SPC). Практическое руководство по разведочному анализу данных. – М.: МИСИС, 2020. – 386 с.

92. Аксенов К. А., Гончарова Н. В., Аксенова О. П. Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах. Часть 1. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 104 с.

93. Аксенов А. З., Фаткин В. А. Процессный подход – инструмент совершенствования системы технического обслуживания // *Технический сервис машин*. – 2018. – Т. 133. – С. 75-81. – EDN VRSZNA.

94. Антонов В. В., Конев К. А. Система поддержки принятия решений для бизнес-процесса внутреннего аудита качества предприятия // *Онтология проектирования*. – 2022. – Т.12, №1(43). – С. 106-116.

95. Антонов, В. В., Конев К. А., Куликов Г. Г., Суворова В. А. Ситуационно-онтологическая методология принятия решений на примере бизнес-процессов авиаприборостроительного предприятия // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2021. – Т. 21. № 1. – С. 102-115. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/ctcr210110>

96. Антонов В. В., Конев К. А. Усовершенствование ситуационной методологии разработки систем поддержки принятия решений для предприятий // *Онтология проектирования*. – 2022. – Т. 12, № 4(46). – С. 547-561. – DOI 10.18287/2223-9537-2022-12-4-547-561. – EDN UVKUWM.

97. Антонов, В. В., Конев К. А. Интеллектуальный метод поддержки принятия решений в типовой ситуации // *Онтология проектирования*. – 2021. – Т.11, №1(39). – С.126-136. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-126-136

98. Антонов, В. В., Конев К. А., Куликов Г. Г. Трансформация модели системы поддержки принятия решений для типовых ситуаций с применением

интеллектуальных и аналитических методов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 14–25.

99. Афопискин А. И., Михаленко Д. Г. Управленческие решения в экономических системах. – СПб.: Питер, 2009. – 480 с.

100. Балашов О. В., Лосева В. А. Генерация управляющих решений в системах поддержки принятия решений с помощью механизмов ситуационного управления // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2018. – Т. 3, № 2 (8). – С. 17-25.

101. Барский А. Б. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. – М.: Русайнс, 2022. – 186 с. – ISBN 978-5-4365-8166-8. – EDN MPYSIA.

102. Бахтизин А. Р. Агент-ориентированные модели экономики. – М.: Экономика, 2008. – 279 с.

103. Башина О. Э., Дик В. В., Уринцов А. И. Онтология взглядов на этапы развития систем поддержки принятия решений в рамках перехода к информационному обществу // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. – 2014. – № 1. – С. 175-183.

104. Петренко Е. С. «Пять почему?» – метод анализа проблем качества // Стандарты и качество. – 2012. – № 7. – С. 60-63. – EDN PBIMMB.

105. Белоусов Р. Л., Дрожжин Н. А., Костенчук М. И. Построение нечётких лингвистических переменных с использованием методов кластерного анализа данных // Прикладная информатика. – 2015. – Т. 10, № 1(55). – С. 98-105. – EDN TJZIGH.

106. Берштейн Л. С., Боженюк А. В. Нечёткие модели принятия решений: дедукция, индукция, аналогия. – Таганрог: Таганрогский государственный радиотехнический университет, 2001. – 110 с. – ISBN 5-8327-0078-3.

107. Бессмертный И. А. Семантическая паутина и искусственный интеллект // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2009. – № 6 (64). – С. 77–83.

108. Бирюков, Д. Н., Ломако А. Г. Денотационная семантика контекстов знаний при онтологическом моделировании предметных областей конфликта // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 5(42). – С. 155-179. – EDN ULHDMB.

109. Бобровников А. Э. Введение в управление проектами внедрения ERP-систем, – М.: ООО «1С-Паблишинг», – 2021. – 320 с. ISBN978-5-9677-2941-6
110. Богуславский, И. М., Диконов В. Г., Тимошенко С. П. Онтология для поддержки задач извлечения смысла из текста на естественном языке // Информационные технологии и системы. – 2012. – С. 152-161.
111. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и анализ данных / Е. И. Большакова, К. В. Воронцов, Н. Э. Ефремова [и др.]. – М.: НИУ ВШЭ, 2017. – 269 с. – ISBN 978-5-9909752-1-7. – EDN VSCJGB.
112. Боргардт, Е. А., Бобель Д. Н. Технологии искусственного интеллекта в системе управления качеством // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2021. – № 8-1(59). – С. 178-180. – DOI 10.24412/2500-1000-2021-8-1-178-180.
113. Боргест Н. М. Научный базис онтологии проектирования // Онтология проектирования. – 2013. – № 1(7). – С. 7-25. – EDN QARMUT.
114. Брокманн, Э. Н., Энтони В. П. Неявные знания и принятие стратегических решений // Управление группами и организациями. – 2016. – Т. 27 (4). – С. 436–455.
115. Бутакова М. М. Методы экономического прогнозирования. – М.: Русайнс, 2019. – 176 с.
116. Варшавский П. Р., Кхаинг З. Л., Алехин Р. В. [и др.] Реализация прецедентного модуля для интеллектуальных систем // Программные продукты и системы. – 2015. – № 2. – С. 26-31. – EDN UCRAWX.
117. Варшавский П. Р., Алехин Р. В., Кожевников А. В. Разработка прецедентного модуля для идентификации сигналов при акустико-эмиссионном мониторинге сложных технических объектов // Программные продукты и системы. – 2019. – № 2. – С. 207-213. – EDN FLZTAA.
118. Варшавский П. Р., Еремеев А. П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – №1. – С.45-57.
119. Васильев В. И. Интеллектуальные системы защиты информации / В. И. Васильев. – М.: Машиностроение, 2012. – 171 с.

120. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.
121. Виттих В. А., Ситников П. В., Смирнов С. В. Онтологический подход к построению информационно-логических моделей в процессах управления социальными системами // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 5(59). – С. 45-53. – EDN KWSFVD.
122. Воробьев Л. А., Казакевич Л. А. и др. Управленческие ситуации: классификация и стратегии разрешения // Известия Академии аграрных наук Республики Беларусь, – 2000, – № 3. – С. 7 – 12.
123. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
124. Галяшина, Е. И. Защита от злоупотребления искусственным интеллектом и нейротехнологиями в аспекте медиабезопасности / Е. И. Галяшина, Е. А. Антонян, К. М. Богатырев. – М.: Общество с ограниченной ответственностью "Перспект", 2025. – 272 с.
125. Гаранина Н. О., Ануреев И. С., Боровикова О. И., Зюбин В. Е. Методы специализации онтологии процессов, ориентированной на верификацию // Моделирование и анализ информационных систем, – 2019, – 26(4): – С. 534-549. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2019-4-534-549>.
126. Гвоздев В. Е., Хомский Н. В., Черняховская Л. Р. Моделирование ситуационного управления качеством производства аппаратно-программного комплекса на основе инженерии знаний // Вестник научных конференций. – 2021. – № 9-3(73). – С. 41-49. – EDN WCYDAL.
127. Геловани В.А., Башлыков А.А., Бритков В.Б., Вязилов Е.Д. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений во внештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 304 с.
128. Гличев А. В. Основы управления качеством продукции. – М.: Стандарты и качество, 2001. – 424 с.
129. Голуб И. А., Черемухина Ю. Ю. Анализ результатов приемо-сдаточных испытаний // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 5(131). – С. 202-205.

130. ГОСТ Р 52745 – 2021. Комплексная система контроля качества. Оценка соответствия материалов, полуфабрикатов и иной продукции, используемых при изготовлении изделий авиационной и иной техники гражданского, оборонного и двойного применения, на предприятиях-поставщиках. Общие требования. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 18 с.
131. ГОСТ Р 55753 – 2013. Комплексная система контроля качества изделия электронной техники. Требования к обеспечению и контролю качества. – М.: Стандартиформ, 2014. – 9 с.
132. ГОСТ Р ЕН 9100-2011 Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования. – М.: Стандартиформ, 2012. – 23 с.
133. ГОСТ Р ИСО 19011-2021. Оценка соответствия. Руководящие указания по проведению аудита систем менеджмента. – М.: Стандартиформ, 2021. – 49 с.
134. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Система менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартиформ, 2019.
135. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Система менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартиформ, 2015. – 24 с.
136. ГОСТ Р ИСО/МЭК 30010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска». – М.: Стандартиформ, 2012 – 71 с.
137. Губанова А. В. Цифровое лидерство как инструмент управления в цифровой экономике // Экономические системы. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 69-78. – DOI 10.29030/2309-2076-2021-14-4-69-78. – EDN RVSNDU.
138. Деминг Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами [пер. с англ.] – 5-е изд. – М.: Альпина Паблишер, 2012. – 419 с.
139. Шаталкин А. И. Таксономия. Основания, принципы и правила. – М.: Товарищество науч. изданий КМК, 2012. – 600 с. – ISBN 978-5-87317-847-6. – EDN NDLLZB.
140. Добров Б. В., Иванов В. В., Лукашевич Н. В., Соловьев В. Д. Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 173 с.

141. Дудаков А. С., Турсунов Т. Р., Филимонов Н. Б. Метод глубокого обучения с подкреплением в задачах маршрутизации движения мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 7–13.

142. Еремеев А. П., Варшавский П. Р., Куриленко И. Е. Моделирование временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов // International Journal «Information technologies and knowledge», Vol. 6, № 3, 2012, С. 227-239.

143. Жаринов И. О. Управление бизнес-процессами на фабриках индустрии 4.0 // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2021. – № 4(130). – С. 93-98.

144. Затонский А. В., Федосеева К. А., Некрасов Д. И. Разработка и настройка алгоритма программной идентификации отклонений в пенном слое калийной флотомашин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 42–56.

145. Зоидов К. Х., Урунов А. А., Акромов Б. А. Искусственный интеллект: возможности применения для контроля качества готовой продукции в текстильной промышленности // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2021. – № 2(124). – С. 12-22. – DOI 10.26726/1812-7096-2021-2-12-22.

146. Зубарев А. Опыт внедрения систем распознавания объектов в крупной промышленности на опасных производствах [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/377982247_Opyt_vnedrenia_sistem_raspoznavania_obektov_v_kрупnoj_promyslennosti_na_opasnyh_proizvodstvah (дата обращения: 2024-03-02).

147. Ильясов, Б. Г., Миронов В. В., Юсупова Н. И. Модели критических ситуаций при управлении техническими объектами: Препринт. – Уфа: УНЦ РАН, 1996.

148. Ильясов Б. Г., Миронов В. В., Юсупова Н. И. Модели предупреждения критических режимов управляемых объектов в условиях неопределенности: Препринт. – Уфа: УНЦ РАН, 1994. – 52 с.

149. Интеллектуальное ядро системы поддержки принятия решений / В.П. Осипов и др. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2018, – № 205. – 23 с.
150. Интеллектуальный анализ данных в управлении производственными системами (подходы и методы) / Л. А. Мыльников, Б. Краузе, М. Кютц, К. Баде, И. А. Шмидт. – М.: БИБЛИО-ГЛОБУС, 2017. – 334 с.
151. Кузьмин А. М. Диаграмма Исикавы // Методы менеджмента качества. – 2006. – № 3. – С. 27. – EDN VSVERD.
152. Искусственный интеллект в России в 2023 году: тренды и перспективы // ICT.Moscow. 2023. URL: <https://ict.moscow/projects/ai/research/iskusstvennyi-intellekt-v-rossii-v-2023-godu-trendy-i-perspektivy/> (дата обращения: 10.07.2025).
153. Кадиров Р. М. Преимущества внедрения системы энергоменеджмента на основе стандарта ISO 50001:2011 // Методы менеджмента качества – 2018. – №5 – С.35-41
154. Каплан Р., Нортон Р., Система сбалансированных показателей. От стратегии к действию. Пер. с англ. – М.: Олимп-Бизнес, 2003. – 438 с.
155. Капыш А. С. Интеллектуальная система поддержки принятия решений на основе рассуждений по прецедентам: на примере задачи управления водохозяйственной системой: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.13.01 / Капыш Александр Сергеевич; [Место защиты: Волгогр. гос. техн. ун-т]. – Волгоград, 2011. – 238 с.
156. Кельчевская Н. Р. Интеллектуализация управления как основа эффективного развития предприятия. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. – 146 с.
157. Ключникова Е. В., Шитова Е. М. Методические подходы к расчету интегрального показателя, методы ранжирования // ИнноЦентр. – 2016. – № 1(10). – С. 4-18.
158. Ковригин Е. А., Васильев В. А. Проблемы готовности системы менеджмента качества к интеграции современных цифровых технологий // Качество. Инновации. Образование. – 2020. – № 5(169). – С. 17-23. – DOI 10.31145/1999-513x-2020-5-17-23. – EDN DDFNJA.

159. Козлова К. А., Герасимец О. И. Экспертные методы принятия решений: основные методы экспертных оценок // Вестник магистратуры. – 2018. – № 2-1 (77). С. 25-26.
160. Конев К. А. Интегрированная система менеджмента качества и принятие решений // Менеджмент качества. – № 3, – 2017. – С. 230-240.
161. Конев К. А. Использование методов машинного обучения в задачах принятия решений при обеспечении качества в приборостроении // Экономика. Информатика. – 2022. – Т. 49. – № 4. – С. 820-832. – DOI10.52575/2687-0932-2022-49-4-820-832
162. Конев К. А. Концептуальная модель автоматизации предприятия авиационного приборостроения на основе актуализируемой многослойной таксономии // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. № 5. – С. 70-77.
163. Конев К. А. Объективная и полная квалиметрия как инструмент менеджмента качества // Методы менеджмента качества. – 2014. – № 12. – С. 32-39.
164. Конев К. А. Онтологическая концепция решения задач в прикладных научных исследованиях // Информатизация образования и науки. – 2016. – № 1 (29). – С. 147-155.
165. Конев К. А. Повышение результативности принятия решений при устранении несоответствий и их причин // Методы менеджмента качества. – 2016. – № 11. – С. 34–40.
166. Конев К. А. Подходы к управлению качеством при создании корпоративных университетов // Методы менеджмента качества. – 2013. – № 11. – С. 34-37.
167. Конев К. А. Принятие решений в сложных социально-экономических системах // Методы менеджмента качества. – 2018. – № 1. – С. 30-36.
168. Конев К. А., Старцев Г. В. Интегрированная система рейтинговой оценки качества образования // Вестник УГАТУ – 2009. – Т 12, № 1(30). – С. 96-102.
169. Конев К. А. Формирование квалиметрической модели дисциплины // Труды Международной научно-практической конференции – ИНФОРИНО-2016. – 2016. – С. 588-591.

170. Конев К. А., Шакирова Г. Р., Суворова В. А., Попкова Е. Е., Томшин Я. С. Метаситуационные модели в задачах поддержки принятия решений: концепция, архитектура, метод // ITIDS+RRS'2014. – Уфа, 2014. – С. 108-114.
171. Конев К. А., Юнусова Э. А., Конева М. Б. Подход к автоматизированному оцениванию в деканате возможности трудоустройства выпускников // Молодёжный вестник УГАТУ. – 2013. – № 1 (6). – С 80-87.
172. Конев К. А. Поддержка принятия решений в сфере обеспечения качества с использованием цифрового анализа данных // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2022. – № 4. – С. 74-86. – DOI 10.17308/sait/1995-5499/2022/4/74-86.
173. Конев К. А., Шакирова Г. Р. Применение метаситуационного моделирования для описания социально-экономических процессов в сфере образования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 3 (91) – С. 163-171.
174. Конев К. А., Шакирова Г. Р. Метаситуационное моделирование поддержки принимаемых решений // Информатизация образования и науки, – 2014. – № 4 (24). – С. 137 – 150.
175. Конев К. А., Антонов В. В., Ризванов Д. А., Селиванов С. Г., Бакусова Н. С. Основы концепции онтологического моделирования бизнес-процессов для задач принятия решений // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 12-1. – С. 71-77.
176. Конев К. А. Принятие решений на основе онтологической модели учебной дисциплины // Информатизация образования и науки. – 2020. – № 4 (48). – С. 124-134.
177. Коренев Г. В. Цель и приспособляемость движения. – М.: Наука, 1974. – 528 с.
178. Корневский Н. А. Использование нечёткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. – 2015. – № 1(289). – С. 33-35.
179. Косаревская А. В. Квалиметрическая оценка управленческих решений в системе менеджмента качества: диссертация на соискание учёной степени кандидата

технических наук: 05.02.23 / Косаревская Анастасия Владимировна; [Место защиты: Тул. гос. ун-т]. – Тула, 2010. – 141 с.

