

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Пилипец Олег Олегович

**ПРИМЕНЕНИЕ ОНТОЛОГИИ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ**

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 2.9.8 Интеллектуальные транспортные системы

Научный
руководитель:

Зырянов Владимир Васильевич
доктор технических наук, профессор

Ростов-на-Дону - 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР НАПРАВЛЕНИЙ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, А ТАКЖЕ ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ ИТС	11
1.1 Обзор основных этапов развития интеллектуальных транспортных систем, анализ основных этапов развития в мире	11
1.2 Анализ подходов к стандартизации интеллектуальных транспортных систем, обзор основных стандартизирующих документов, определение основных перспектив регулирования	22
1.3 Анализ иностранного опыта интеграции программных и технических решений в процесс разработки интеллектуальных транспортных систем	29
2 ОСНОВНЫЕ МЕТОДИКИ РАЗРАБОТКИ ИТС С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	39
2.1 Критический анализ приоритетных направлений разработки интеллектуальных транспортных систем	39
2.2 Онтология как совокупность прикладных возможностей для повышения эффективности разработки архитектуры ИТС	52
2.3 Анализ основных методов и принципов онтологического моделирования при создании интеллектуальной транспортной системы	68
3 ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ РАЗРАБОТКИ ОНТОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СОЗДАНИИ АВТОРСКОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ	86
3.1 Онтология как инструмент создания базы знаний сферы интеллектуальных транспортных систем	86
3.2 Применение онтологического моделирования в рамках разработки архитектуры интеллектуальной транспортной системы	102
3.3 Интеграция логических правил на основе SWRL при моделировании регулирования дорожного движения при помощи технических средств	

организации дорожного движения	117
4 ОЦЕНКА ПРАКТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ РАЗРАБОТКИ БАЗЫ ЗНАНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ	129
4.1 Разработка методики проведения кластерной оценки результатов функционирования интеллектуальной транспортной системы на основе принципов онтологического моделирования	129
4.2 Разработка системы кластерной оценки интеллектуальной транспортной системы с применением принципов онтологического моделирования	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	147
ПРИЛОЖЕНИЕ А	161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современный этап развития интеллектуальных транспортных систем характеризуется существенными темпами разработки и использования приложений, платформ, сервисов, ориентированных на широкий спектр групп пользователей. Хотя предполагается, что они создаются в рамках общей архитектуры ИТС, на практике могут возникать затруднения при обеспечении интероперабельности этих компонентов и интеграции их в единую экосистему. Кооперативные ИТС, автономные транспортные средства и средства коммуникации также требуют высокого уровня оперативности, полной идентичности терминологии и содержательных понятий процессов, потоков данных, компонентов ИТС.

Несмотря на очевидные преимущества, в процессе развития ИТС в России возникают определенные проблемы, которые требуют глубокого анализа и критического осмысления. В развитии интеллектуальных транспортных систем в Российской Федерации присутствует противоречие между требованиями типизации ИТС и конкретными решениями для каждого локального проекта. В условиях урбанизации, возрастания требований к обеспечению мобильности, реализации управляющих воздействий в реальном режиме времени, необходимость внедрения инновационных решений, направленных на систематизацию, упорядочивание потоков данных и процессов, связанных с ее функционированием, становится неоспоримой. Одним из эффективных инструментов в решении данных проблем является применение методов Онтологии информационных систем. Данный подход позволит не только повысить эффективность транспортных процессов, но и упростить механизм разработки и внедрения ИТС.

В рамках данной диссертационной работы проведен анализ предметной области интеллектуальных транспортных систем в части структуризации и систематизации методик и подходов посредством применения инструментов Онтологии. Особое внимание уделено проблеме отсутствия комплексного

подхода к интеграции различных компонентов ИТС, влияющих на общую динамику развития этой области.

Таким образом, данная работа направлена на всесторонний анализ возможностей интеграции методов, подходов и инструментов онтологии информационных систем в процессы разработки, функционирования интеллектуальных транспортных систем в России. Интеграция вышеперечисленных подходов даст возможность выявить существующие проблемы, а также позволит разработать конкретные решения для их преодоления. В условиях глобальных вызовов и стремительного технологического прогресса, критический подход к онтологическому анализу разработки и функционирования ИТС становится особенно актуальным, что подчеркивает значимость и необходимость данного исследования.

Степень разработанности темы. Научным и практическим разработкам в области применения интеллектуальных транспортных систем в России и за рубежом, посвящены труды ученых Агуреева И.Е., Горева А.Э., Власова В.М., Донченко В.В., Дорохина С.В., Евстигнеева И.А., Евтюкова С.А., Ерёмина С.В., Жанказиева С.В., Зырянова В.В., Клявина В.Э., Новикова А.Н., Новикова И.А., Пугачева И.Н., Сильянова В.В., Трофименко Ю.В., Шевцовой А.Г., Wang F.-Y., Papageorgiou M., Ferreira J.C., Zhai J., Ito T. В результате этих исследований сформирована теоретическая, методологическая и прикладная основа интеллектуальных транспортных систем. Постоянно расширяющиеся потребности пользователей ИТС стимулируют расширение базы знаний ИТС, формируют новые направления к реализации сервисов ИТС. Одним из таких недостаточно используемых возможностей является применение онтологии для решения системных задач функционирования ИТС.