180. Коэльо Л., Ричарт В. Построение систем машинного обучения на языке Python; пер. с англ. А. А. Слинкина. – 3-е изд., – М.: ДМК Пресс, 2023. – 304 с. ISBN 978-5-89818-331-8

181. Криворучко В. В. Бритва Оккама в научно-технической политике // Наука. Инновации. Образование. – 2016. – Т. 11. – № 3. – С. 27-44.

182. Кружилина Т. В. К вопросу о моделировании процесса понимания текста с помощью систем искусственного интеллекта // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2023. – Т. 27, № 4. – С. 98-116. – DOI 10.21869/2223-1560-2023-27-4-98-116. – EDN UBZXAL.

183. Крышкин О. В. Настольная книга по внутреннему аудиту. Риски и бизнес-процессы. – М.: Альпина Пабlishер, 2018. – 478 с.

184. Кудряшова Э. Е. Методы и модели проектирования информационных систем. Монография. – М.: Академия естествознания, 2009. – 128 с.

185. Кузнецов А. Н., Новрузлу Э. А., Старостенко С. В. Роль факторного анализа в исследовании эффективности работы предприятия // Стратегии бизнеса. – 2014. – № 2(4). – С. 10-12.

186. Кузьмин Е. А. Неопределенность и определенность в управлении организационно-экономическими системами. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2012. – 184 с.

187. Куликов Г. Г., Антонов В. В., Конев К. А. Кластерный подход к разработке программного обеспечения информационной системы с использованием фрактальной методологии // Сборник трудов VI Всероссийской конференции (ITIDS'2018), 2018. – С. 100-106.

188. Куликов Г. Г., Конев К. А. Методология управления машиностроительным предприятием на основе интеграции его бизнес-процессов // Вестник УГАТУ. – 2006. – Т. 7, № 2. – С. 82-91.

189. Куликов Г.Г., Конев К.А., Суворова В.А., Старцев Г.В. Системная модель автоматизации управления кафедрой на основе квалиметрических показателей. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 160 с.

190. Куликов Г. Г., Конев К. А., Суворова В. А. Теория систем и системный анализ: учеб. Пособие. – Уфа: УГАТУ, 2012. – 159 с.
191. Куликов Г. Г., Сапожников А. Ю., Кузнецов А. А., Маврина А. С. Методология проектирования системных моделей рабочих процессов с применением предметно-ориентированных метаязыков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 45–55. DOI: 10.14529/ctcr200205
192. Куликов, Г. Г., Сапожников А. Ю., Кузнецов А. А. и др. Подход к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования INDUSTRY 4.0 (на примере создания единого информационного пространства «вуз – предприятие») // Вестник УГАТУ. – 2019. – Т. 23, № 4 (86). – С. 154–160.
193. Обзор приложений логико-эвристических методов решения комбинаторных задач высокой сложности / В. И. Мартыанов, В. В. Архипов, М. Д. Каташевцев, Д. В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 4(28). – С. 205-211. – EDN NRBKXP.
194. Лапко А.В. Многоуровневые непараметрические системы обработки информации: монография / А. В. Лапко, В. А. Лапко; Российская акад. наук, Сибирское отд-ние, Ин-т вычислительного моделирования. – Красноярск: Сибирский гос. аэрокосмический ун-т, 2013. – 268 с.
195. Лапшин В. А. Онтологии в компьютерных системах. – М.: Научный мир, 2020. – 224 с.
196. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2002. – 392 с.
197. Левенцов А.Н., Левенцов В.А., Ходырев В.В. Качество и цифровая трансформация // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 5-2. – С. 302-305. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.40043>
198. Левченко Е. В. Влияние цифровизации на развитие системы менеджмента качества // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2018. – № 4(73). – С. 9-14.
199. Метод по совершенствованию информационно- аналитической работы на основе комплексирования результатов распознавания состояний объектов

контроля с использованием методов машинного обучения / А. В. Панков, А. М. Крибель, О. С. Лаута, Н. А. Васильев // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 27-35. – DOI 10.36724/2409-5419-2022-14-2-27-35. – EDN AFFQVG.

200. Максимов В. И., Корноушенко Е.К. Когнитивное моделирование в системах управления. – М.: Институт проблем управления РАН, 2020. – 198 с. – ISBN 978-5-91450-234-1.

201. Малышев Н. Г., Берштейн Л. С., Боженюк А. В. Нечёткие модели для экспертных систем в САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с. – ISBN 5-283-01592-0

202. Мальчукова Н. Н., Басуматорова Е. А. Актуальность проблемы разработки современных методов управления термической обработкой и контроля качества продукции // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 12. – С. 502-504. – EDN DCAXTZ.

203. Массель Л. В., Ворожцова Т. Н., Пяткова Н. И. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7. – № 1(23). – С. 66-76. – DOI 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.

204. Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой: моногр. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1990. – 272 с.

205. Методологические основы разработки нейросетевых моделей экономических объектов в условиях неопределенности / С. А. Горбатков, Д. В. Полупанов, Е. Ю. Макеева, А. Н. Бирюков. – М.: Издательский дом «Экономическая газета», 2012. – 494 с. – ISBN 978-5-905735-36-3. – EDN QVIWRP.

206. Миронов В. В., Конев К. А., Шакирова Г. Р. Ситуационный подход к управлению: истоки и перспективы // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – № 4.2. – С. 111–118.

207. Миронов В. В., Юсупова Н. И., Шакирова Г. Р. Ситуационно-ориентированные базы данных: концепция, архитектура, xml-реализация // Вестник УГАТУ. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2010. – Т. 14, № 2. – С. 233–244.

208. Можаяев О. А. Развёртывание работ по созданию роботизированных органов по оценке соответствия СМК и продукции цифровых предприятий – исполнителей и участников ГОЗ // Информатизация и связь. – 2021. – № 6. – С. 79-86. – DOI 10.34219/2078-8320-2021-12-6-79-86.

209. Муртазина, М. Ш. Интеллектуальная поддержка принятия решений в области инженерии требований на основе онтологических моделей представления знаний: диссертация кандидата технических наук: 05.13.10 / Муртазина М. Ш. – Новосибирск, 2019. – 227 с.

210. Нагимова А. М. Эффективность деятельности государственных органов управления как фактор повышения качества жизни в регионе: проблемы оценки и измерения. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – 188 с.

211. Нив Г. Пространство доктора Деминга. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 370 с.

212. Остроух А. В. Интеллектуальные системы. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. – 110 с.

213. Осипов Г. С. От ситуационного управления к прикладной семиотике // Новости искусственного интеллекта. – 2002. – № 6. – С. 3-7. – EDN AYZIQB.

214. Пашеева Т. Ю., Попов Л. В. Технический контроль как один из способов управления качеством судоремонта // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 232-243. – DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-2-232-243. – EDN UFSVJB.

215. Перепелкин Е. А. Инвариантность оценки состояния конечной цепи Маркова с дискретным временем // Автометрия. – 2021. – Т. 57. – № 6. – С. 76-81. – DOI 10.15372/AUT20210608.

216. Миронов А. Н., Лисицкий В. В. Метод многокритериальной нелинейной оптимизации сложных организационно-технических систем на основе минимизации невязок в условиях временных ограничений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 9. – С. 330-343. – EDN SRWZIK.

217. Попов К. А., Стручкова Г. П., Капитонова Т. А., Слепцов О. И. Использование системы поддержки принятия решений для безопасности подземного магистрального трубопровода, проложенного в криолитозоне // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 11-1. – С. 119-122.

218. Потапов А. С. Искусственный интеллект и универсальное мышление. М.: Политехника, 2012. – 711 с.
219. Прангишвили И. В. Системный подход и общесистемные закономерности. Серия «Системы и проблемы управления». – М.: Синергетика, 2000. – 528 с.
220. Распопов Е.В., Погорелов Г.И., Конев К.А., Куликов Г.Г. Управление предприятием с применением системной модели. // Методы менеджмента качества. – 2006. – № 2. – С. 26–30.
221. Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2008. – 408 с. – ISBN 978-5-94938-063-5.
222. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
223. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. – М.: ЛКИ, 2008. – 360 с.
224. Сафиуллина Р. Т. Многофакторная модель анализа и прогнозирования уровня неопределенности // Проблемы современной экономики. – 2008. – № 4 (28). – С. 106-112.
225. Семенов В. П., Михайлов Ю. И. Проблемы и направления развития менеджмента качества в условиях индустриально-сырьевой экономики // Записки Горного института. – 2017. – Т. 226. – С. 497. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.497.
226. Семенова В. А., Смирнов С. В. Модели и методы онтологического анализа данных в задаче структурного анализа и синтеза технических решений // Онтология проектирования. – 2023. – Т. 13, № 4 (50). – С. 531–547.
227. Семикаленова А. И. Цифровые следы: назначение и производство экспертиз // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА). – 2019. – № 5(57). – С. 115-120. – DOI 10.17803/2311-5998.2019.57.5.115-120
228. Силкина Г. Ю., Шевченко С. Ю. Искусственный интеллект в моделях функционирования и инновационного развития промышленных предприятий // Стратегическое управление развитием цифровой экономики на основе умных технологий / под ред. А. В. Бабкина. – Санкт-Петербург, – 2021. – С. 459-501.

229. Симионова Н. Е., Симионов Р. Ю. Оценка бизнеса: теория и практика. – Ростов н/Д.: «Феникс», 2007. – 576 с.
230. Ситуационные интеллектуальные системы поддержки принятия решений / А. Н. Швецов, А. А. Суконщиков, Д. В. Кочкин, И. А. Андрианов. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – 251 с. – ISBN 978-5-907049-26-0
231. Скобелев П. О. Онтологии деятельности для ситуационного управления предприятиями в реальном времени // Онтология проектирования. – 2012. – № 1 (3). – С. 6-38.
232. Скобелев П. О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Информационные технологии. – 2013. – № S1. – С. 1-32.
233. Состояние дел по сертификации систем менеджмента на 31.12.2022 по ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, ISO 50001 и ISO 28000 (ISO Survey – 2022) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://intercertifika.ru/news/iso-survey-2022>. (дата последнего обращения 25.02.2025).
234. Специалист по качеству: Профессиональный стандарт № 40.062. – Утв. приказом Министерства труда и социальной защиты РФ № 276н от 22.04.2021. – 26 с.
235. Стойчич М., Стевич Ж., Николич А., Божичкович З. Многокритериальная модель оценки и выбора автоматически управляемых транспортных средств (AGV) для складов // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 4-20. – DOI 10.18503/2222-9396-2019-9-1-4-20.
236. Суслов С. А. Кластерный анализ: сущность, преимущества и недостатки // Вестник НГИЭИ. – 2010. – Т. 1, № 1(1). – С. 51-57.
237. Тебекин А. В. Принятие управленческих решений в условиях риска. – М: КноРус, 2018. – 110 с.
238. Тельнов Ю. Ф., Казаков В. А., Козлова О. А. Динамическая интеллектуальная система управления процессами в информационно-образовательном пространстве высших учебных заведений // Открытое образование. – 2013. – № 1(96). – С. 40-49. – EDN PVXHZZD.
239. Терелянский П. В. Системы поддержки принятия решений. Опыт проектирования: монография. – Волгоград: ВолгГТУ, 2009. – 127 с.

240. Трахтенгерц Э. А. Компьютерные системы поддержки принятия управленческих решений // Проблемы управления, – 2003, – № 1. – С. 13–28.
241. Тьюринг А. М. Может ли машина мыслить? / А. Тьюринг; пер. с англ. Ю. А. Данилова. – М.: URSS: Ленанд, 2016. – 110 с.
242. Удальцова Н. Л. Современные методы анализа и моделирования бизнес-процессов // Лидерство и менеджмент. – 2021. – Т. 8, № 2. – С. 185-200. – DOI 10.18334/lim.8.2.112126
243. Управление реализацией инвестиционных проектов на основе методов имитационного моделирования и нейросетевых технологий / Б. Г. Ильясов, Е. А. Макарова, Г. А. Зимина. – Уфа: ГИЛЕМ, 2010. – 240 с.
244. Управление рисками с применением современных технологий искусственного интеллекта и анализа больших данных / Н. Н. Гоглев, Е. В. Касаткина, С. А. Мигалин, О. И. Муштак // Цифровая экономика. – 2022. – № 2(18). – С. 38-45. – DOI 10.34706/DE-2022-02-05.
245. Урманцев Ю. А. Общая теория систем в доступном изложении. 2-е изд., испр. – М.: ЛЕНАНД, 2023. – 400 с. – ISBN: 978-5-9519-3826-8.
246. Фейгенбаум А. В. Контроль качества продукции: [Сокр. пер. с англ.]. – М.: Экономика, 1986. – 470 с.
247. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных: пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 399 с.
248. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография / под ред. А. И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 492 с.
249. Цуканова Н. И. Онтологическая модель представления и организации знаний. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 272 с.
250. Черняховская Л. Р., Атнабаева А. Р. Онтологический инжиниринг управления рисками в производственном процессе с целью обеспечения безопасности пищевых продуктов // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 8. – С. 161-166. – EDN XZBTKX.
251. Шарапова, А. И., Антонова Н. Л. Проблемы реализации систем менеджмента качества в России и за рубежом // Оригинальные исследования. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 346-354. – EDN SAMMBP.

252. Шахнов И. Ф. Согласование решений в сложных системах. Аддитивная модель. – М.: ВЦ РАН, 1998. – 71 с.
253. Шведин Б. Я. Онтология предприятия: экспериентологический подход: технология построения онтологической модели предприятия. – М.: URSS, 2010. – 234 с.; ISBN 978-5-9710-0308-3
254. Шестакова И. Г. Новая темпоральность цифровой цивилизации: будущее уже наступило // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 20-29.
255. Шулёпов А. Обработка естественного языка (NLP) с помощью нейросетей [Электронный ресурс] // vc.ru. – 2025. – URL: <https://vc.ru/u/22269-aleksandr-shulepov/881898-obrabotka-estestvennogo-yazyka-nlp-s-pomoshyu-neirosetei> (дата обращения: 09.04.2025).
256. Шумский С. А. Машинный интеллект. Очерки по теории машинного обучения и искусственного интеллекта. – М., РИОР, 2019. DOI: 10.29039/02011-1 [Электронный ресурс]. URL: <https://naukaru.ru/upload/21232f297a57a5a743894a0e4a801fc3/files/4aa3e882e70144f867ed116d42342630.pdf> (дата обращения: 02.09.2025).
257. Юдин Э. Г. Методология науки. Системность. Деятельность. – М.: Эдиториал УРСС, 1997. – 444 с. – ISBN 5-901006-07-0. – EDN TDGBUZ.
258. Юсупов И. Ю., Парфенов И. И., Горшечников А. В. Автоматизированное управление ситуациями в АПК. – Уфа: Башк. кн. изд-во, 1988. – 207 с.
259. Юсупова Н. И., Герасимова И. Б., Черняховская Л. Р., Шорохова С. В. Интеллектуальный подход к разработке системы психолого-педагогической поддержки обучаемого. Препринт монографии. – Уфа: УГАТУ, 2001. – С. 56.
260. Юсупова, Н. И. Иерархические ситуационные модели для СППР в сложных системах [Электронный ресурс] / Н.И. Юсупова, О.Н. Сметанина, К.Р. Еникеева // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. – URL: <http://www.science-education.ru/110-9814> (дата обращения: 16.11.2024).
261. Юсупова Н. И. Критические ситуации и принятие решений при управлении в условиях помех. – Уфа: Гилем, 1997. – 112 с.