Цель работы - совершенствование методов создания интеллектуальных транспортных систем посредством применения онтологического моделирования и принципов построения семантических сетей.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ развития интеллектуальных транспортных систем, выявление приоритетных направлений эволюции ИТС, определение наиболее эффективных методик разработки базы знаний в рамках онтологии: выбор языка программирования, уровня базы знаний.
2. Сформировать основные научные методические принципы, заключающиеся в последовательности применения отдельных инструментов онтологического моделирования, а также семантическую сеть для повышения эффективности разработки архитектуры интеллектуальной транспортной системы, расширена сфера охвата области знания, на стыке ИТС и технологий семантического программирования.
3. Структурировать совокупность знаний (базу знаний), включающую в себя понятийный аппарат ИТС, а также задающей взаимосвязи и соподчиненность между ними (единой структуры разработки).
4. Разработать логико-математическую модель, которая позволит упростить интеграцию различных компонентов ИТС и ускорит развитие единого подхода к проектировке и разработки ИТС, а также произвести экспериментальную оценку практической эффективности модели.
5. Разработать методику кластерной оценки архитектуры ИТС на основе методов и отдельных показателей онтологического моделирования интеллектуальной транспортной системы.

Объект исследования – интеллектуальная транспортная система.

Предмет исследования – совокупность взаимосвязей между компонентами интеллектуальной транспортной системы.

Рабочая гипотеза состоит в том, что систематизация совокупности онтологических подходов и методик процесса разработки архитектуры интеллектуальной транспортной системы позволит открыть новые, а также расширить существующие возможности для более широкой группы как корпоративных пользователей, так и индивидуальных пользователей, а также повысить эффективность (снижение временных и финансовых затрат).

Научная новизна исследования:

— Интегрированы методы и инструменты онтологического моделирования в процесс разработки Интеллектуальной транспортной системы для применения наиболее эффективных научно-методических решений по отношению к приоритетным направлениям разработки;

— Сформированы основные научные методические принципы, заключающиеся в последовательности применения отдельных инструментов онтологического моделирования, а также семантических сетей для повышения эффективности разработки архитектуры интеллектуальной транспортной системы, расширена сфера охвата области знания, на стыке ИТС и технологий семантического программирования;

— Предложены алгоритмы для формирования и пополнения Базы знаний ИТС (идентификация и анализ, проверка на дубликаты, установка связей (слотов), валидация, сохранение), включающие в себя понятийный аппарат ИТС;

— Разработана логико-математическая модель, упрощающая интеграцию различных компонентов ИТС, обеспечивающая применение единого подхода к проектированию и разработке ИТС, который заключающегося в комплексе логических правил, а также произведена экспериментальная оценка практической эффективности модели;

— Разработана методика кластерной оценки архитектуры ИТС на основе методов и отдельных показателей онтологического моделирования интеллектуальной транспортной системы.

Теоретическая значимость работы заключается в систематизации совокупности онтологических подходов и методик процесса разработки архитектуры интеллектуальной транспортной системы, позволяет открыть новые, а также расширить существующие возможности для более широкой группы как корпоративных, так и индивидуальных пользователей, а также повысить общую эффективность системы.

Практическая значимость работы заключается в формировании подходов и методики разработки архитектуры и иных составляющих интеллектуальной

транспортной системы. Результаты, полученные в рамках проведения исследования носят прикладной характер и использованы для решения практических задач в части разработки интеллектуальной транспортной системы, что указано в актах (справках) о внедрении.

Методология и методы исследования. Диссертационная работа выполнена на основе научных исследований, проведенных ведущими учеными в области интеллектуальных транспортных систем, а также онтологии информационных систем. В диссертационной работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования, включающие системный анализ, математическую статистику, методы моделирования. Данные для проведения исследования получены в ходе статистического анализа данных, результатов тестирования разработанной программы (тест).

Положения, выносимые на защиту:

1. Предметная область онтологии информационных систем в сфере интеллектуальных транспортных систем, научно-методические принципы интеграции инструментов онтологии в процесс разработки и изменения архитектуры интеллектуальной транспортной системы.
2. Методические принципы применения инструментов разработки базы знаний онтологии информационных систем по отношению ИТС.
3. Алгоритмы формирования и пополнения базы знаний ИТС задающие взаимосвязь и соподчиненность между ними.
4. Логико-математическая модель, на основе иерархической структуры для интеграции различных компонентов ИТС, а также практическая эффективность модели.
5. Методика кластерной оценки архитектуры ИТС на основе методов и отдельных показателей онтологического моделирования интеллектуальной транспортной системы.

Степень достоверности и апробация результатов.

Обоснованность и достоверность, положений диссертации, выносимых на защиту, обеспечиваются применением методики исследования на основе

современных онтологических методов, апробацией исследования на международных конференциях.

Основные результаты диссертационной работы обсуждались на следующих практических конференциях: XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Авангард цифровой трансформации государственного администрирования: стратегии, технологии, эффективность» (Москва, 2023 г.), X международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и инновации на транспорте» (Орёл, 2024 г.); Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные транспортные системы в дорожном комплексе» (ИТС-2024) (Белгород, 2024 г.), XI Международная научно-практической конференция «Информационные технологии и инновации на транспорте» (Орёл, 2025 г.), Международная научно-практическая конференция «Интегрированные транспортные решения: вызовы современности и перспективы будущего» (Краснодар, 2025 г.).

Информационная база исследования: нормативные и методические материалы. Международные стандарты (ISO), национальные стандарты Российской Федерации, отраслевые дорожные методические документы. Целевые программы развития уровня цифровизации России, статистические данные.

Личный вклад автора. Все основные результаты исследования, а также наиболее эффективные методы, подходы к интеграции инструментов разработки онтологии в рамках разработки архитектуры интеллектуальной транспортной системы.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности. Выполненные исследования отвечают формуле паспорта научной специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы по пункту 1 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач управления транспортными системами, процессами и транспортными средствами» и пункту 3 «Формализованные методы обработки, анализа и передачи информации в интеллектуальных транспортных системах, применение информационных, телематических и биоинформационных технологий для управления

транспортными системами, процессами и транспортными средствами».