Приложение А. Пример ситуаций, требующих принятия решений в сфере обеспечения качества

Ситуации	Точки принятия решений (см. глоссарий)
принятия решений о дефекте	Определение решения по действиям с дефектной продукцией. Классификация дефекта Определение причины дефекта Определение сценария устранения причины дефекта
принятия решений об оборудовании	Прогнозирование будущего состояния оборудования Определение соответствия оборудования уровню точности Определение соответствия оборудования уровню надёжности
принятия решений о персонале	Определение соответствия компетентности персонала уровню сложности решаемых задач Прогнозирование уровня качества продукции
принятия решений о рисках по обеспечению качества	Прогнозирование развития ситуации с уровнем качества нового продукта на основе алгоритма, обученного на данных, полученных из опыта внедрения в производство продуктов Принятие решения о мероприятиях по обеспечению качества
принятия решений об аудите качества	Классификация несоответствия Определение нормативного базиса для проверки подразделения
принятия решений об улучшении	Определение потенциального дефекта Определение процесса для улучшения Определение метода устранения причин потенциального дефекта
принятия решений о стандартизации	Определение необходимости в новой документированной процедуре Определение потребности в изменении действующей документированной процедуры Определение степени документирования процедуры
принятия решений о сертификации	Определение типа необходимой сертификации Выбор органа по сертификации
принятия решений для анализа качества	Дополнение / сокращение перечня записей по качеству Выбор методов анализа записей по качеству для формирования трендов изменения ситуации по каждому основному процессу Определение сценариев деятельности при выявлении негативных трендов
принятия решений о целях и показателях в области качества	Определение глобальных целей в области качества для предприятия Определение на основе глобальных целей для процессов и подразделений Определение показателей качества (KPI) для оценки степени достижения целей в области качества всех уровней Определение методов свёртки и анализа показателей достижения целей в области качества всех уровней Определение сценариев деятельности по показателям достижения целей в области качества всех уровней

Приложение Б. Методы обеспечения качества, интегрированные на основе СОП в СППР

Метод	Представление в рамках СОП	Интеграция в СППР	Связь с цифровым следом
PDCA	Формализован как модель: PDCA = $\begin{cases} \text{Plan: } G = \bigcup_{i=1}^n (a_i^F, r_i^F) \\ \text{Do: } d_j^S = \arg \max_{d \in D^S} \sum_{i=1}^n \mu(ch_i^S) l_i^S \\ \text{Check: } C_{KB}^{new} = C_{KB}^{old} \cup \{Ch, L, Cr\} \\ \text{Akt: } O^{t-1} = O^t \cup \{cr_k^{new}, s_l^{new}\} \end{cases}$ где G – множество целей, a_i^F – функция и r_i^F – ресурс; $d_j^S \in D^S$ – решение, Ch^{DS} и L^{DS} – множества характеристик и мер, $\mu(ch_i^S)$ – функция принадлежности характеристики, $l_i^S \in L^{DS}$ – мера; C_{KB}^{new} – новое состояние базы знаний, C_{KB}^{old} – старое состояние; O^{t-1} – предыдущая версия онтологической модели, O^t – текущая версия, cr_k^{new} – новые правила вывода, s_l^{new} – новые ситуации или прецеденты	Встроен как стандартный шаблон для типовых ситуаций, автоматически генерирует задачи на улучшение и запускает обработку через модульную архитектуру СППР	Пополнение правил в базе знаний на основе принятых решений
Диаграмма Ишикавы	Представлена как онтологический граф OWL с концептами-причинами и отношениями между ними: $G^{Ish} = \langle C^{rt}, R^{csi} \rangle$, где C^{rt} – множество причин, R^{csi} – причинные связи	Интегрирована в модуль анализа причин как инструмент объяснимости выводов	Добавление новых причин в по обратной связи от ЛПР
5S	Формализована как ситуация уровня процесса: $S^{5S} = \langle Ch^{5S}, L^{5S}, Cr^{5S}, D^{5S} \rangle$, где Ch^{5S} и L^{5S} – характеристики и меры рабочей зоны, Cr^{5S} – критерии оценки соответствия требованиям 5S, D^{5S} – действия по улучшению	Реализована как часть модуля контроля условий труда и процессных показателей	Актуализация характеристик и правил по данным мониторинга
Бенчмаркинг	Моделируется как сравнение множеств: $S^{ben} = \langle C^{ref}, C^{cur}, \mu(C^{ref}, C^{cur}) \rangle$, где C^{ref} – эталонное множество значений (лучшие практики, C^{cur} – текущее состояние системы, $\mu(C^{ref}, C^{cur})$ – функция принадлежности, сравнивающая текущие значения с эталонными	Интегрирован в подсистему сравнительного анализа, формирует рекомендации по улучшению	Формирование эталонных значений на основе исторических данных и нормативов
FMEA	Представлена как совокупность ситуаций и решений: $S^{FMEA} = \langle Ch^{FMEA}, L^{FMEA}, Cr^{FMEA5S}, D^{FMEA} \rangle$, где Ch^{FMEA} и L^{FMEA} – характеристики и меры, связанные с риском, Cr^{FMEA} – критерии допустимых отклонений, D^{FMEA} – действия по снижению риска	Используется как модуль прогнозирования рисков в СППР, встраивается в блок анализа и прогнозирования дефектов	Актуализация правил и действий по снижению риска на основе опыта
Контрольные карты (SPC)	Ситуации моделируются как: $S^{SPC} = \langle Ch^{SPC}, L^{SPC}, Cr^{SPC}, D^{SPC} \rangle$, где Ch^{SPC} и L^{SPC} – характеристики и меры процесса, Cr^{SPC} – критерии для границ допусков, D^{SPC} – действия при выходе за пределы	Интегрированы в модуль контроля и раннего оповещения с обратной связью от ЛПР	Обновление правил на основе изменений в допусках и статистики
Kaizen	Формализован как модель непрерывного улучшения: $S^{Kz} = \langle Ch^{Kz}, L^{Kz}, Cr^{Kz}, D^{Kz} \rangle$, где Ch^{Kz} и L^{Kz} – текущие характеристики и меры процесса, Cr^{Kz} – критерии улучшения, D^{Kz} – действия, направленные на улучшение	Встроен как стратегический модуль для непрерывного совершенствования	Запись изменений характеристик и решений в базу знаний

Приложение В. Примерный перечень измерительно-прогнозных показателей оценки эффективности СППР

Категория	Показатель	Описание	Метод расчёта	Критерий
уровень технологического развития бизнес-процесса	уровень эффективной автоматизации процесса ($P_{1.1}$)	отношение числа охваченных автоматизацией операций процесса к общему числу	$P_{1.1} = PC/k_{1.1}$, где PC – число автоматизированных операций процесса, повышающих их эффективность, а $k_{1.1}$ – их общее число	рост показателя
	уровень рисков при автоматизации процесса ($P_{1.2}$)	вычисляется по методу инвестиционного риск-менеджмента	$P_{1.2} = f(r_i)$, где r_i – риски проекта	снижение показателя
	уровень доверия к решениям системы управления процесса ($P_{1.3}$)	отношение числа обоснованных и понятных решений к общему числу	$P_{1.3} = RD/k_{1.3}$, где RD – число обоснованных и понятных решений, а $k_{1.3}$ – общее число решений	рост показателя
	уровень совершенства инфраструктуры управления процесса ($P_{1.4}$)	отношение числа эффективных методов управления процесса к общему числу	$P_{1.4} = MIP/k_{1.4}$, где MIP – число инструментов и методов управления, признанных эффективными, а $k_{1.4}$ – общее число используемых инструментов и методов управления	рост показателя
качество принимаемых решений в целом	оперативность информации о текущей ситуации на предприятии ($P_{2.1}$)	среднее время получения информации об изменении на объекте управления	$P_{2.1} = \sum_{i=1}^{k_{2.1}} AST / k_{2.1}$, где AST – время получения i -го отчёта об изменении на объекте управления, а $k_{2.1}$ – число измерений времени получения сигнала	снижение показателя
	достоверность информации о ситуации на объекте управления ($P_{2.2}$)	отношение числа достоверных отчётов о текущей ситуации к общему числу	$P_{2.2} = TR/k_{2.2}$, где TR – достоверных отчётов о текущей ситуации на объекте управления, а $k_{2.2}$ – общее число отчётов	рост показателя
	степень охвата имеющихся на предприятии данных аналитическими инструментами ($P_{2.3}$)	отношение числа отчётов, формирующихся на основе данных из ИС аналитическими инструментами к общему числу	$P_{2.3} = AR/k_{2.3}$, где AR – число отчётов, формирующихся аналитическими инструментами, а $k_{2.3}$ – общее число отчётов	рост показателя
	уровень качества моделирования прогнозируемых ситуаций при принятии решений ($P_{2.4}$)	отношение числа решений, принятых на основе прогнозного моделирования ситуаций к общему числу решений	$P_{2.4} = FD/k_{2.4}$, где FD – число решений, принятых на основе прогнозного моделирования ситуаций, а $k_{2.4}$ – общее число решений	рост показателя
	скорость адаптации к новым ситуациям ($P_{2.5}$)	Время, затрачиваемое системой на корректировку решений для повторяющихся нетиповых ситуаций	$P_{2.5} = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{i+1}) / k_{2.5}$, где T_i – время обработки i -й ситуации, $k_{2.5}$ – число итераций	Снижение показателя
	уровень прозрачности логики принятия решений ($P_{2.6}$)	доля решений, для которых СППР предоставила детальное обоснование	$P_{2.6} = \frac{NDF}{k_{2.6}} * 100\%$, где NDF – число решений с полным обоснованием, $k_{2.6}$ – общее число решений.	рост показателя

Категория	Показатель	Описание	Метод расчёта	Критерий
	согласованность решений СППР с экспертными оценками ($P_{2.7}$)	процент случаев, где решения СППР совпадают с решениями экспертов в аналогичных ситуациях.	$P_{2.7} = \frac{NM}{k_{2.7}} * 100\%$, где NM – число совпадений, $k_{2.7}$ – число проверенных случаев.	рост показателя
эффективность и прозрачность контроля в целом	предсказуемость управления на предприятии ($P_{3.1}$)	отношение числа решений, оказавшихся результативными к общему числу	$P_{3.1} = ED/k_{3.1}$, где ED – число решений, оказавшихся результативными, а $k_{3.1}$ – общее число решений	рост показателя
	вероятность искажения информации ($P_{3.2}$)	отношение числа отчётов, содержащих недостоверные данные к общему числу	$P_{3.2} = FR/k_{3.2}$, где FR – отчёты, содержащие недостоверные данные, а $k_{3.2}$ – общее число отчётов	снижение показателя
	доля ошибок в обработке информации ($P_{3.3}$)	отношение числа автоматически сформированных отчётов, содержащих недостоверные данные к общему числу	$P_{3.3} = AFR/k_{3.3}$, где AFR – автоматически сформированные отчёты, содержащие недостоверные данные, а $k_{3.3}$ – общее число отчётов	снижение показателя
	уровень исполнительской дисциплины ($P_{3.4}$)	отношение числа выполненных в срок работ к общему числу работ	$P_{3.4} = OTW/k_{3.4}$, где OTW – выполненные исполнителями в срок работы, а $k_{3.4}$ – общее число работ	рост показателя
	качество визуализации ПСС ($P_{3.5}$)	удобство и понятность графического представления логики решений	$P_{3.5} = \sum_{i=1}^{k_{4.1}} S_i/k_{4.1}$, где S_i – оценка эксперта, $k_{4.1}$ – число участников опроса.	рост показателя
уровень удовлетворенности потребителей	($P_{4.1}$) уровень качества обслуживания клиентов	отношение числа положительных отзывов клиентов о сервисе к общему числу отзывов	$P_{4.1} = PF/k_{4.1}$, где PF – число положительных отзывов клиентов о сервисе, а $k_{4.1}$ – общее число отзывов	рост показателя
	среднее время реакции на запросы и заказы ($P_{4.2}$)	среднее время обработки запроса потребителя	$P_{4.2} = \sum_{i=1}^{k_{4.2}} RPT/k_{4.2}$, где RPT – время обработки i -го запроса, а $k_{4.2}$ – число измерений времени обработки запроса	снижение показателя
	уровень лояльности потребителей ($P_{4.3}$)	средняя оценка качества работы предприятия от потребителей	$P_{4.3} = QW^{mid}$, где $QW^{mid} = \sum_{i=1}^{k_{4.3}} \frac{QW_i}{QW_{max}}/k_{4.3}$, QW_i – i -я оценка качества работы, QW_{max} – максимальное значение оценки, а $k_{4.3}$ – число оценок качества работы предприятия	рост показателя
эффективность предприятия в целом (бухгалтерские показатели)	уровень отдачи с работника ($P_{5.1}$)	отношение общего дохода предприятия к числу работников	$P_{5.1} = TEI/k_{5.1}$, где TEI – общий доход предприятия, а $k_{5.1}$ – число работников предприятия (занятых ставок)	рост показателя
	выработка с метра площади ($P_{5.2}$)	отношение общего дохода предприятия к занимаемой площади	$P_{5.2} = TEI/SE$, где TEI – общий доход предприятия, а SE – используемая площадь предприятия в m^2	рост показателя
	соотношение поступлений и выбытий ($P_{5.3}$)	отношение общего дохода к общим затратам	$P_{5.3} = TEI/TES$, где TEI – общий доход предприятия, а TES – общие затраты предприятия	рост показателя

Категория	Показатель	Описание	Метод расчёта	Критерий
	уровень издержек ($P_{5.4}$)	отношение издержек второго рода (потерь) к общим затратам предприятия	$P_{5.4} = TL/TES$, где TL – общие потери предприятия, а TES – общие затраты предприятия	снижение показателя
	рентабельность предприятия ($P_{5.5}$)	отношение прибыли к общим затратам	$P_{5.4} = Pr/TES$, где Pr – чистая прибыль предприятия, а TES – общие затраты предприятия	рост показателя
оценка неопределённости процесса	уровень разрешения нетиповых ситуаций ($P_{6.1}$)	отношение числа успешно решённых задач с неполными данными к общему числу	$P_{6.1} = NSR/NUT$, где NSR – число успешно решённых задач, NUT – общее число задач с неопределённостью	рост показателя
	точность лингвистической оценки ($P_{6.2}$)	совпадение лингвистических оценок СППР с экспертными суждениями	$P_{6.2} = \sum_{i=1}^{k_{6.2}} (1 - LR_i - ER_i) / k_{6.2}$, где LR_i – оценка СППР, ER_i – экспертная оценка (нормированные), $k_{6.2}$ – число кейсов	рост показателя
кросс-уровневое управление	эффективность кросс-уровневых решений ($P_{7.1}$)	отношение числа решений, положительно повлиявших на смежные уровни управления, к общему числу кросс-уровневых решений	$P_{7.1} = CLS/k_{7.1}$, где CLS – успешные кросс-уровневые решения, $k_{7.1}$ – общее число таких решений	рост показателя
	коэффициент синергии уровней ($P_{7.2}$)	снижение конфликтов между уровнями управления после внедрения СППР	$P_{7.2} = (CC_{bef} - CC_{aft})/CC$, где CC – число конфликтных ситуаций, CC_{bef} , CC_{aft} – число конфликтов до и после внедрения	рост показателя
интеграция лингвистических моделей	качество формализации нечётких данных ($P_{8.1}$)	отношение числа корректно формализованных лингвистических переменных к общему числу входных нечётких параметров	$P_{8.1} = FLP/k_{8.1}$, где FLP – корректные формализации, $k_{8.1}$ – общее число параметров	рост показателя
	эффективность управления через лингвистические правила ($P_{8.2}$)	доля решений, принятых на основе лингвистических правил, которые привели к улучшению КРІ	$P_{8.2} = LRP/ RP$, где LRP – успешные решения через лингвистические правила, RP – общее число таких решений	рост показателя

Приложение Г. Результаты расчёта ключевых метрик

1. Данные расчётов экспертами ключевых метрик, приведены в таблице П.Г1

Таблица П.Г1 Результаты расчёта ключевых метрик экспертами

Метрика	Значение	Изменение	Описание	Ссылка
Информационная адекватность (IA)	0.87	+39%	Отношение объёмов релевантной информации к общему объёму данных в ситуации «Нарушение температурного режима»	§2.2.2
Скорость принятия решений (V^{DM})	2.8 решения/час	+40%	Количество решений по обработке дефектов за единицу времени до и после внедрения СППР	§2.2.2
Уровень ошибок интерпретации (ΔE)	0.23	-71.2%	Число ошибочных трактовок нормативных требований / общее число ситуаций (на примере ГОСТ Р 52745-2021)	§2.2.2
Согласованность вывода между уровнями (K^{agr})	0.90	+42.9%	Доля согласованных решений при анализе кросс-уровневой ситуации (продукт–процесс–система)	§3.4.1
Коэффициент релевантности знаний (K^{rel})	0.88	+35.4%	Отношение полезных правил в онтологии к общему числу правил (после фильтрации устаревших)	§4.3.1
Объяснимость вывода (XAI)	4.8 / 5	+65.5%	Оценка понятности, логичности и связи с нормативами вывода СППР экспертами (шкала от 1 до 5)	§4.2.3
Воспроизводимость решений (RPR)	0.94	+36.2%	Коэффициент совпадения решений при повторном запуске одного и того же сценария с одинаковыми входными данными	§4.3.1
Скорость актуализации модели (V^{akt})	4.1 связей/час	+273%	Количество обновлённых элементов онтологии (классов, свойств, правил) за час через цифровой след Df	§5.3.4
Изменение согласованности (ΔK)	+0.27	–	Разница между K^{agr} до и после внедрения метода двунаправленной интеграции онтологий в документооборот	§5.3.4
Степень соответствия нормативам (Ac)	94%	+25.3%	Процент решений, полностью соответствующих требованиям стандарта организации и ГОСТ Р 52745-2021	§5.3.4

2. Результаты расчёта ключевых метрик студентами на 5 деловых играх приведены в таблице П.Г2 - П.Г6.