Публикации. По теме исследования опубликовано 9 работ, отражающих основные положения исследования, среди которых 3 публикации из перечня рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций общим объемом 2,07 п.л., 2 публикации в изданиях, включенных в зарубежную аналитическую базу данных Scopus и Web of Science общим объемом 1,5 п.л., а также – 4 публикации в журналах, индексируемых РИНЦ, общим объемом 1,84 п.л.

Структура и объем работы диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 164 страниц текста, 5 таблиц, 28 рисунков, литературный список включает 116 наименований.

1 ОБЗОР НАПРАВЛЕНИЙ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, А ТАКЖЕ ЭТАПОВ РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРЫ ИТС

1.1 Обзор основных этапов развития интеллектуальных транспортных систем, анализ основных этапов развития в мире

Интеллектуальная транспортная система, являясь инструментом, включает в себя все механизмы и алгоритмы управления транспортной системой, при этом, представляет собой ключевой драйвер эволюции и изменений транспорта в целом. Организация дорожного движения, а также управление транспортным комплексом с точки зрения интеллектуальной транспортной системы оказало значительное влияние на современную транспортную среду, таким образом, первые исследования в области технологий подключенных транспортных средств показали, что системы безопасности, интегрированные в ИТС способны устранить до 80 процентов дорожно-транспортных происшествий, вызванных столкновениями автотранспортных средств за счет наличия связи между ними (V2V- связь). [1]

По мере продвижения исследований, разработки и внедрения, передовые ИТС решения будут приносить еще больше пользы, как в плане мобильности, так и экологии, безопасности и других сферах жизни. Сфера ИТС постоянно развивается, при этом прогресс имеет не только технологический аспект, но и общественный, а также наблюдается рост вовлеченности бизнеса в процессы интеграции и развития ИТС. Интеллектуальные транспортные системы стали катализатором углубления взаимодействия и усиления отношений между частным бизнесом и государством, такая синергия становится катализатором развития новых технологий, такой формат партнерства имеет решающее значение для успеха ИТС. В данном контексте обретает особую актуальность анализ этапов развития интеллектуальных транспортных систем, так как для определения новых векторов развития необходимо иметь полное представление о том, «откуда мы пришли». Наиболее интересными для рассмотрения, по нашему мнению, являются этапы развития интеллектуальных систем следующих государств: Российская

Федерация, Китайская Народная Республика, Соединенные Штаты Америки, Япония.

США обладает большим опытом в сфере разработки и внедрения инноваций в области ИТС, первые центры управления дорожным движением (ЦУДД) появились в Северной Америке в начале 1980-х. Функциональная особенность центра управления дорожным движением заключается в том, что происходит сбор и обработка данных дорожной сети (участков автодорог), такие как: погода, скорость, загруженность, происшествия и чрезвычайные события. В свою очередь, собранные данные компилируются с другими оперативными и контрольными данными и распределяются среди пользователей системы. Сотрудники ЦУДД используют эту информацию для мониторинга и управления дорожным движением, вспомогательными службами и иной инфраструктурой того или иного участка дорожной сети. В сущности, ЦУДД - это оперативный центр, где органы государственной власти координируют свои действия в случае дорожных ситуаций и инцидентов, при этом, зачастую роль ЦУДД выходит за пределы сети автострад. [2]

В рамках развития ИТС в США, именно ЦУДД является ключевым техническим и институциональным центром, объединяющим различные юрисдикции, интересы бизнеса, а также поставщиков услуг, так как в совокупности эти организации могут сосредоточиться на достижении общей цели - оптимизации работы транспортной системы.

Следующим этапом в развитии интеллектуальных транспортных систем, да и в жизни человечества в целом, стало появление глобальной системы позиционирования (GPS), которая состоит из сети спутников, которые передают сигналы на GPS-приемники. Сигналы содержат временной код и географические данные, которые позволяют пользователям точно определить свою скорость, местоположение и время. Изначально GPS была разработана для военных и разведывательных целей в 1960-х годах, в разгар холодной войны. В 1980-х годах GPS была выпущена для использования в гражданских целях. [3]

В 1990-х годах использование GPS в гражданских целях стало более

доступным и приемлемым. Сегодня миллионы пользователей полагаются на GPS, чтобы с высокой точностью ориентироваться на суше, в воздухе или на море. Водители могут использовать автомобильные портативные навигационные устройства для поиска наиболее экономичного маршрута, поиска путей объезда и даже получения предупреждений о дорожных происшествиях или предупреждений о расположении камер слежения. [4]

В то же время, история возникновения российской системы геопозиционирования – ГЛОНАСС, начинается с запуска первого искусственного спутника Земли в СССР 4 октября 1957 года. В 1955–1957 годах в Ленинградской военно-воздушной инженерной академии им. А. Ф. Можайского под руководством профессора В. С. Шебшаевича проводились исследования возможностей применения радиоастрономических методов для самолетовождения. В 1963 году начались опытно-конструкторские работы над первой отечественной спутниковой навигационной системой, получившей в дальнейшем название «Цикада». В ноябре 1967 года выведен на орбиту первый навигационный отечественный спутник («Космос-192»), а в 1979 году была сдана в эксплуатацию навигационная система 1-го поколения «Цикада» в составе четырёх навигационных спутников, находящихся на круговой орбите высотой 1000 км. [5]

Система ГЛОНАСС была разработана по заказу Министерства обороны СССР. 12 октября 1982 года на орбиту был запущен первый спутник ГЛОНАСС «Ураган». 4 апреля 1991 года спутниковая группировка ГЛОНАСС уже включала 12 космических аппаратов, летающих в двух орбитальных плоскостях, при этом, 24 сентября 1993 года система ГЛОНАСС была официально принята в промышленную эксплуатацию. С 2017 года в Российской Федерации установка системы Эра-ГЛОНАСС, в соответствии с постановлением Правительства РФ от 25 августа 2008 г. N 641 «Об оснащении транспортных, технических средств и систем аппаратурой спутниковой навигации ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS» стала обязательной для легковых транспортных средств, автобусов категории М2 и М3, а также грузовых автомобилей категории N2 и N3. [6]