Таблица П.Г2 Результаты по задаче 1. Классификация ситуаций

Подход	Группа	Студентов, чел.	Время, мин	Корректность решения, %	Точность идентификации, %
Только СТО	Группа 1	27	48	74	70
Только СТО	Группа 2	26	50	72	68
СТО + ERP	Группа 3	29	40	83	81
СТО + ERP	Группа 4	28	39	85	83
СТО + СППР	Группа 5	28	32	92	90
СТО + СППР	Группа 6	31	31	94	92
Среднее	–	–	40.1	83.3	81.0

Таблица П.Г3 Результаты по задаче 2. Выбор алгоритма принятия решений

Подход	Группа	Студентов, чел.	Время, мин	Обоснованность, баллы (1 – 5)	Ошибки интерпретац., %	Точность идентификац., %
Только СТО	Группа 1	29	52	3.1	34	73
Только СТО	Группа 2	24	53	2.9	36	71
СТО + ERP	Группа 3	27	42	3.9	24	84
СТО + ERP	Группа 4	29	41	4.1	22	86
СТО + СППР	Группа 5	28	35	4.7	11	93
СТО + СППР	Группа 6	33	34	4.8	9	95
Среднее	–	–	41.2	3.9	21.0	85.3

Таблица П.Г4 Результаты по задаче 3. Объяснимость вывода

Подход	Группа	Студентов, чел.	Время, мин	Согласованн., доля (0 – 1)	Объяснимость, баллы (1 – 5)	Связь с норм. , баллы (1 – 5)	Воспроизвод., доля (0 – 1)
Только СТО	Группа 1	28	65	0.63	3.0	3.7	0.71
Только СТО	Группа 2	25	63	0.61	2.8	3.5	0.69
СТО + ERP	Группа 3	29	48	0.78	4.0	4.3	0.83
СТО + ERP	Группа 4	29	46	0.80	4.2	4.4	0.85
СТО + СППР	Группа 5	27	40	0.89	4.7	4.6	0.92
СТО + СППР	Группа 6	30	39	0.91	4.9	4.8	0.94
Среднее	–	–	48.5	0.77	4.1	4.2	0.83

Таблица П.Г5 Результаты по задаче 4. Повторяемость решений

Подход	Группа	Студентов, чел.	Правильность ответов, %	Согласованн., доля (0 – 1)	Воспроизвод., доля (0 – 1)	Ошибки интерпретац., %
Только СТО	Группа 1	28	75	0.65	0.70	31
Только СТО	Группа 2	26	73	0.63	0.68	33
СТО + ERP	Группа 3	31	84	0.79	0.82	21
СТО + ERP	Группа 4	28	86	0.81	0.84	19
СТО + СППР	Группа 5	28	94	0.91	0.93	10
СТО + СППР	Группа 6	32	95	0.93	0.95	8
Среднее	–	–	84.5	0.82	0.84	20.3

Таблица П.Г6 Результаты по задаче 5. Согласованность решений

Подход	Группа	Студентов, чел.	Правильность ответов, %	Время, мин	Согласованн., доля (0 – 1)	Единодушность, %
Только СТО	Группа 1	27	68	55	0.64	62
Только СТО	Группа 2	25	66	57	0.62	60
СТО + ERP	Группа 3	27	78	45	0.77	75
СТО + ERP	Группа 4	28	80	43	0.79	77
СТО + СППР	Группа 5	29	89	36	0.90	88
СТО + СППР	Группа 6	31	91	34	0.92	90
Среднее	–	–	78.5	45.0	0.80	75.3

Использованы ключевые метрики и формулы их расчётов из таблицы 2.10.

Результаты расчётов в таблице П.Г7.

Таблица П.Г7 Итоговые метрики по подходам

Название метрики	Только СТО	СТО и ERP	Прирост ERP к только СТО	СТО и СППР	Прирост СППР к только СТО
Среднее время решения (мин)	52.6	43.0	-18.2%	35.4	-32.7%
Точность идентификации (IA) (%)	72.0	83.5	+15.9%	92.5	+28.5%
Объяснимость (XAI) (баллы)	2.9	4.1	+41.4%	4.8	+65.5%
Согласованность (K^{agr}) (доли)	0.63	0.79	+25.4%	0.90	+42.9%
Воспроизводимость (RPR) (доли)	0.69	0.83	+20.3%	0.94	+36.2%
Ошибки интерпретации (ΔE , %)	33.0	21.5	-34.8%	9.5	-71.2%
Количество правильных решений (%)	70.2	81.8	+16.5%	90.3	+28.6%

Результаты учебного эксперимента показали, что использование прототипа СППР на основе СОП по сравнению с работой только со СТО обеспечивает: сокращение времени решения на 32.7%, рост точности идентификации на 28.5%, увеличение объяснимости на 65.5%, снижение ошибок интерпретации на 71.2%, рост согласованности на 42.9%.

Приложение Д. Построение онтологических моделей в прототипе интеллектуальной СППР

Ситуация 1. Незаполненные графы в журнале

Поскольку ситуация 1 самая простая, то разберём её анализ буквально по шагам:

Идентификация ситуации:

На первом этапе определяется, относится ли документ к базису проверки аудита. Это ключевая характеристика, которая влияет на дальнейшие действия. Если документ не входит в базис проверки, процесс завершается.

Характеристики (уровень идентификации ситуации):

Единственная характеристика на этом уровне – «входит ли документ в базис проверки». Возможные меры: "да" или "нет".

Уровень решения:

Если документ входит в базис проверки, переходим к проверке заполненности граф. Здесь также используется одна характеристика: «заполнены ли графы». Возможные меры: «да» или «нет».

Уровень сценария:

- Если документ не входит в базис проверки, проверка прекращается.
- Если документ входит в базис проверки:
 - Все графы заполнены → Никаких действий не требуется.
 - Есть незаполненные графы → Оформляется замечание, и отправляется уведомление руководству цеха.

Правила:

Если документ входит в базис проверки И есть незаполненные графы → Уведомить ответственных лиц для корректировки.

Данные для онтологии показаны в таблице П.Д1

Таблица П.Д1 Объекты онтологии по ситуации 1

Уровень	Действия	Характеристики	Меры	Правила
Уровень ситуации	Проверяется, входит ли документ в базис проверки. Если да, ситуация идентифицируется.	Вхождение в базис	Да / Нет	Если документ входит в базис проверки, то переход к решению

Уровень	Действия	Характеристики	Меры	Правила
Уровень решения	Проверяется заполненность граф в документе. Если есть незаполненные графы, решение принимается.	Заполненность граф	Да / Нет	Если есть незаполненные графы, то решение об уведомлении администрации цеха
Уровень сценария	Выбор не предусмотрен	нет	нет	нет

В данном примере имеем следующие элементы онтологии:

1. Классы и подклассы:

Situation (Класс) описывает ситуацию, связанную с проверкой документа.

- Подкласс: DocumentCheckSituation (Проверка документа).
- Decision (Класс) описывает решения для корректировки ситуации.
- Подкласс NotifyAdministration (Уведомление администрации цеха).
- Scenario (Класс) описывает последовательность действий для реализации

решения.

- Подкласс IssueResolutionScenario (Сценарий оформления замечания и отправки уведомления).

2. Свойства классов:

- hasCharacteristic (Свойство) определяет характеристики ситуации;
- requiresAction (Свойство) определяет действие, необходимое для корректировки ситуации;
- includesAction (Свойство) определяет конкретные шаги в рамках сценария.

3. Индивиды (экземпляры):

- DocumentCheckSituation_1: Индивид класса Situation представляет ситуацию проверки документа.
- NotifyAdministration_1: Индивид класса Decision даёт решение об уведомлении администрации цеха.

4. Логические правила (OWL-импликации):

- SubClassOf (ObjectIntersectionOf (Situation [hasCharacteristic some Вхождение_в_базис]), requiresAction some NotifyAdministration).
- SubClassOf (ObjectIntersectionOf (Decision [hasCharacteristic some Заполненность_граф], Scenario [includesAction some Оформление_замечания]))).

Структура свойств ситуации показана на рис. Д.1.

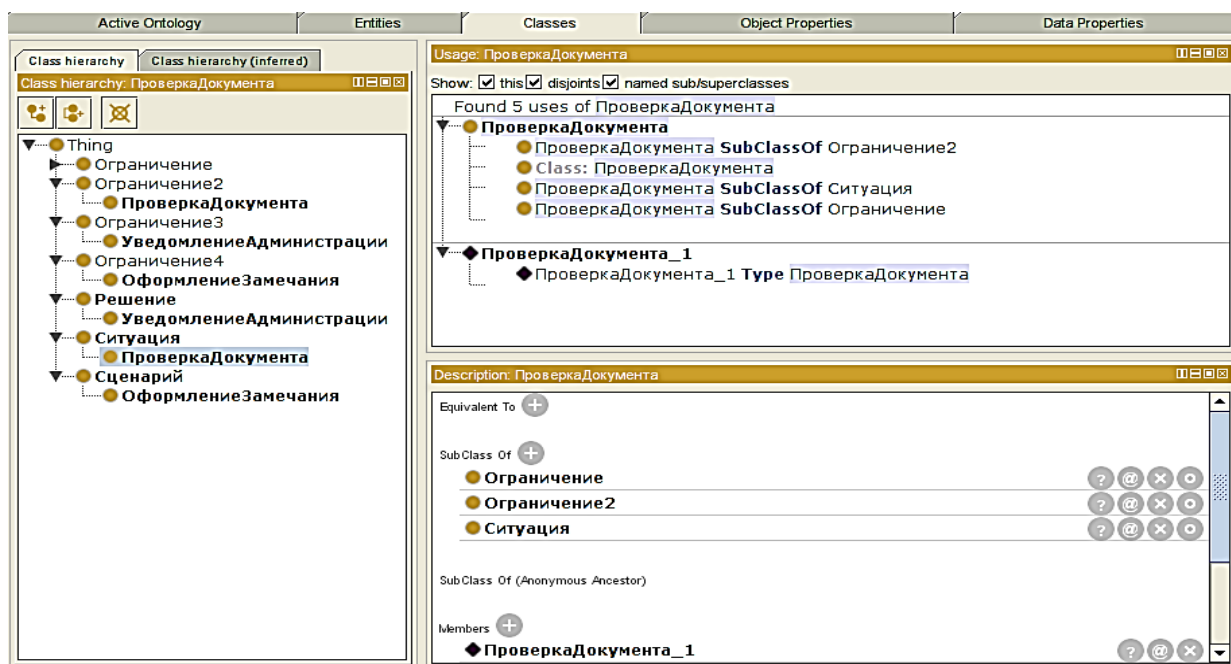


Рисунок Д.1 – Структура ситуации на языке OWL в Protege 4.3

Онтологическая модель ситуации 1 представлена на рис. Д.2.

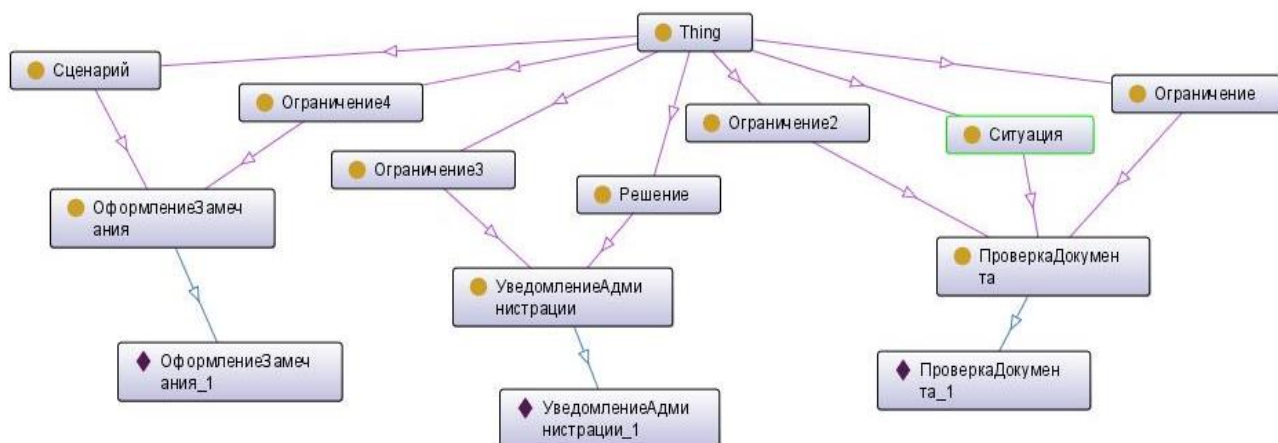


Рисунок Д.2 – OWL-модель ситуации 1 (Незаполненные графы в журнале)

Ситуация 2. Неучтённая инструкция

Данная ситуация шире предыдущих за счёт наличия большего числа менее чётких правил, но также достаточно проста в описании (таблице П.Д2). В таблице план мер по предотвращению включает: 1) правка плана, 2) перепроверка всех деталей, которые проходили сушку в печи, 3) объявление выговора термометристу, 4) объявление выговора технологу.

Таблица П.Д2 Сокращённая таблица объектов онтологии по ситуации 2

Урове нь	Действия	Характери стики	Меры	Правила	Классы / подклассы	Свойства (сокращённые)
ситуации	Проверка, является ли инструкция учтённой в системе	Состояние инструкции	Да / Нет	Если инструкция не учтена → переход к решению	Класс: Ситуация, Подкласс: НеучтённаяИнструкция	Свойство: имеетХарактеристику (тип: Состояние инструкции), SubClassOf (ObjectIntersectionOf (Ситуация [hasCharacteristic some Состояние_инструкции]), ...
решения	Проверка степени соответствия содержания неучтённой инструкции	Степень соответствия	от 0 до 1	Если степень соответствия от 0.7 до 1 → замена. Если степень соответствия меньше 0.7 → переход к сценарию	Класс: Решение, Подклассы: ЗаменаИнструкции, АнализироватьТребования, ПравкаПлана	Свойства: имеетХарактеристику (тип: Степень соответствия), требуетДействия (типы: Замена, Анализ требований). Правила: ...
сценария	Анализ влияния несоответствующей инструкции на результаты	Влияние на результаты	Есть / Нет	Если есть влияние → план мер по предотвращению	Класс: Сценарий, Подклассы: ПланМерПоПредотвращению, ПравкаПлана, ПерепроверкаДеталей, ОбъявлениеВыговора	Свойства: включаетДействие (типы: Правка плана, Перепроверка деталей, Объявление выговора). Правила: SubClassOf (ObjectIntersectionOf (Сценарий [hasCharacteristic some Влияние_на_результаты = «Есть»]) ...