Японским аналогом GPS и ГЛОНАСС является QZSS (Quasi-Zenith Satellite

System), которая была разработана в 2003 году и предназначена для мобильных приложений, для предоставления услуг связи (видео, аудио и другие данные) и глобального позиционирования. Кроме того, совмещает в себе следующий функционал: - передача поправок и информации целостности, рассчитанных по измерениям сети наземных станций; - обеспечение связи и передача данных в условиях плотной городской застройки и гористой местности; - передача текстовых сообщений, в том числе — оповещений в случае чрезвычайных ситуаций и стихийных бедствий. [7]

Китайская система глобального позиционирования — BeiDou (BeiDou Navigation Satellite System), разработана в 1994 году. В переводе с китайского — «Северный ковш», название созвездия Большой Медведицы. Последняя версия китайской системы глобального позиционирования - BeiDou-3 (2015 — настоящее время), представляет собой полноценную глобальную навигационную систему с 35 спутниками на орбите, обеспечивающими покрытие всей планеты. Бэйдоу установлена более чем на 6.5 миллионах единиц коммерческого автомобильного транспорта в Китайской Народной Республике. [8]

Системы геопозиционирования позволяют использовать географические информационные системы (ГИС), которые хранят, анализируют и отображают информацию о местонахождении, скорости и других параметрах в режиме реального времени. Существует большое количество сценариев применения геоинформационной системы в ИТС, однако, наиболее распространенным является - отслеживание местоположения транспортных средств, что позволяет соблюдать график движения и информировать пассажиров о точном времени прибытия и т.д. Системы массового транзита используют эту возможность для отслеживания автобусов и других видов рейсового транспорта, выполняющего маршрут. Необходимо отметить, что геоинформационные системы на базе систем геопозиционирования получили широкое распространение благодаря большинству действующих в сфере транспорта лиц (гос. Органы, частные компании и т.д.). [9]

На данный момент, GPS — неотъемлемая часть интеллектуальной транспортной системы, поскольку он обеспечивает повышенную эффективность и

безопасность на автомагистралях, улицах и в системах массового транспорта. Благодаря высокоточным генерациями GPS появляется множество новых возможностей, например, мгновенные автопулы, которые в режиме реального времени подбирают попутчиков к близлежащим автомобилям. [10]

В США, в конце 1960-х годов, со стороны государства возник интерес к возможностям робототехники, в частности агентство перспективных оборонных исследовательских проектов США (DARPA) финансировало проект Стэнфордского исследовательского института по созданию первого мобильного робота. В 1970 году один из аспирантов инженерного факультета разработал тестовую передвижную платформу, именуемую Stanford Artificial Intelligence Laboratory Cart с целью изучения возможностей управления луноходом со станции управления на Земле. [11]

В течение последующих 46 лет Стэнфордская тележка неоднократно перестраивалась для использования в различных целях. В 1979 году Стэнфордская тележка вошла в историю мобильной робототехники, когда автономно преодолела комнату, заставленную стульями. Робот, получивший имя Shakey, должен был выполнять задачи навигации и разведки с помощью различных датчиков, дальномеров и телевизионной камеры, проект установил функциональные и эксплуатационные основы для мобильных роботов. Навигационные и сенсорные функции, которые используют мобильные роботы, были разработаны и перенесены в такие технологии, как подключенные и автоматизированные транспортные средства, таким образом, исследования в области робототехники сыграли важную роль в развитии многих технологий ИТС. [12]

Вместе с тем, в 1957 году, в СССР был разработан первый прототип экспериментального комплекса автономного движения поездов пригородного назначения, совмещающий в себе принципы робототехники, а также искусственного интеллекта. Кроме того, одним из первых и наиболее выдающихся проектов в Советском союзе в области робототехники стал проект «Автономный подводный аппарат» (АПА) в 1966 году. [13]

На данный момент наиболее перспективным и широко применяемым

примером интеграции робототехники и искусственного интеллекта в Российской Федерации является беспилотный автомобильный транспорт, который является неотъемлемой частью интеллектуальных транспортных систем. В 2018 году появились первые беспилотные транспортные средства, ПАО «ГАЗ», ПАО «КАМАЗ», ПАО «Сбербанк», а также ООО «Яндекс» стали первыми компаниями, заинтересованными в интеграции беспилотных транспортных средств как в перевозку пассажиров, так и грузов. [14] С 2023 года стартовали первые коммерческие перевозки с использованием беспилотного грузового транспорта на Федеральной автомобильной дороге М-11 «Нева» Москва – Санкт-Петербург. [15]

В Японии, в 1977 году, Машиностроительной лабораторией Цукубы, был создан первый в мире беспилотный автомобиль. Он оснащен двумя камерами и аналоговой компьютерной технологией для обработки сигналов, при этом его максимальная скорость движения составила 30 километров в час. Кроме того, Япония применяла робототехнику, автоматизацию и искусственный интеллект в железнодорожном транспорте, таким образом в 1981 году появилась первая автономная железнодорожная линия. Кроме того, в 2019 году сообщалось, что компания Sotetsu Bus и Университет Гунма запустили в Иокогаме первый в стране большой автобус с беспилотным управлением. Он курсировал между водным садом Сатояма и зоопарком Иокогамы, расстояние между конечными точками составляло 900 метров, а максимальная скорость была ограничена 20 км/ч. В 2023 году сообщалось, что в Японии состоялся официальный запуск первого в стране полностью беспилотного общественного транспорта. Это произошло в городке Эйхейдзи, префектура Фукуи. По нему стали ездить небольшие автобусы с четвертым уровнем автономности [16].

История применения технологий искусственного интеллекта и робототехники в транспорте ознаменована появлением беспилотного транспорта. Национальный университет оборонных технологий КНР в 1980-х годах стал первопроходцем в области беспилотного транспорта, в 1989 году университет разработал первый «умный» автомобиль в Китае, чуть позднее в 1992 году этот же институт создал первый беспилотный автомобиль [17]. Сам беспилотный

автомобиль представлял собой цельнометаллический фургон среднего размера, в который установили компьютерную систему автоматического вождения, состоящую из компьютера, датчика обнаружения и гидравлической системы управления. К началу 2020 года в общей сложности 20 провинций Китая разработали и опубликовали стандарты тестирования автомобилей, оборудованных автономной системой вождения. Тестирование беспилотных автомобилей началось в шести китайских городах, включая Пекин и Шанхай, Гуанчжоу, Чанша, Ухань и Цанчжоу.[18]

Точкой возникновения масштабных изменений в подходах к развитию транспортной отрасли в направлении создания интеллектуальных транспортных систем стали 1980-е годы. [19] Стало очевидно, что развитие технологий, изменение экономических условий привело к устареванию существующих методов и подходов к транспортной отрасли. Устаревшие транспортные программы, которые уже давно действовали, стали казаться менее подходящими для будущего, и как в СССР, так и в США, Японии и Китае начали пересматривать свое отношение к транспорту. Изменилась приоритетность, безопасность, экономичность и охрана окружающей среды стали все чаще оказываться в центре внимания транспортной политики. [20]

В этом десятилетии, в США, возникает термин «интеллектуальная система автомобильных дорог» (intelligent vehicle highway system - IVHS), который описывает группу технологий (включая обработку информации, связь, управление и электронику), соединяющих транспортные средства с инфраструктурой для повышения безопасности и эффективности транспортных систем, при этом, по сути, представляя собой предтечи современных ИТС. В течение этого десятилетия не существовало официальной национальной программы IVHS. [21] Однако большая часть работы, сделанной в 1980-х годах, заложила основу для нынешнего и будущего состояния и развития ИТС, а также позволила разработать и внедрить передовые технологии во всех транспортных областях в последующие десятилетия.

В 1980-х годах наметилась одна наиболее интересная и, как оказалось,

перспективная тенденция - в США, СССР, КНР и Японии промышленные исследования были сосредоточены на потенциальных способах применения новых технологий на транспорте в виде концепций IVHS (прообраз современных ИТС). [22] Таким образом, в течение этого десятилетия несколько университетов начали официальные исследовательские программы, направленные на разработку передовых технологий в наземном транспорте.

В США Калифорнийская программа по передовым технологиям для автодорог стала наиболее заметной среди этих программ. PATH была основана в 1986 году как сотрудничество между Калифорнийским университетом в Беркли и Департаментом транспорта Калифорнии (Caltrans), и до сих пор является примером передовой исследовательской площадки. [23] Вместе с тем, Министерство транспорта США финансировало скромную программу университетских исследований и собственных исследований «автоматизированных систем автомобильных дорог».

В конце 70-х годов в СССР появилась первая отечественная интеллектуальная транспортная система — АРДАМ (автоматизированное регулирование движения на автомобильных магистралях). [24] Основными задачами системы были сбор, анализ и переработка информации об условиях движения транспортных средств на дорогах. На основе полученных данных АРДАМ выбирала наиболее разумные режимы движения и обеспечивала их посредством вывода инструкций на регулируемые знаки и сигналы, а также указаний различным дорожным службам. [25] Кроме АРДАМ, в СССР разработали систему диспетчерского управления движением «Диспут». Её отличие от АРДАМ в том, что она не требовала электронно-вычислительных машин, а управление периферийным оборудованием было возможно только при помощи команд диспетчера. [26]

Япония — одна из первых стран в мире, которая в 1973 году приступила к проведению исследований по интеллектуальным транспортным системам (ИТС) и реализации комплексной системы управления автомобильным транспортом. [27] В 70-е годы XX века в Токио были проблемы с постоянными дорожными заторами,

ухудшением экологической ситуации, повышенной аварийностью, травматизмом и смертностью на дорогах. Это было связано с тем, что практически каждый японец обзавёлся автомобилем, а существующая дорожная сеть не справлялась. В связи с этим возникла необходимость в создании первых систем, схожих с ИТС по функционалу и задачам. [28]

В Китайской Народной Республике, в 1997 году, Министерство коммуникаций приступило к разработке и развитию интеллектуальной транспортной системы (ИТС), был создан Национальный центр инжиниринга и технологий ИТС. Первоочередным проектом в сфере ИТС в Китае была система сбора платежей на платных дорогах, к декабрю 2006 года было запущено 160 систем электронной оплаты проезда на 64 скоростных автомагистралях с общей протяжённостью 3200 километров. [29]

В США, в конце 1980-х лидеры отрасли, заинтересованные в новых технологиях на транспорте, организовали серию официальных отраслевых встреч, направленных на эволюцию транспорта, в дальнейшем, этот групповой диалог перерос в Mobility 2000, [30] созданную в 1989 году как группу, которая должна была представлять ту точку зрения, которая поддерживает внедрение новых технологий при формировании транспортной политики. Mobility 2000 была преимущественно волонтерской организацией и не имела официальных полномочий, однако она сыграла важную роль в объединении сторонников из различных сфер и организаций, включая правительства штатов и федеральные органы власти, промышленность, консалтинг и научные круги, чтобы представить перспективы применения новых технологий при формировании политики. Данная программа активизировала поддержку национальной программы IVHS, кроме того, организация сыграла важную роль в формулировании терминологического определения IVHS и содействовала созданию IVHS America (в настоящее время называется Intelligent Transportation Society of America, или ITS America) [31].