Визуализация модели OWL для ситуации 2 показана на рис. Д.3.

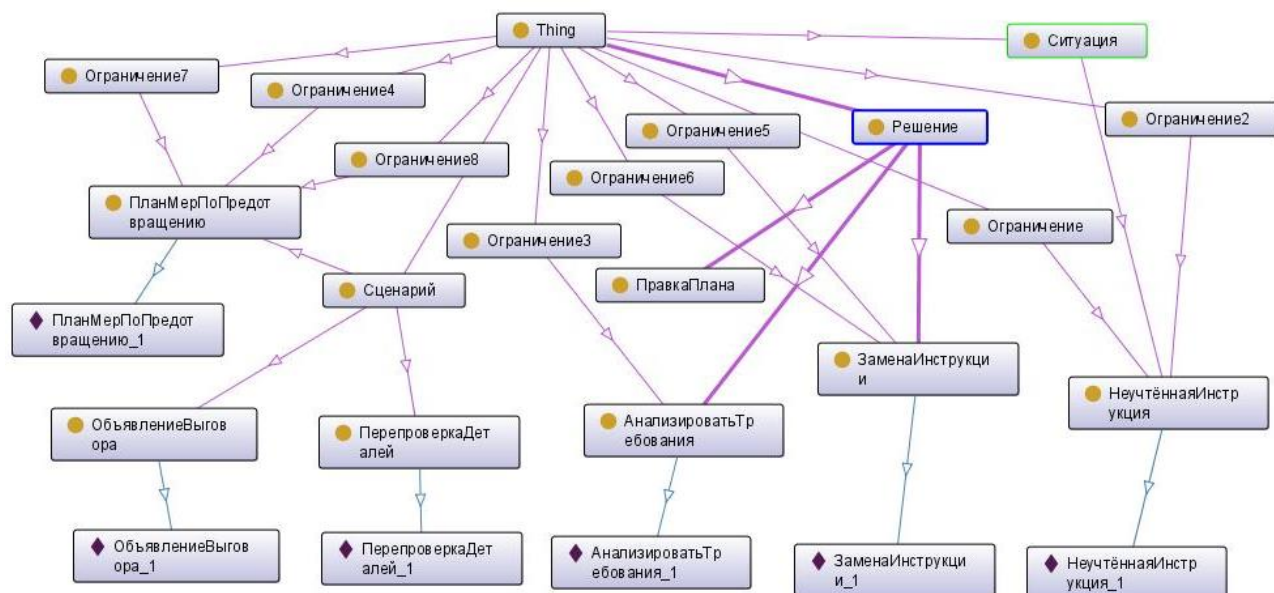


Рисунок Д.3 – OWL-модель ситуации 2 (Неучтённая инструкция)

Ситуация 3. Нарушение сроков уведомления ОТК

Рассмотрим ситуацию 3 которая характеризуется достаточно большим числом нечётких правил (таблице П.Д3) (свойства вынесены из рассмотрения).

Таблица П.Д3 Объекты онтологии по ситуации 4

Уровень	Действия	Характеристики	Меры	Правила	Классы / подклассы
Уровень ситуации	Проверка, соблюдены ли сроки уведомления ОТК	Соблюдение сроков уведомления	Да / Нет	Если сроки уведомления нарушены → переход к решению	Класс: Ситуация, Подкласс: НарушениеСроковУведомления
Уровень решения	Проверяется степень влияния нарушения на процесс	Степень влияния	от 0 до 1	Если степень влияния < 0.3 → замечание. Если степень влияния ∈ [0.3; 0.7] → анализ причин. Если степень влияния > 0.7 → срочное исправление и оповещение руководства	Класс: Решение, Подклассы: Замечание, АнализироватьПричины, СрочноеИсправление
Уровень сценария	Анализ последствий нарушения сроков уведомления	Последствия нарушения, Потери	Есть / Нет, число	Если есть последствия, но потери ≤ 100000 → план мер по предотвращению. Если есть последствия, но потери > 100000 → план мер по предотвращению + оформление акта взыскания	Класс: Сценарий, Подклассы: ПравкаПлана, ПланМерПоПредотвращению, ОформлениеАктаВзыскания

Визуализация модели OWL для ситуации 3 показана на рис. Д.4.

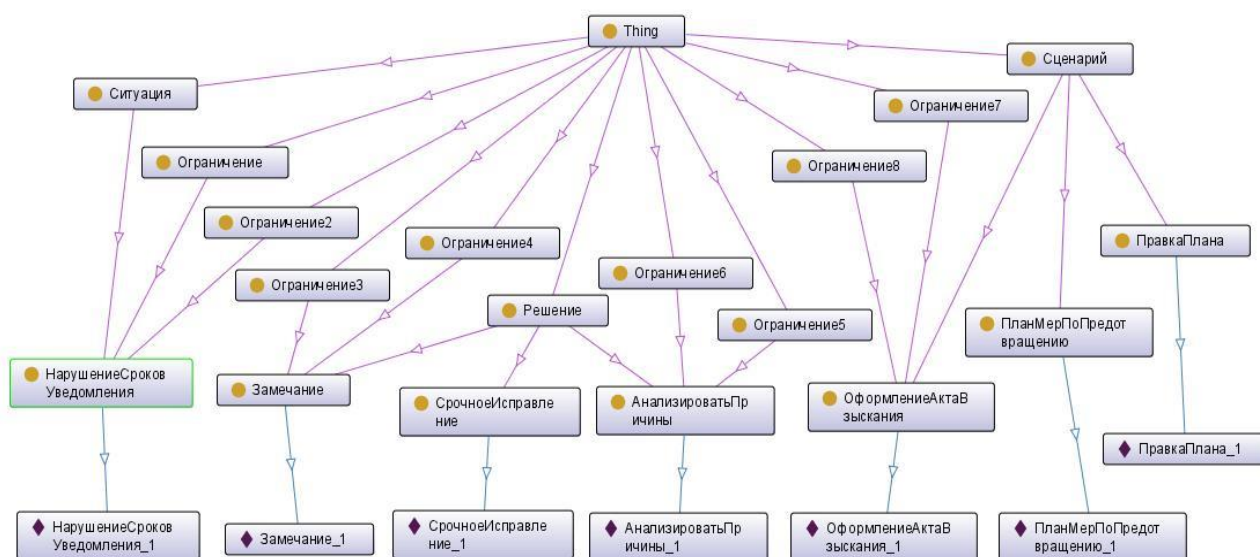


Рисунок Д.4 – OWL-модель ситуации 3 (Нарушение сроков)

Ситуация 4. Прогнозирование рисков несоответствия продукции по отчётности

Рассмотрим ситуацию 4 которая характеризуется анализом исторических данных (см. таблицу П.Д4) (свойства вынесены из рассмотрения).

Таблица П.Д4 Объекты онтологии по ситуации 4

Уровень	Действия	Характеристики	Меры	Правила
Уровень ситуации	Проверка, требуется ли прогноз рисков	Необходимость прогнозирования	Да / Нет	Если необходимость прогнозирования = Да → переход к решению
Уровень решения	Проверка уровня дефектности	Риск роста числа несоответствий, Рост дефектности в производстве, Рост дефектности на входном контроле, Рост дефектности металла	от 0 до 1	Если риск роста числа несоответствий < 0.3 И рост дефектности в производстве < 0.3 И рост дефектности на входном контроле < 0.3 И рост дефектности металла < 0.3 → Роста нет. Если риск роста числа несоответствий ∈ [0.3; 0.7] ИЛИ рост дефектности в производстве ∈ [0.3; 0.7] ИЛИ рост дефектности на входном контроле ∈ [0.3; 0.7] ИЛИ рост дефектности металла ∈ [0.3; 0.7] → Рост малый, требуется наблюдение. Если риск роста числа несоответствий > 0.7 ИЛИ рост дефектности в производстве > 0.7 ИЛИ рост дефектности на входном контроле > 0.7 ИЛИ рост дефектности металла > 0.7 → Рост значительный, требуются меропр., переход к сценариям.
Уровень сценария	Разработыв. меры по предотвращению дефектов	Наличие бюджета, Критичность тренда	Есть / Нет	Если наличие бюджета = Да ИЛИ критичность тренда = Высокая → Выполнить мероприятия немедленно. Если наличие бюджета = Нет И критичность тренда = Низкая → Отложить мероприятия до выделения бюджета. Если наличие бюджета = Нет И критичность тренда = Средняя → Пересмотреть приоритеты и частично выполнить мероприятия.

Поскольку правил получилось очень много, то классы, подклассы, свойства и правила OWL-модели приводить не будем, поскольку они являются отражением действий, характеристик и правил.

Визуализация модели OWL для ситуации 4 показана на рис. Д.5.

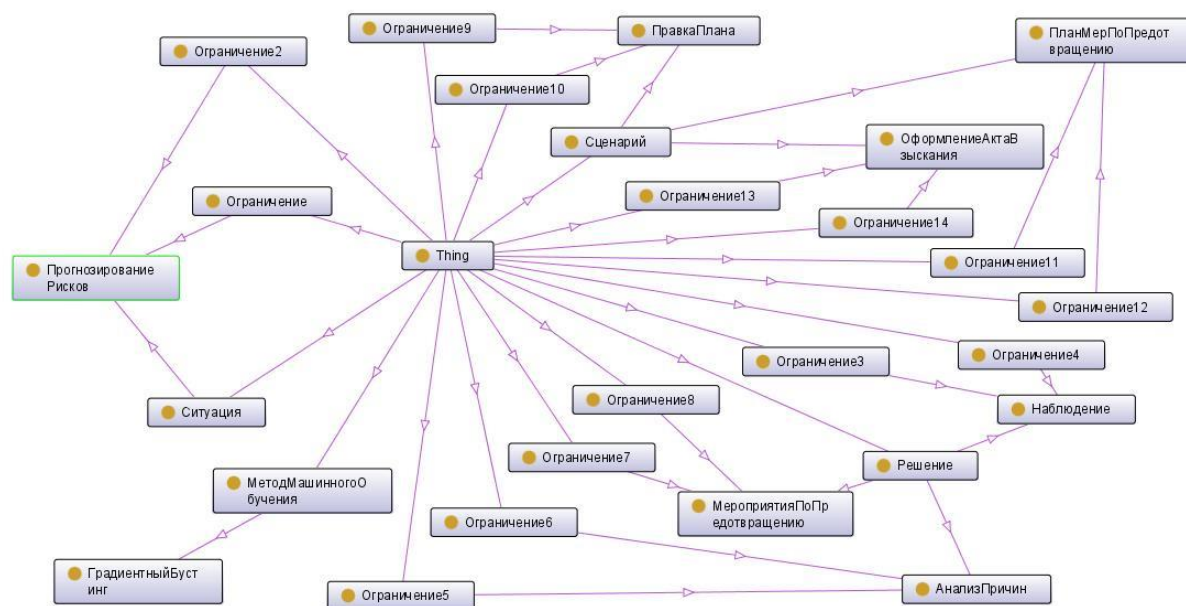


Рисунок Д.5 – OWL -модель ситуации 4 (Прогнозирование рисков)

Приложение Е. Настройка решателя в прототипе интеллектуальной СППР

Ситуация 1. Незаполненные графы в журнале

Особенности ситуации: типовая, с четко определенными критериями, логика жёсткая: если дата в документе некорректна, необходимо уведомить ответственных лиц и исправить данные и решение требует минимальной сложности анализа.

Варианты действий:

1. Предусмотрим организационные действия:

Например, разработать инструкцию по проверке дат в журналах.

2. Применим готовую экспертную систему:

Например, Drools, CLIPS и т.п.

Настроить правило:

Если дата в документе $\neq$ текущая дата $\rightarrow$ создать задачу на исправление и отправить уведомление.

3. Применим интеграцию с ERP-системой:

– Для Infor LN, *например*, можно связать решение с сеансом «Контроль по заказу» (qmptc1120m000), настроить в поле «Метод блокировки» по условию – заблокировать документ, если дата некорректна, автоматически формировать задачи через сеанс «Заказы на контроль» (qmptc1100m000).

– В 1С ERP 2 имеет смысл, *например*, использовать модуль «Управление документами», в котором настроить проверку дат при создании или редактировании документа и автоматически формировать уведомления через механизм «Бизнес-процессы».

Ситуация 2. Неучтённая инструкция

Особенности ситуации: проблема нетиповая и кросс-уровневая, логика на уровне выбора сценария – нечёткая, требующая использования соответствующего метода.

Варианты действий:

1. Решение с использованием готовых продуктов

Возможно использование следующих программных средств, позволяющих организовать работу с нечёткими лингвистическими переменными: MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox или Statistics and Machine Learning Toolbox), ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) [43], LabVIEW, Julia.

2. Разработаем решение на основе библиотек Python [56, 77] (в частности, numpy, matplotlib, skfuzzy).

Рассмотрим характеристики и результаты работы данного решения, с использованием характеристик на уровне сценария как лингвистических переменные (на основе алгоритма Такаги-Сугено):

Описание лингвистических переменных:

- влияние на продукцию (термы: «Низкое» (0-0.3), «Среднее» (0.3-0.7), «Высокое» (0.7-1));
- уровень риска снижения качества продукции (термы: «Низкий» (0-0.3), «Средний» (0.3-0.7), «Высокий» (0.7-1));
- частота использования инструкции (термы: «Редко», «Умеренно», «Часто»;
- значимость процесса (термы: «Низкая» (0-0.3), «Средняя» (0.3-0.7), «Высокая» (0.7-1));
- затраты на исправление (термы: «Низкие» (0-0.3), «Средние» (0.3-0.7), «Высокие» (0.7-1)).

Для первых двух показателей используем треугольные или трапециевидные функции принадлежности. Для 3-5 показателей – дискретные значения или треугольные функции принадлежности.

Раскроем алгоритм Такаги-Сугено:

1. Фаззификация входных данных:

Каждая характеристика преобразуется в лингвистическую переменную с использованием функций принадлежности.

2. Формирование правил:

Правила формируются на основе комбинаций термов. *Пример правила:* ЕСЛИ Влияние на продукцию = «Среднее» И Уровень риска снижения качества продукции = «Высокий», ТО Уровень риска = 0.6.

3. Агрегация выходных значений:

Выходные значения рассчитываются как взвешенная сумма всех активированных правил.

4. Дефаззификация:

Полученное значение (например, 0.60) интерпретируется как числовой уровень риска.

Для выбора сценария используется визуализация, подсказывающая ЛПР точность попадания в диапазон для выбора требуемого решения (см. рисунок Е.1)

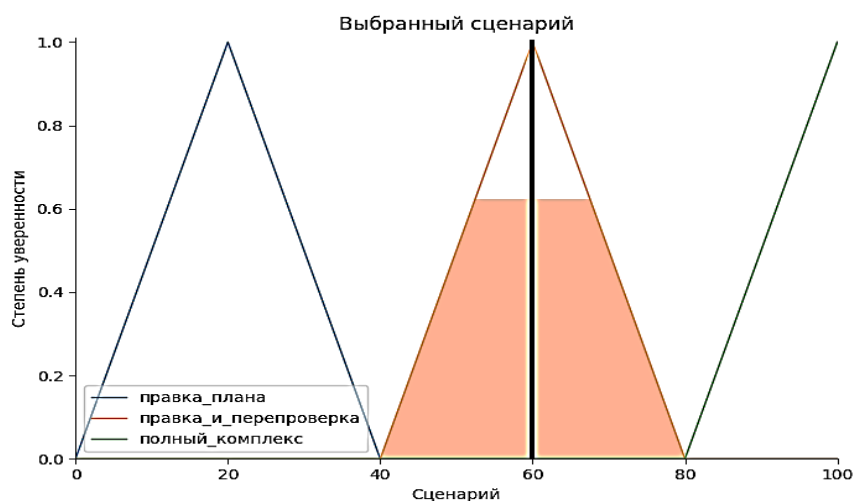


Рисунок Е.1 – Результат работы программы, которая определяет степень влияния на продукцию на основе алгоритма адаптированного метода нечёткого вывода

Ситуация 3. Нарушение сроков уведомления ОТК

Особенности ситуации:

- нетиповая ситуация, характеризующаяся высокой неопределённостью;
- присутствуют значимые факторы, связанные с передачей управления на другие уровни, т.е. ситуация кросс-уровневая.