Как правило, основным звеном транспортной системы является инфраструктура, в том числе система межштатных автомагистралей, считавшаяся центральным элементом традиционного совершенствования транспорта. В рамках

деятельности, направленной на развитие и совершенствования инфраструктуры (автодороги, улично-дорожная сеть) на постоянной основе осуществляется поиск новых технологий, а также направлений совершенствования транспорта. Таким образом, в США был создан первый стратегический план «Интеллектуальные транспортные средства - дорожные системы», подготовленный IVHS America в 1992 году [32].

В заданный период времени все больше внимания уделялось потенциалу новых технических разработок как в сфере транспорта, так и за ее пределами. Быстрое совершенствование технологий открывало новые возможности для создания более безопасной и эффективной транспортной системы благодаря достижениям в области детекции и вычислительных технологий. Ключевая проблема этого десятилетия заключалась в том, как осознать ценность и внедрить новые технологии в транспортную систему, которая обладает колоссальным спектром сценариев работы, и целым рядом особенностей функционирования. Диалог между приверженцами транспортного движения и заинтересованными сторонами привел к тому, что Концепция IVHS была включена в основное русло обсуждений транспортной политики.

Следующим шагом в интеграции новых подходов к реализации транспортной политики США стало государственное обязательство по институционализации ИТС. Данный этап развития заложил основу для федеральной программы ИТС США и старт государственно-частного партнерства в сфере ИТС. Под эгидой IVHS и Mobility 2000 объединены исследователи из США и Европы, их объединение началось с конца 1980-х годов, в состав группы также вошли были представители европейской программы «Прометей». [33]

Со временем IVHS America была переименована в ITS America, инициаторами данных изменений стали: ASHTO, Совет по транспортным исследованиям (TRB), Институт инженеров транспорта и HUF. Параллельно с изменением в IVHS America, в 1991 году президентом Джорджем Бушем был подписан Закон об эффективности наземного транспорта (Intermodal Surface Transportation Efficiency Act of 1991, ISTEA). [34] ISTEA был признан первым

транспортным законопроектом эпохи после создания межгосударственных перевозок и установил политику, которая признала смещение акцента с создания системы наземного транспорта на оперативное управление и обслуживание этой системы, а также важность поощрения развития и применения передовых технологий ИТС. [35] План, предусмотренный данным законом должен был послужить шаблоном для будущей концепции полностью автоматизированной системы автомагистралей, которая будет поддерживать и стимулировать совершенствование технологий транспортных средств и автомагистралей. Таким образом была создана объединенная программа интеллектуальных транспортных систем (ITS), одним из ключевых направлений деятельности, которой в указанный период времени было установление определенной степени стандартизации в рамках ИТС.

В середине 1990-х годов, Япония опираясь на опыт аэрокосмической отрасли, разработала и стандартизировала национальную системную архитектуру и стандарты для обеспечения совместимости и скоординированного национального подхода. Архитектура систем, включенных в данную программу состоит из трех уровней: коммуникационный уровень обеспечивает точный и своевременный обмен информацией между системами; транспортный уровень определяет транспортные решения с точки зрения подсистем и интерфейсов, а также базовой функциональности и требований к данным для каждой транспортной услуги; институциональный уровень включает в себя институты, политику, механизмы финансирования и процессы, необходимые для эффективной реализации. [36]

Национальная архитектура ИТС обеспечивает основу, которая связывает транспортный и коммуникационный миры вместе в конкретные приложения. Приложения ориентированы на конкретную пользовательскую услугу - например, информирование путешественников, сообщения на дорожных знаках, измерение скорости движения, электронная оплата проезда или системы безопасности транспортных средств. В любом конкретном случае ИТС сочетаются с конкретными действиями агентства в режиме реального времени, составляя

проекты и программы по управлению и эксплуатации транспортных систем. Кроме того, технологии ИТС составляют технологическую основу нового транспортного фронта - автоматизации транспортных средств и подключенных автомобилей, которые обеспечивают значительные преимущества в плане мобильности и безопасности. [37]

В 1996 году Министерство транспорта США внедрило программу стандартов в сфере ИТС, чтобы способствовать широкому использованию технологий ИТС в системах наземного транспорта страны. Данная программа, посредством взаимодействия с научными организациями, интегрированными в разработку стандартов, а также государственными учреждениями, инициировала процессы, направленные на ускорение разработки открытых стандартов коммуникационных интерфейсов ИТС. Дальнейшее применение стандартов определило, вектор развития интеллектуальных транспортных систем, а также составных частей и компонентов этих систем. Последовательное и повсеместное использование стандартов ИТС позволило обмениваться данными и информацией между государственными учреждениями и частными организациями, заинтересованными в функционировании транспортного комплекса. [38]

1.2 Анализ подходов к стандартизации интеллектуальных транспортных систем, обзор основных стандартизирующих документов, определение основных перспектив регулирования

В сущности, интеллектуальные транспортные системы представляют собой интеграцию информационных, коммуникационных и управленческих технологий в транспортную инфраструктуру. При этом, основываясь на вышеперечисленных направлениях, внедрение и интеграция ИТС требует унифицированных стандартов и регуляторных рамок. Таким образом, рассмотрим ключевые международные, региональные и национальные документы, регулирующие ИТС, а также их цели, структура и проблемы гармонизации. [39]

Основой международного технического регулирования в сфере ИТС является семейство международных стандартов ИТС - ISO (International

Organization for Standardization) 14813-14819. [40] Именно эти стандарты определяют архитектуру ИТС, включая модели данных, протоколы связи и требования к безопасности. Перечень стандартов ISO 14813 содержит требования и образец эталонной архитектуры ИТС и включают несколько частей:

-ISO 14813-1:2015, (на данный момент отозван) определяет 13 сервисных доменов ИТС, таких как управление трафиком, безопасность и экологические услуги. Каждый домен включает в себя группу сервисов, адаптированных для кооперативных интеллектуальных транспортных систем; [41]

— ISO 14813-5:2020, (актуален) устанавливает правила разработки интерфейсов между подсистемами и элементами ИТС, стандартизирует терминологию и требования к описанию архитектуры, что критично для совместимости систем; [42]

— ISO/TR 14813-2:2000 и ISO/TR 14813-3:2000, (оба отозваны) описывали базовую архитектуру TICS (Transport Information and Control Systems), а также примеры её применения, однако устарели из-за развития технологий. По сути, являлись частью нормативно-правового механизма унификации архитектурных решений для ИТС и поддержки разработки стандартов через ISO/TC 204; [43]

— ISO 14816, регулирует автоматическую идентификацию транспортных средств и оборудования, включая структуру данных и нумерацию, связан с RFID-технологиями и используется для управления логистикой и отслеживания транспорта, интеграции с системами радиочастотной идентификации. [44]

— ISO 21217, задает требования к коммуникационным технологиям для кооперативных интеллектуальных транспортных систем (C-ITS). Технический комитет, отвечающий за стандарты в области телематических технологий и управления транспортным комплексом. [45]

— ISO/TC 204, изложены основные требования к системам информации, связи и управления в сфере наземных автомобильных перевозок, в том числе рассматривают вопросы интермодальных и мультимодальных аспектов перевозки. Данный технический комитет, отвечает за стандарты в области телематики и управления транспортом, в частности, управление информацией для

путешественников, управление движением, общественный транспорт, коммерческий транспорт, аварийные службы и коммерческие услуги в области интеллектуальных транспортных систем. [46]

— Директива 2010/40/EU, устанавливает правовую основу для внедрения ИТС в ЕС, акцентируя внимание на интероперабельности и защите персональных данных. Одной из приоритетных целей данного регулирующего документа является стимулирование процессов разработки инновационных транспортных технологий для создания интеллектуальных транспортных систем, подразумевается, что это будет достигнуто за счёт внедрения общих стандартов и спецификаций Европейского союза (ЕС). Они направлены на создание эффективных услуг ИТС, позволяя при этом отдельным государствам-членам ЕС решать, в какие системы инвестировать. [47] Кроме того, существует директива о внесении изменений Директиву 2010/40/ЕС – [ЕС/2023/2661](#), она пересматривает и обновляет часть требований, адаптируя 2010/40/ЕС к подключённой и автоматизированной мобильности, приложениям для мобильности по запросу и мультимодальным перевозкам. Кроме того, расширяется сфера действия первоначальной директивы, вышеуказанные изменения ведут к тому, что мобильность в рамках работы ИТС должна стать более интеллектуальной, безопасной и эффективной. [48]

Следующим этапом в развитии стандартизации и регулирования ИТС является C-ITS Platform, документ, регулирующий требования к платформам кооперативных систем ИТС, использующих стандарты ETSI (EN 302 637) и CEN (TS 17429). C-ITS Platform представляет собой платформу для развёртывания кооперативных интеллектуальных транспортных систем в Европейском Союзе. Создана в ноябре 2014 года службами Европейской комиссии (DG MOVE). При этом, целью платформы является обеспечение совместимости C-ITS на границах и по всей цепочке улично-дорожной сети, а также определение наиболее вероятных и подходящих сценариев развёртывания и функционирования. [49]

В этой связи представляет особый интерес Японский путь стандартизации сферы ИТС, несмотря на интеграцию стандартов, издаваемых Японским

комитетом промышленных стандартов (JISC), который координирует разработку стандартов, развития стандартизации и регулирования ИТС в Японии остается самобытным. Среди стандартизирующих систем и документов в сфере ИТС Японии можно выделить:

— VICS (Vehicle information and communication system) – система, которая предоставляет информацию о дорожной ситуации в режиме реального времени через FM-вещание, радиоволны и оптические маяки. Ключевая цель – оптимизация маршрутов, снижение заторов, является одной из первых систем в составе ИТС.[50]

— UTMS (Universal Traffic Management system). Комплексная система управления трафиком, включает в себя адаптивные светофоры, координацию транспортных потоков, представляет собой совокупность датчиков, камер и центра управления.[51]

— ATM (Advanced Traffic Management). Набор стандартов, направленных на организацию и управление дорожными сигналами, включает в себя описание требований к динамическому измерению маршрутов, реагированию на аварийные, внештатные ситуации, а также алгоритмы снижения уровня загрязнения воздуха за счет оптимизации движения. [52]

Кроме того, в рамках механизма регулирования работы сферы ИТС в Японии существует ряд законов, который определяет правила работы ИТС, а также ее правила поведения ее конечных пользователей.

— Закон №86 (1984). Регулирует телекоммуникационный бизнес, включая ИТС. Требует защиты данных пользователей и прозрачности услуг. [53]

— Закон №144 (2000). Формирует правовую базу для интеграции ИТС в «глобальное электронное общество». Устанавливает требования к безопасности и управлению данными. [54]

— JIS (Japan Industrial Standards). Категории стандартов, относящихся к ИТС: А/Б - Безопасность электрооборудования (например, бортовые компьютеры); Категория D - Автомобильные системы (электронное управление, совместимость с инфраструктурой). [55]

Опыт Китайской народной республики в сфере регулирования ИТС во многом связан с решением проблемы управления крайне оживленным дорожным движением в условиях отсутствия возможности расширения дорожной сети, а также возникновения дорожных заторов и высокой интенсивности движения. Большинство проектов ИТС в Китае имеет 4 ключевые функции, относящихся к возникновению проблемы повышенной нагрузки на дорожную сеть. При этом функции проекта ИТС включают управление движением, мониторинг, анализ данных и управление, с помощью проекта реализуется эффективное управление движением через систему наблюдения и управления движением (Traffic Control and Surveillance System – TCSS), отслеживающей все основные скоростные магистрали, дорожные тоннели и выбранные магистральные дороги, а также в реализацию данного функционала включена система управления движением (Area Traffic Control – ATC), которая используется для мониторинга городских дорог. [56] Системы видеонаблюдения и сенсоры используются для сбора дорожной информации, и полезная информация о движении и маршрутах распространяется через СМИ, дорожные знаки и контроллеры.