Варианты действий:

1. Решение через готовые продукты

Аналогично ситуации 2.

2. Уместно решение на основе библиотек Python (в частности, numpy, matplotlib, skfuzzy).

Рассмотрим коротко работу программы:

1. Формирование нечётких множеств:

– для каждой характеристики создаются нечёткие множества с термами («низкий», «средний», «высокий»);

– для определения треугольных функций принадлежности используется функция `ctrl.trimf`.

2. Определение правил, которые связывают входные характеристики с выходной переменной «Решение».

3. Вычисление решения для переменной «Решение» по входным данным.

4. Визуализация показывает входные данные и решение (см. рисунок Е.2).

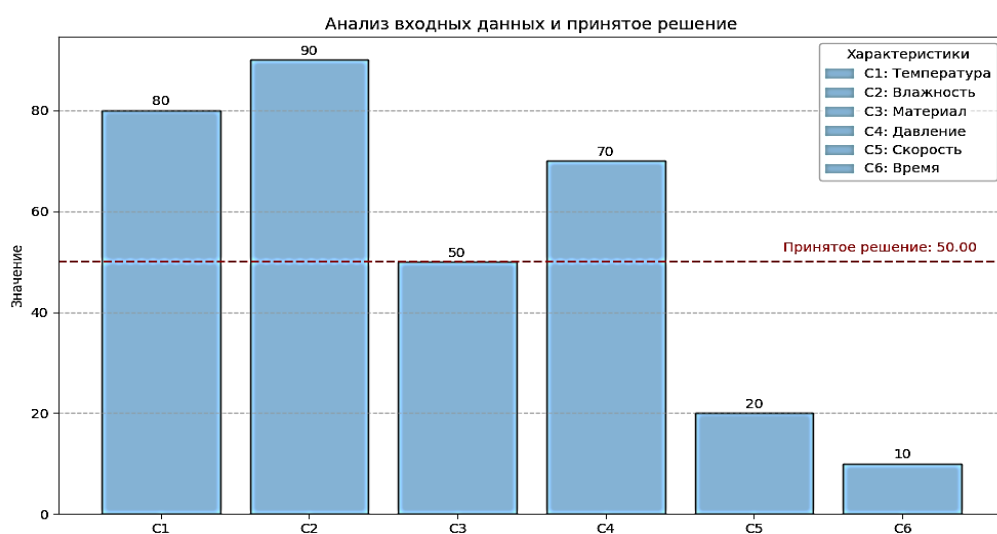


Рисунок Е.2 – Результат работы программы, которая определяет значение переменной «Решение» для ситуации 3 (значение переведено в %)

Ситуация 4. Прогнозирование рисков

Данная кросс-уровневая ситуация характеризуется взаимосвязью между различными уровнями управления (продукт, процесс, система). Для анализа таких ситуаций требуется подход, включающий методы различных классов.

Варианты действий:

1. Решение через готовые продукты

В качестве программных продуктов и библиотек для решения задачи по прогнозированию рисков на основе исторических данных о дефектах подходят: XGBoost, LightGBM, CatBoost, H2O, Spark MLlib, mlpack и другие.

2. Решение на основе библиотек Python (pandas, numpy, matplotlib, sklearn).

Краткое описание работы кода:

- создаются три отчёта с данными о дефектах, каждый из которых содержит от 65 до 95 записей, а данные включают название изделия, описание дефекта, риски, затраты, тип дефекта, место обнаружения и оборудование;
- производится обработка данных, т.е. категориальные данные преобразуются в числовые значения для использования в модели машинного обучения, причём данные разделяются на обучающую и тестовую выборки;
- используется алгоритм случайного леса (RandomForestClassifier) для классификации рисков и обучения модели;
- строится распределение затрат, рисков и типов дефектов, а также анализируется тренд затрат по месту обнаружения (см. рисунок Е.3).

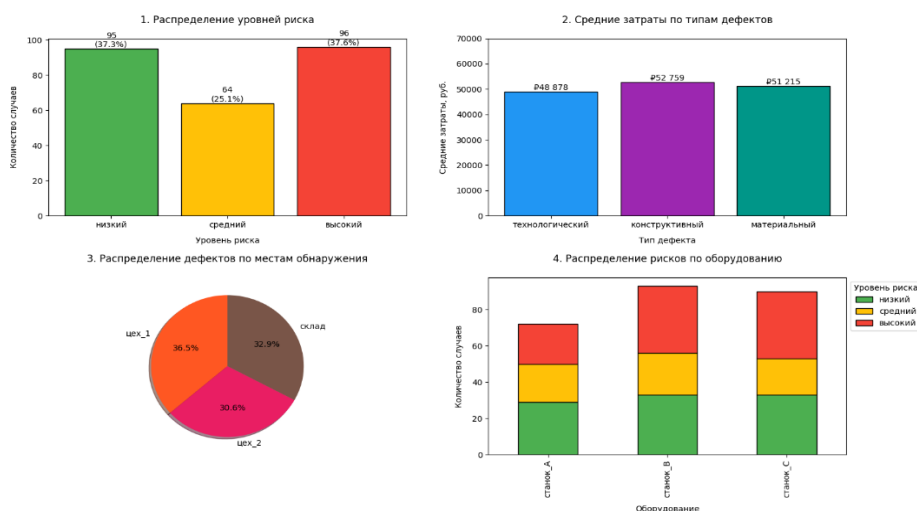


Рисунок Е.3 – Визуализация результатов анализа данных для ситуации 4

Таким образом, предложены мероприятия по настройке решателей СППР для всех ситуаций. Рассмотрим возможности по интеграции моделей процессов принятия решений в бизнес-процессы.

Приложение Ж. Анализ эффективности прототипа интеллектуальной СППР на примерах ситуаций

Для ситуации 1 рассмотрим применение всей методики по шагам, а для остальных для повышения прозрачности данного примера покажем только входы и результаты.

1. Анализ эффективности внедрения СППР для ситуации 1

Шаг 1. Формирование множества показателей

Показатели для оценки эффективности для решений по ситуации 1 приведены в таблице П.Ж1.

Таблица П.Ж1 Отобранные показатели для оценки эффективности по ситуации 1

Код	Показатель	Объяснение
P1.1	Уровень эффективной автоматизации процесса	Отражает степень внедрения цифровых технологий (инновационность процессов).
P1.4	Уровень совершенства инфраструктуры управления	Оценивает качество методов управления процессами, что важно для снижения ошибок.
P2.2	Достоверность информации о ситуации	Показывает корректность данных, необходимых для принятия решений (надёжность информации).
P2.5	Скорость адаптации к новым ситуациям	Время, затрачиваемое системой на корректировку решений для повторяющихся нетиповых ситуаций.
P2.6	Уровень прозрачности логики принятия решений	Доля решений, для которых СППР предоставила детальное обоснование (объяснимость).
P3.3	Доля ошибок в обработке информации	Отражает точность работы системы ДО (влияет на качество процессов).
P3.5	Качество визуализации причинно-следств. связей	Удобство и понятность графического представления логики решений (для анализа дефектов).
P4.1	Уровень качества обслуживания клиентов	Отражает влияние системы на внешний результат (удовлетворённость клиентов).
P5.3	Соотношение поступлений и выбытий	Отношение общего дохода к общим затратам предприятия (финансовая составляющая).
P5.4	Уровень издержек	Отношение издержек второго рода (потерь) к общим затратам предприятия.
P6.1	Уровень разрешения нетиповых ситуаций	Отношение числа успешно решённых задач с неполными данными к общему числу.
P7.1	Эффективность кросс-уровневых решений	Отражает надёжность системы контроля (качество выполнения задач).
P7.2	Коэффициент синергии уровней	Снижение конфликтов между уровнями управления после внедрения СППР.
P8.1	Качество формализации нечётких данных	Отражает корректность вводимых данных (надёжность информации).
P8.2	Эффективность управления через лингв. правила	Оценивает производительность системы (оперативность принятия решений).

Шаг 2. Оценка удовлетворённости экспертов

Для оценки показателей проводится опрос пяти экспертов с различными ролями: технолог, контролёр, работник цеха, работник планово-диспетчерского бюро (ПДБ), представитель администрации цеха.

Субъективные оценки эффективности экспертов до и после внедрения для решений по ситуации 1 приведены в таблице П.Ж2.

Таблица П.Ж2 оценок до и после внедрения СППР по ситуации 1

Код показателя	Вес (%)	Оценка до внедрения	Оценка после внедрения	Улучшение	Суммарная оценка
P1.1	15	4	7	75%	5.5
P1.4	10	5	7	40%	6.0
P2.2	20	5	8	60%	6.5
P2.5	5	6	8	33%	7.0
P2.6	10	6	8	33%	7.0
P3.3	5	5	7	40%	6.0
P3.5	10	6	8	33%	7.0
P4.1	5	6	8	33%	7.0
P5.3	5	5	7	40%	6.0
P5.4	5	6	8	33%	7.0
P6.1	5	5	7	40%	6.0
P7.1	5	6	8	33%	7.0
P7.2	5	5	7	40%	6.0
P8.1	5	6	8	33%	7.0
P8.2	5	5	7	40%	6.0

Согласно данным из данной таблицы получим, что показателя удовлетворённости экспертов методом поддержки принятия решений (*Sat*) равен 85% или 0.85.

Шаг 3. Выбор метода свёртки

Для выбора метода свёртки воспользуемся показателями: точность, время оценки, сложность реализации, адаптивность и объяснимость результата. Для анализа используем таблицу многокритериального анализа (см. таблицу П.Ж3).

Таблица П.Ж3 Выбор методов свёртки по ситуации 1 методом многокритериального анализа

Показатель для выбора свёртки	Вес	Метод сумм	Метод суммы мест	Метод геометр. средней	Метод расстояний
Точность	5	2	5	4	5
Адаптивность	4	3	3	4	3
Сложность реализации	3	5	4	4	3
Время оценки	2	5	2	3	2
Объяснимость результата	5	2	5	3	4
Сумма баллов		57	78	69	76

Лучший метод свёртки – метод суммы мест (сумма равна 78).

Шаг 4. Присвоение весов показателям

Присвоим веса показателям на основе их значимости, учитывая *Sat*. Веса показателям присваиваются в %. Сумма весов равно 100%.

Шаг 5. Определение критериев эффективности

Зададим критерии эффективности на основе диапазонов значений обобщённого показателя (см. таблицу П.Ж4)

Таблица П.Ж4 Таблица критериев для оценки эффективности для СППР по ситуации 1

Лингвистическая оценка эффективности	Диапазон (%)
Очень низкий	<50
Низкий	50–70
Средний	70–90
Высокий	> 90

Шаг 6. Расчёт интегрального показателя

Расчёт обобщённого показателя выполняется по методу сумм, но сначала нужно определить $w_i S_i$ как разницу между оценками до и после внедрения (см. таблицу П.Ж5).

Таблица П.Ж5 Таблица расчёта показателей с учётом весов для ситуации 1

Код показателя	w_i	$S_i^{\text{до}}$	$S_i^{\text{после}}$	$S_i^{\text{улучш}}$	$w_i S_i^{\text{улучш}}$
P1.1	15	4	7	3	15·3=45
P1.4	10	5	7	2	10·2=20
P2.2	20	5	8	3	20·3=60
P2.5	5	6	8	2	5·2=10
P2.6	10	6	8	2	10·2=20
P3.3	5	5	7	2	5·2=10
P3.5	10	6	8	2	10·2=20
P4.1	5	6	8	2	5·2=10
P5.3	5	5	7	2	5·2=10
P5.4	5	6	8	2	5·2=10
P6.1	5	5	7	2	5·2=10
P7.1	5	6	8	2	5·2=10
P7.2	5	5	7	2	5·2=10
P8.1	5	6	8	2	5·2=10
P8.2	5	5	7	2	5·2=10

Подставляем значения в формулу $E = \frac{\sum_{i=1}^n w_i S_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$ и получаем $E = 85,25\%$

Шаг 7. Анализ сформированного обобщающего показателя

Обобщённый показатель эффективности внедрения СППР для ситуации 1 составляет 85.25%, что означает, что внедрение системы демонстрирует высокий уровень эффективности (по критериям из таблицы П.Ж4, диапазон 70-90%).

Проведём анализ чувствительности показателей (см. таблицу П.Ж6).

Таблица П.Ж6 Таблица анализа чувствительности показателей для ситуации 1

Код показателя	Изменение веса w_i	Новое значение показателя (%)
P1.1	+10	85.5
P1.4	-10	84.8
P2.2	+10	85.3
P2.5	-10	84.9
P2.6	+10	85.2
P3.3	-10	84.7
P3.5	+10	85.4
P4.1	-10	84.6
P5.3	+10	85.3
P5.4	-10	84.8
P6.1	+10	85.1
P7.1	-10	84.5
P7.2	+10	85.0
P8.1	-10	84.7
P8.2	+10	85.0

Анализ чувствительности показывает, что изменение весов отдельных показателей на $\pm 10\%$ незначительно влияет на интегральный показатель эффективности, что подтверждает устойчивость модели к небольшим колебаниям входных параметров.

Репрезентативность показателей рассматривалась путём анализа всех ключевых аспектов ситуации, включая экономические, технические и человеческие факторы.

Для того чтобы показатели были репрезентативными, они должны:

1. Охватывать ключевые аспекты системы обеспечения качества: уровень технологического развития, эффективность процессов, финансовые и экономические показатели, а также организационные и социальные аспекты.
2. Учитывать уровни управления качеством (продукт, процесс, система).
3. Отражать как количественные, так и качественные характеристики.

Проведём такой анализ показателей из таблицы 7.14:

1. Анализ ключевых аспектов системы обеспечения качества
 - уровень технологического развития позволяют оценивать P1.1 и P1.4;
 - эффективность процессов позволяют оценивать P2.2, P2.5, P2.6;
 - финансовые и экономические аспекты оценивают P5.3 и P5.4;
 - организационные и социальные аспекты покрывают показатели: P4.1, P6.1 и P7.2;
 - качество данных и работы системы, оценивается за счёт P3.3, P8.1, и P8.2.

2. Анализ показателей по уровням управления при обеспечении качества

Показатели охватывают три уровня управления:

- уровень продукта с показателями P1.1, P4.1, P5.3;
- уровень процесса, включающий показатели P2.2, P2.5, P2.6, P3.3, P3.5;
- уровень системы, который содержит P5.4, P6.1, P7.1, P7.2, P8.1, P8.2.

3. Анализ показателей по типу

Количественные показатели включают P1.1, P2.2, P2.5, P3.3, P5.3, P5.4.

Качественные показатели, в том числе: P1.4, P2.6, P3.5, P4.1, P6.1, P7.1, P7.2, P8.1, P8.2.

Баланс между количественными и качественными характеристиками обеспечивает всестороннюю оценку эффективности.

Таким образом, показатели из таблицы 5.16 полностью охватывают все значимые аспекты системы обеспечения качества.

Обобщённый показатель объективно отражает общую эффективность.

2. Анализ эффективности внедрения СППР для ситуации 2

Показатели для оценки эффективности приведены в таблице П.Ж7.

Таблица П.Ж7 Отобранные показатели для оценки эффективности по ситуации 2

Код	Показатель	Объяснение
A1	Уровень неопределённости данных	Оценка количества нечётких данных
A2	Адаптивность системы к изменениям	Гибкость системы при появлении новых условий
A3	Качество согласования решений между уровнями	Согласованность решений на разных уровнях управления
P2.1	Оперативность информации о текущей ситуации	Скорость обнаружения дефектов
P4.1	Уровень качества обслуживания клиентов	Удовлетворённость клиентов
P6.1	Уровень разрешения нетиповых ситуаций	Устранение нестандартных дефектов
P8.1	Качество формализации нечётких данных	Обработка лингвистических данных
P2.2	Достоверность информации о ситуации	Снижение ошибок в анализе данных
P7.2	Коэффициент синергии уровней	Снижение конфликтов между уровнями управления
P3.3	Доля ошибок в обработке информации	Оценка точности анализа системой
P5.3	Соотношение поступлений и выбытий	Отношение доходов к затратам
P5.5	Рентабельность предприятия	Эконом. эффект от снижения брака

A1, A2, A3 – дополнительные показатели.

Показатель удовлетворённости экспертов равен 79%.

Для свёртки показателей выбран метод расстояний.

Критерии эффективности на основе диапазонов значений обобщённого показателя приведены в таблице П.Ж8.

Таблица П.Ж8 Таблица критериев эффективности для оценки эффективности для СППР по ситуации 2

Оценка	Диапазон (%)	Оценка	Диапазон (%)
Очень плохо	меньше 30	Средний	60–70
Плохо	30–50	Высокий	70–85
Низкий	50–60	Очень высокий	85–95

Обобщённый показатель эффективности составляет 88%, что соответствует категории «Очень высокий» по таблице 7.18 (диапазон 85-95%).

Анализ чувствительности: изменение весов отдельных показателей на ± 10 –20% незначительно влияет на интегральный показатель эффективности, что подтверждает устойчивость модели к небольшим колебаниям входных параметров.

Выбранные для анализа эффективности показатели полностью охватывают все значимые аспекты системы обеспечения качества, поэтому обобщённый показатель объективно отражает общую эффективность внедрения СППР для ситуации 2.

3. Анализ эффективности внедрения СППР для ситуации 3

Показатели для оценки эффективности приведены в таблице П.Ж9.

Таблица П.Ж9 Отобранные показатели для оценки эффективности по ситуации 3

Код	Показатель	Объяснение
A1	Адаптивность системы к изменениям	Гибкость системы при появлении новых условий
A2	Качество согласования решений между уровнями	Согласованность решений на разных уровнях управления
P1.1	Уровень эффективной автоматизации процесса	Гибкость системы при появлении новых условий
P1.3	Уровень доверия к решениям системы управления	Уверенность персонала
P2.1	Оперативность информации о текущей ситуации	Скорость обнаружения дефектов
P2.3	Степень охвата данных аналитическими инструментами	Аналитика дефектов
P2.4	Качество моделирования прогнозируемых ситуаций	Прогнозирование рисков
P3.1	Предсказуемость управления	Систематизация решений
P3.3	Доля ошибок в обработке информации	Оценка точности анализа системой
P4.1	Уровень качества обслуживания клиентов	Удовлетворённость клиентов
P5.3	Соотношение поступлений и выбытий	Отношение доходов к затратам
P5.4	Уровень издержек	Оценка дополнительных затрат
P6.1	Уровень разрешения нетиповых ситуаций	Устранение нестандартных дефектов
P7.2	Коэффициент синергии уровней	Снижение конфликтов между уровнями управления
P8.1	Качество формализации нечётких данных	Обработка лингвистических данных

A1, A2 – дополнительные показатели.

Показатель удовлетворённости экспертов равен 83%

Для свёртки показателей выбран метод геометрической средней.

Критерии эффективности на основе диапазонов значений интегрального показателя приведены в таблице П.Ж10.

Таблица П.Ж10 Таблица критериев эффективности для оценки эффективности для СППР по ситуации 3

Оценка	Диапазон (%)	Оценка	Диапазон (%)
Очень плохо	< 30	Высокий	70–85
Плохо	30–50	Очень высокий	85–95
Низкий	50–60	Идеальный	> 95
Средний	60–70		

Обобщённый показатель составляет 87%, что соответствует категории «Очень высокий» согласно таблице 7.20 (диапазон 85-95%).

Анализ чувствительности показывает, что изменение весов отдельных показателей на $\pm 10\text{--}20\%$ незначительно влияет на интегральный показатель эффективности, что подтверждает устойчивость модели к небольшим колебаниям входных параметров.

Выбранные для анализа эффективности показатели в полной мере покрывают все важные аспекты системы обеспечения качества, а также учёт неопределённости и кросс-уровневых связей. Отсюда можно сделать вывод, что обобщённый показатель объективно отражает общую эффективность внедрения СППР для ситуации 3.

4. Анализ эффективности внедрения СППР для ситуации 4

Показатели для оценки эффективности приведены в таблице П.Ж11.

Таблица П.Ж11 Отобранные показатели для оценки эффективности по ситуации 4

Код	Показатель	Объяснение
A1	Устойчивость системы к межуровневым конфликтам	Снижение противоречий между уровнями управления (дополнительный показатель)
P1.1	Уровень эффективной автоматизации процесса	Гибкость системы при появлении новых условий
P1.3	Уровень доверия к решениям системы управления	Уверенность персонала
P2.1	Оперативность информации о текущей ситуации	Скорость обнаружения дефектов

Код	Показатель	Объяснение
P2.3	Степень охвата данных аналитическими инструментами	Аналитика дефектов
P2.4	Качество моделирования прогнозируемых ситуаций	Прогнозирование рисков
P3.1	Предсказуемость управления	Систематизация решений
P3.3	Доля ошибок в обработке информации	Оценка точности анализа системой
P4.1	Уровень качества обслуживания клиентов	Удовлетворённость клиентов
P4.3	Уровень лояльности потребителей	Средняя оценка качества работы предприятия от потребителей (дополнительный показатель)
P5.3	Соотношение поступлений и выбытий	Отношение доходов к затратам
P5.5	Рентабельность предприятия	Экономический эффект от снижения брака
P6.1	Уровень разрешения нетиповых ситуаций	Устранение нестандартных дефектов
P6.2	Точность лингвистической оценки	Совпадение лингвистических оценок СППР с экспертными суждениями
P7.1	Эффективность кросс-уровневых решений	Положительное влияние на смежные уровни управления
P7.2	Коэффициент синергии уровней	Снижение конфликтов между уровнями управления
P8.1	Качество формализации нечётких данных	Обработка лингвистических данных

A1 – дополнительный показатель.

Показатель удовлетворённости экспертов равен 87%.

Метод свёртки: Выбран метод расстояний (обоснование: высокая адаптивность и объективность, учёт неопределённости через сравнение с эталоном).

Критерии эффективности на основе диапазонов значений обобщённого показателя аналогичны приведенным в таблице 7.20.

Обобщённый показатель эффективности: 87% («Очень высокий» уровень согласно таблице 7.20).

Анализ чувствительности показывает, что изменение весов отдельных показателей на $\pm 10\text{-}20\%$ незначительно влияет на обобщённый показатель эффективности, что подтверждает устойчивость модели к небольшим колебаниям входных параметров.

Выбранные для анализа эффективности показатели в полной мере покрывают все важные аспекты системы обеспечения качества. Таким образом, обобщённый показатель объективно отражает общую эффективность внедрения СППР для ситуации 4.

Приложение II. Акты внедрения результатов диссертационной работы

1. Акт внедрения в компании ПАО «ОДК-УМПО» (2 стр.)

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель управляющего
директора ПАО «ОДК-УМПО»
Усачев В.А.
2025 г.



АКТ

об использовании в ПАО «ОДК-УМПО» результатов
докторской диссертационной работы
Конева Константина Анатольевича

Экспертная комиссия в составе: директор по ИТ Хамитов К.Р., заместитель директора по ИТ, к.т.н. Сапожников А.Ю., руководитель ЦК ИНФОР Рахимов А.Ф., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Конева К.А. «Методологические основы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе ситуационно-онтологического подхода», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук, были использованы в проекте разработки комплексной информационной системы управления контролем качества и брака (КИС УКБ) на ПАО «ОДК-УМПО».

Результаты диссертационной работы реализованы в виде системы поддержки принятия решений (СППР) на основе ситуационно-онтологического подхода и методологии интеллектуальной поддержки принятия решений. Внедрение затронуло ключевые процессы обеспечения качества: операционный контроль в производстве, изоляцию брака, анализ причин дефектов и принятие решений по бракованным деталям и сборочным единицам.

В основу СППР положены разработанные автором:

- теоретико-множественные модели ситуации, решения и сценарии;
- методы проектирования адаптивных инструментов, включая модель модульной архитектуры СППР, интеллектуальную подсистему обработки данных и метод межуровневого согласования онтологий;
- методология поддержки принятия решений на основе этих моделей, включая методику объяснимости решений, адаптированный метод цифрового следа, метод самообучения модели через обратную связь;

– комплексный метод интеграции ситуационно-онтологических моделей в бизнес-процессы предприятия, включая метод двунаправленного преобразования «OWL-СОП» и модель трёхуровневой системы верификации (синтаксис–семантика–прагматика).

Применение системы позволило добиться значительных улучшений в работе службы качества и производственных подразделений: сокращено время на анализ и принятие решений по дефектам на 60%, сокращено количество повторяющихся дефектов за счёт системного анализа причин и автоматического формирования корректирующих действий, сокращено время на согласование и актуализацию нормативной документации на 75% за счёт прямой связи между онтологическими моделями и регламентами, повысилась согласованность действий между цехами, БТК и инженерными службами, что снизило количество спорных ситуаций и пересмотров решений. Обеспечена прозрачность и прослеживаемость всех решений по качеству, что повысило готовность к внутренним и внешним аудитам, сократило время на подготовку доказательной базы.

Таким образом, внедрение результатов диссертационной работы Конева К.А. позволило создать интеллектуальную, объяснимую и самообучающуюся СППР, интегрированную в производственную среду ПАО «ОДК-УМПО». Система обеспечивает согласованность решений между уровнями управления, снижает риск субъективных ошибок и повышает эффективность управления качеством в условиях обширной номенклатуры и высокой сложности изделий. Результаты признаны эффективными, перспективными и могут быть применимы для тиражирования на других предприятиях корпорации.

Председатель комиссии:

Директор по ИТ


16.06.25 К.Р. Хамитов

Члены комиссии:

Зам. директора по ИТ, к.т.н.


16.06.2025 А.Ю. Сапожников

Руководитель ЦК ИНФОР


13.06.25 А.Ф. Рахимов

2. Акт внедрения в компании ОАО «АЙПЛ Консалтинг» (2 стр.)

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

Конева Константина Анатольевича

Экспертная комиссия в составе:

Жданов В.И., к.т.н., председатель, а также Демченко М.С. и Гаффарова А.Н., члены комиссии, настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Конева К.А. «Методологические основы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе ситуационно-онтологического подхода», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, легли в основу разработки и внедрения метода автоматической генерации детальных бизнес-сценариев на основе онтологической модели, в рамках проектов по внедрению информационных систем (Infor LN) на предприятиях – заказчиках ООО «АЙПЛ-Консалтинг».

1. Объект внедрения

Внедренным результатом является метод автоматической генерации детальных бизнес-сценариев (ДБС) на основе онтологической модели, построенной в формате OWL и интегрированной с DEM-моделями Infor LN, диаграммами ArchiMate и нормативными требованиями заказчика. Метод реализует ключевые положения диссертации, включая: метод двунаправленного преобразования OWL-онтологий и ситуационно-онтологических моделей, метод кросс-уровневого согласования онтологий, трёхуровневую верификацию (синтаксис–семантика–прагматика), методику объяснимости решений и адаптированный метод цифрового следа для непрерывного улучшения. Кроме того, при его разработке были применены принципы методологии интеллектуальной поддержки принятия решений на основе ситуационно-онтологического подхода.

2. Место и сроки внедрения

Результаты внедрены и апробированы в 2023-2024 гг. в рамках реализации следующих проектов, связанных с повышением эффективности контроля качества, управления браком и сценариями реализации решений по продукции в изоляторе брака («Построение Информационной Системы управления Сборочно-испытательным производством (СИП)», «Разработка Комплексной информационной системы управления контролем качества и браком (КИС УКБ)» и «Повышение эффективности литейного производства (ЛП)»).

3. Технологический контур внедрения

Метод интегрирован в существующую методологию проектирования и согласования документации разработка детальных бизнес-сценариев с использованием офисных программ (MS Word с использованием расширенного шаблона и т.д.), формирование задач, обсуждение, устранение замечаний, согласование в системе менеджере проекта (Jira), тестирование в тестовом окружении Infor LN, обратная связь и актуализация как напрямую, так и через цифровой след, интегрированный с онтологией.

Связь результатов в рамках метода автоматической генерации проектной документации из онтологической модели: метод двунаправленного преобразования OWL ↔ СОП обеспечивает синхронизацию онтологий с теоретико-множественными моделями, метод кросс-уровневого согласования устраняет противоречия между уровнями (продукт–процесс–система), а трёхуровневая верификация (синтаксис–семантика–прагматика) гарантирует корректность модели,

методика объяснимости формирует пояснения для шагов ДБС, повышая доверие и ускоряя согласование в Jira, а адаптированный метод цифрового следа фиксирует решения и замечания, обеспечивая непрерывное улучшение онтологии и автоматическую актуализацию шаблонов документации, что замыкает цикл самонастройки и тиражирования знаний.

4. Полученные результаты

Внедрение позволило достичь следующих показателей (рассчитано для 2-х проектов):

Показатель	До внедрения	После внедрения	Изменение
Среднее время подготовки бизнес-сценария	320 ч	170 ч	-47%
Количество итераций согласования ДБС с заказчиком	5–7	2–3	Снижение на 50–60%
Время на актуализацию документации при изменении требований	40–60 часов	10–15 часов	Сокращение на 70–75%
Доля повторяющихся замечаний при согласовании	Высокая (часто >30%)	Низкая (единичные случаи)	Снижение на 80%
Время на адаптацию новых проектных команд к методологии и контексту заказчика	3–4 недели	1–1,5 недели	Сокращение на 60–70%
Время на формирование ответа на запрос заказчика	8–12 часов	2–3 часа	Сокращение на 75%

5. Эффекты от внедрения:

- сокращение трудозатрат на разработку и согласование проектной документации на 40–50%;
- повышение качества и достоверности разрабатываемых ДБС;
- ускорение проектирования и повышение удовлетворённости заказчиков;
- формализация и автоматизация процесса накопления и передачи экспертных знаний;
- непрерывное улучшение методологии проектирования за счёт автоматической актуализации знаний на основе опыта реализованных проектов.

Таким образом, научные положения диссертации доказали свою практическую применимость и высокую эффективность. Метод автоматической генерации ДБС на основе онтологий признан стратегическим направлением развития и официально утверждён как стандарт методологии проектирования в ООО «АЙПЛ Консалтинг».

Председатель комиссии:

Генеральный директор ООО «АЙПЛ-Консалтинг», к.т.н. Жданов В.И.

Члены комиссии:

Руководитель отдела консалтинга, г. Уфа, Демченко М.С.

Ведущий консультант отдела консалтинга, г. Уфа, Гаффарова А.Н.



3. Акт внедрения в компании ООО «Газпромнефть – Цифровые решения» (2 стр.)

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель направления
Управления технологического
развития ООО «Газпромнефть – ЦР»

Дьячков А.С.

« 29 » 43 июля 2025 г.



**Акт о внедрении результатов диссертационной работы
Конева Константина Анатольевича**

Экспертная комиссия в составе:

Дьячков А.С., к.т.н., председатель, а также Усов Т.М. и Загидуллин Р.А. – члены комиссии, настоящим актом подтверждает, что научные результаты диссертационной работы Конева К.А. «Методологические основы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе ситуационно-онтологического подхода», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы для разработки и внедрения комплексного подхода к автоматизации проектирования и поддержке принятия решений в рамках цифровых проектов компании Газпромнефть – Цифровые решения.

Научные положения диссертации были применены при создании модулей интеллектуальной обработки данных и знаний для систем управления нефтегазовыми активами, включая разработку и тестирование решений в сфере искусственного интеллекта, программной роботизации процессов и интеграции гетерогенных данных. Внедрение осуществлялось в 2024–2025 годах в рамках реализации стратегических инициатив по развитию единого информационного пространства, повышению эффективности управления добычей и обеспечению качества операционных решений.

Центральным элементом внедрения стал метод автоматической генерации бизнес-сценариев на основе онтологической модели формата OWL, интегрированной с корпоративными стандартами и технологическими процессами, что позволило формализовать экспертные знания и сократить сроки разработки сценариев. Кроме того были использованы элементы из диссертации: двунаправленное преобразование моделей, трехуровневая верификация и кросс-уровневое согласование онтологий. Применение гибридных методов искусственного интеллекта обеспечило адаптацию системы к изменениям условий и работу в нестандартных ситуациях. Для повышения доверия к принимаемым решениям была реализована методика объяснимости решений, основанная на визуализации причинно-следственных связей через онтологические графы. Значимый эффект дало внедрение адаптированного метода цифрового следа, фиксирующего решения и замечания пользователей, что создало основу для непрерывного улучшения методологии проектирования и самообучения ИИ-систем и способствовало развитию направления компании в области искусственного интеллекта и автоматизации.

В результате внедрения достигнуты улучшения в процессах управления требованиями и сопровождения цифровых решений: время на формализацию и согласование спецификаций функциональности сократилось примерно на 50%, количество итераций при согласовании требований между заказчиком, аналитиками и командой разработки уменьшилось на 40-45%, время на актуализацию архитектурных моделей и документации при изменении нормативных или технологических требований

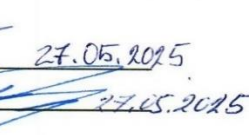
сократилось на 70–75%, снизилось на 35% число повторяющихся замечаний на стадиях тестирования и интеграции, сократилось на 30% время на адаптацию новых членов команд разработки и аналитиков.

Научные положения диссертации доказали свою практическую применимость и высокую эффективность в задачах формализации знаний, поддержки принятия решений и автоматизации проектирования. Подход изложенный в диссертационной работе признан перспективным и рекомендован к дальнейшему масштабированию в рамках развития платформы разработки информационно-аналитических систем и создания центров управления добычей.

Члены комиссии:

Усов Тимофей Михайлович

Загидуллин Руслан Айратович

 27.05.2025
 27.05.2025

4. Акт об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе (1 стр.)

УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по развитию образования
 ФБГОУ ВО Уфимский университет науки и технологий Рахманова Ю.В.
 « 30 » 06 2025 г.

АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

результатов диссертационной работы Конев Константина Анатольевича на тему
 «Методологические основы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе
 ситуационно-онтологического подхода», представленной на соискание учёной степени доктора
 технических наук в диссертационный совет 24.2.479.02.

Мы, нижеподписавшиеся составили акт о том, что следующие результаты диссертационной работы Конева К.А., а именно:
 методологии интеллектуальной поддержки принятия решений на основе ситуационно-онтологического подхода (семантический операционный процесс), включающая:

- модульную архитектуру СППР;
- метод подбора алгоритма принятия решений в зависимости от типа ситуации и уровня неопределённости;
- метод двунаправленной интеграции онтологий в документационное обеспечение;
- методику обеспечения объяснимости решений;
- адаптированный метод цифрового следа;
- адаптированный метод нечёткого вывода,

внедрены в учебный процесс кафедры автоматизированных систем управления и используются в учебном процессе по дисциплинам бакалавриата (09.03.01) «Теория систем и системный анализ», «Программная и системная инженерия» в виде деловых игр (форма лабораторных работ) и магистратуры (09.04.03) «Методологии исследования организационных систем» при разработке тем выпускных квалификационных работ магистров по направлению «Прикладная информатика». В результате подтверждена практическая применимость и воспроизводимость разработанной методологии СППР в учебной среде. Достигнуты значимые улучшения по ключевым метрикам: снижение ошибок интерпретации до 65%, рост согласованности решений до 0.93 (от 0 до 1), сокращение времени подготовки документов на 60%, повышение объяснимости до 4.8 баллов по 5-балльной шкале. Студенты освоили современные подходы к системному анализу, инженерии решений и управлению знаниями с использованием онтологий и ИИ. Научные результаты интегрированы в учебные планы и методические материалы кафедры. Использование материалов диссертационной работы обеспечивает формирование у студентов знаний о современных подходах интеллектуальной поддержки принятия решений в промышленности и бизнесе, давая возможность применения практических методов и инструментов для управления в неоднозначных ситуациях, что обеспечивает существенный рост качества учебного процесса.

Начальник управления развития
 образования

 /Г.Т. Гарипова/

Дата: « 27 » 06 2025 г.

Директор института информатики,
 математики и робототехники

 /О.А. Кривошеева/

Дата: « 27 » 06 2025 г.

Приложение К. Расширенный обзор связи задач и результатов исследования

1. Связь научных результатов показана в таблице П.К.1.

Таблица П.К.1 Связь научных результатов с промежуточными результатами

Результат	Связь с другими результатами	Промежуточные результаты	Фаза реализации
Ситуационно-онтологический подход к поддержке принятия решений	Формирует теоретическую базу для научных результатов, обеспечивая системность и устойчивость к информационным разрывам	ТММ ситуации, ТММ классификации решений, ТММ формализации правил принятия решений, метод дискретизации ситуаций на основе теории расписаний, метод анализа ПСС, адаптация метода PDCA	Теоретическая основа
Методы проектирования адаптивных инструментов	Опираются на теоретические основы из п.1 и реализуются как логически завершённые модули СППР, служат основой для построения архитектуры системы	Модульная архитектура СППР, метод подбора алгоритма принятия решений для ситуации, интеллектуальная подсистема обработки данных, метод кросс-уровневого согласования онтологий, адаптированный метод нечёткого вывода	Проектирование и архитектурная реализация
Методология поддержки принятия решений на основе СОП	Объединяет п.1 и п.2, обеспечивает реализацию СОП в виде программного решения, включает выбор метода, его применение и обратную связь	Метод применения методологии ИППР, методика объяснимости решений, метод визуализации ПСС, адаптированный метод цифрового следа, метод самообучения модели через обратную связь, иерархическая модель управления, методика согласования вывода СППР и ERP-системы на основе онтологической интеграции и цифрового следа	Разработка и программная реализация
Комплексный метод интеграции СОП-моделей в БП предприятия	Развивает п.3, обеспечивает интеграцию в информационную среду предприятия, что снижает ошибки интерпретации и ускоряет актуализацию знаний	Метод ДНП OWL ↔ модель СОП, модель трёхуровневой системы проверки (синтаксис–семантика–прагматика), метод поддержания актуальности модели, метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО	Интеграция в производство
Методика оценки эффективности методологии ИППР	Завершает цикл исследования, позволяет количественно и качественно оценить новизну и практическую ценность методологии	Алгоритм оценки апостериорной эффективности, методика согласования вывода между уровнями управления, методика комплексной оценки эффективности СППР	Оценка и экспериментальная проверка

2. Связь основных результатов показана на схеме, показанной на рис. П.К.1.

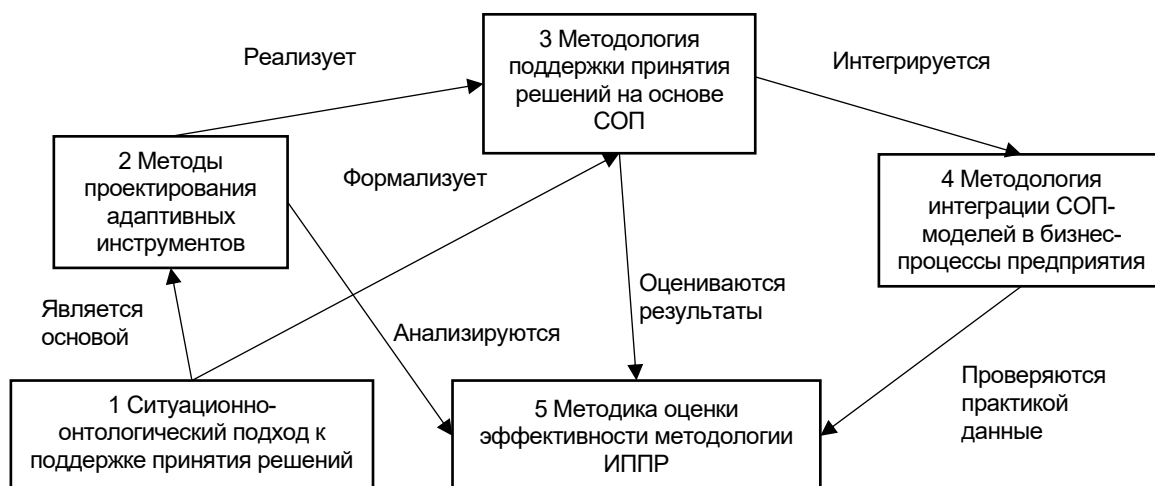


Рисунок П.К.1 – Связь между научными результатами

3. Связь основных результатов с проблемами исследования через метрики, показана в таблице Зкл.2.

Таблица П.К.2 Связь результатов диссертации с проблемами и метриками оценки

Результат	Связь с решаемыми проблемами	Метрики
Ситуационно-онтологический подход к поддержке принятия решений	Обеспечивает единую систему описания ситуаций и правил на всех уровнях управления, что устраняет разрозненность интерпретаций и способствует согласованности между экспертами и ЛПП	$IA, V^{DM}, \Delta E, T^{resp}, K^{agr}$
Методы проектирования адаптивных инструментов СППР	Позволяют гибко выбирать и комбинировать методы анализа в зависимости от типа ситуации и уровня неопределённости, что снижает риск ошибок из-за неполных или некорректных данных	$IA, V^{DM}, RPR, K^{agr}, XAI$
Методология поддержки принятия решений на основе СОП	Обеспечивает прозрачность и объяснимость решений, а также поддерживает самообучение системы через цифровой след, что повышает доверие и снижает зависимость от субъективных интерпретаций	$K^{rel}, XAI, T^{doc}, RPR, V^{akt}$
Комплексный метод интеграции СОП-моделей в БП и ДО предприятия	Обеспечивает актуальность знаний за счёт двунаправленной синхронизации онтологий и ДО, что позволяет оперативно реагировать на изменения в нормативах и процессах	$K^{agr}, K^{rel}, T^{doc}, V^{akt}, \Delta K$
Методика оценки эффективности методологии ИППР	Предоставляет универсальный инструмент для комплексной оценки качества решений, объединяя количественные и качественные показатели, что позволяет выявлять слабые места и управлять развитием СППР	Все метрики

4. Сводное описание промежуточных научных результатов приведено в таблице П.К.3.

Таблица П.К.3 Научные результаты, обосновывающиеся в диссертации

№ §	Промежуточные результаты	Тип результата	Описание	Новизна
Методологические основы ситуационно-онтологического подхода				
2.1.2	ТММ ситуации	Модель	Формализация компонентов через множества для описания ситуаций в управлении качеством	В отличие от классических моделей, интегрирует уровни продукта, процесса и системы в единую структуру – модель ситуации (2.1), обеспечивая системность анализа
2.1.5	ТММ классификации решений	Модель	Классификация по уровням неопределённости для выбора метода решения	Предложена универсальная таксономия решений по типам (типовые, нетиповые, кросс-уровневые), ранее не использовавшаяся в промышленных СППР
2.1.4	ТММ формализации правил принятия решений	Модель	Формализация переходов между уровнями управления через операции над множествами	Впервые применены теоретико-множественные операции для моделирования согласования правил между уровнями управления
2.1.3	Метод дискретизации ситуаций на основе теории расписаний	Метод	Преобразование непрерывных процессов в дискретные состояния для анализа	Адаптирован аппарат теории расписаний для дискретизации ситуаций, что обеспечивает универсальность при работе с динамическими процессами
2.2.1	Метод анализа ПСС	Метод	Выявление зависимостей между параметрами с помощью когнитивного моделирования	Валидация классических методов (например, диаграммы Исикавы) через онтологическое моделирование и логический вывод
2.2.3	Адаптация метода PDCA для динамических условий	Метод	Цикл PDCA, адаптированный под изменяющиеся условия и цифровой след	Впервые PDCA формализован в рамках ситуации (2.1) и интегрирован с цифровым следом для самообучения
Методы проектирования адаптивных инструментов СППР				
3.1.1	Модульная архитектура СППР	Архитектура	Поддержка гибкой интеграции модулей анализа, вывода и обратной связи	Предложена универсальная архитектура, позволяющая масштабировать СППР под разные типы ситуаций и уровни управления
3.2.2	Метод подбора алгоритма принятия решений для ситуации	Метод	Выбор метода на основе анализа уровня неопределённости и типа ситуации	Усиливает универсальность за счёт матрицы многокритериального выбора, учитывающей тип, уровень и неопределённость
3.3	Интеллектуальная подсистема обработки данных	Подсистема	Обработка структурированных и неструктурированных данных с помощью ИИ	Комбинирует машинное обучение и нечёткую логику для повышения точности анализа в условиях неопределённости
3.4	Метод кросс-уровневого согласования онтологий	Метод	Согласование онтологий разных уровней (продукт–процесс–система)	Расширяет подход Шведина за счёт Трёхуровневой проверки и двунаправленной интеграции
3.5	Адаптированный метод нечёткого вывода	Метод	Обработка нечётких формулировок из нормативов и практики	Синтезирует нечёткую логику с онтологическим моделированием, обеспечивая объяснимость и гибкость
Методология ИППР в сфере обеспечения качества на основе СОП				
4.1.1	Метод применения методологии ИППР	Метод	Пошаговое внедрение СОП в промышленную практику	Унифицирует ситуационный анализ, онтологии и теорию множеств в единый практический метод

№ §	Промежуточные результаты	Тип результата	Описание	Новизна
4.2	Методика объяснимости решений	Методика	Обеспечение прозрачности выводов СППР	Повышает доверие за счёт генерации пояснений с ссылками на нормативы и данные
4.2.1	Метод визуализации ПСС	Метод	Отображение связей в виде многослойных онтологических графов	Развивает интерпретируемый ИИ, делая причинные цепочки понятными для ЛПР
4.3.1	Адаптированный метод цифрового следа	Метод	Фиксация решений и их последствий для обучения модели	На основе цифрового следа реализует механизм самообучения, ранее не применявшийся в СППР
4.3.2	Метод самообучения модели через обратную связь	Метод	Динамическое обновление онтологий и правил	Обеспечивает непрерывное улучшение за счёт обратной связи, что отличает его от статических систем
4.4	Иерархическая модель управления	Модель	Формализация взаимосвязей между уровнями управления качества	Создаёт единую основу для системного анализа, устраняя разрыв между стратегией и операционным уровнем
4.4.3	Методика согласования вывода СППР и ERP-системы на основе онтологической интеграции и цифрового следа	Методика	Интеграция СППР с ERP на основе онтологий и цифрового следа	Гарантирует согласованность решений между уровнями управления и информационными системами
Методика оценки эффективности методологии ИППР в сфере обеспечения качества				
4.5.1	Алгоритм оценки апостериорной эффективности	Алгоритм	Оценка качества решений после их реализации	Использует нечёткие лингвистические переменные, что позволяет работать с субъективными оценками экспертов
4.5.2	Методика согласования вывода между уровнями управления	Методика	Формализация взаимодействия между уровнями управления	Улучшает интероперабельность и снижает риск противоречий в сложных организациях
4.5.3	Методика комплексной оценки эффективности СППР	Методика	Комплексный анализ по метрикам	Универсальный инструмент для количественной и качественной оценки СППР
Комплексный метод интеграции СОП-моделей в БП и ДО предприятия				
5.1.3	Метод ДНП OWL ↔ модель СОП	Метод	Автоматизация перевода между онтологией и ТММ	Обеспечивает двунаправленную синхронизацию, исключая рассогласование при обновлениях
5.2.2	Модель трёхуровневой системы проверки (синтаксис–семантика–прагматика)	Архитектура	Проверка соответствия на синтаксическом, семантическом и прагматическом уровнях	Задаёт новый стандарт достоверности для интеграции ДО и онтологий
5.3.4	Метод поддержания актуальности модели	Метод	Обновление онтологии при изменениях в нормативах или БП	Реализует автоматическую актуализацию через цифровой след, минимизируя задержки
5.4.2	Метод двунаправленной интеграции онтологий в ДО	Метод	Преобразование онтологий в документы и обратно	Универсализирует интеграцию, позволяя использовать онтологии как основу ДО