Ключевым документом, в сфере внедрения, эксплуатации и развития интеллектуальных транспортных является - проект «China Standards 2035», который представляет собой стратегическую инициативу Китая, направленную на установление собственных глобальных технических стандартов. Данная программа является логическим продолжением плана «Made in China 2025», ключевой целью является усиление позиций Китая в мире за счет внедрения и продвижения своих стандартов в различных технологических секторах. [57]

Необходимо отметить, что несмотря на единое видение в сфере технологического суверенитета в Китайской Народной Республике внедрением ИТС занимается несколько министерств. Изначально Министерство строительства КНР и европейская организация ITS ERTICO совместно разработали план ЕС-Китай в 1999 и комиссия по государственному планированию включила ITS в число 100 ключевых областей исследований. Министерство и технологий одобрило создание исследовательского центра по разработке интеллектуальных

транспортных систем в 2000. Министерство науки и технологий организовало группу экспертов в области транспорта в стране для разработки основы интеллектуальной системы транспорта Китая. Благодаря участию Министерства связи: «Центр инженерных исследований ИТС КНР» постепенно превратится в базу индустриализации интеллектуальной системы автомобильного транспорта в Китае. [58]

В Российской Федерации, в настоящее время, в сфере ИТС количество принятых российских стандартов составляет 60 стандартов, при этом из них чуть более 5% от числа действующих международных (1100 стандартов), включая ISO, CEN, ETSI, IEEE. При этом по данным Росстандарта, ежегодно в нашей стране принимается 10-15 стандартов в сфере ИТС. [59]

На данный момент нормативно-правовая база сферы ИТС Российской Федерации пребывает в состоянии формирования, это выражается в том, что Федеральный закон «О национальной сети ИТС» находится на стадии проектирования, при этом, необходимо отметить, что существуют и другие регламентирующие документы, которые могут содержать в себе требования и описание ИТС, а именно:

— Федеральный закон от 08 ноября 2007 г. № 257-ФЗ «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации»; [60]

— Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», [61]

а также федеральное законодательство в области безопасности критической информационной инфраструктуры, персональных данных и технического регулирования. Кроме того, в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные качественные дороги» подготовлен проект Перспективной программы стандартизации в сфере интеллектуальных транспортных систем на период до 2026 года. в рамках выполнения работ по направлению «Внедрение новых технических требований и стандартов обустройства автомобильных дорог, в том числе на основе цифровых

технологий, направленных на устранение мест концентрации дорожно-транспортных происшествий». [62]

На данный момент, в России реализуется программа стандартизации ИТС, разработанная в целях создания условий для унификации технологий, которые являются инновационными для данной сферы. При формировании и развитии национальной сети ИТС планируется усиленное развитие нормативно технической базы Российской Федерации. Кроме того, программой стандартизации предусматривается пересмотру (актуализации) действующих документов и по разработке новых документов по стандартизации, в том числе на основе международных и региональных стандартов, по следующим шести направлениям: [63]

1. Общие требования к интеллектуальным транспортным системам, требования к архитектуре, сервисной модели, управляющим интерфейсам и к интеграционной платформе ИТС.

2. Требования к подсистемам и компонентам интеллектуальных транспортных систем.

3. Требования к архитектуре и взаимодействию подсистем ИТС общие технические требования и правила применения.

4. Требования к периферийному оборудованию интеллектуальных транспортных систем, размещаемому на автомобильных дорогах общего пользования.

5. Требования к информационной безопасности интеллектуальных транспортных систем.

6. Требования к кооперативным интеллектуальным транспортным системам включают группы стандартов, устанавливающих требования к наземным мобильным средствам связи; к системной архитектуре и сервисам К-ИТС.

Все вышеуказанные факты, набор мер и правовых решений уполномоченных государственных органов, указывают на то, что сфера ИТС требует унификации, стандартизации и гармонизации требований как физической архитектуре, так и к функциональной архитектуре и интеграционной платформе. На наш взгляд

наиболее эффективным инструментом, с учетом специфики транспортной инженерии, является онтология, включая язык программирования OWL-RDF, как основной метод описания той базы знаний, которая представлена включенными в понятие интеллектуальной транспортной системы составных частей.

1.3 Анализ иностранного опыта интеграции программных и технических решений в процесс разработки интеллектуальных транспортных систем

В контексте применения онтологического моделирования в области разработки и эксплуатации интеллектуальных транспортных систем высокую степень актуальности, а также особый исследовательский интерес представляет современный практикоориентированный опыт других стран. На наш взгляд, применение новых технических, а также программных инструментов подразумевает, в том числе, изменение существующих подходов и методов к архитектуре ИТС. Необходимо отметить, что на данный момент существует большое количество работ современных иностранных ученых и исследователей, представляющих интерес с точки зрения опыта интеграции новых технологий, а также возникших методов и подходов. В рамках диссертационной работы особый интерес со стратегической точки зрения представляет зарубежный опыт: Китая, Японии, Соединенных Штатов Америки, Европейского Союза, так как именно в приведенных странах существует определенно высокий уровень развития и применения ИТС, как на уровне государства, так и на уровне бизнеса. [64]

Американский опыт в данном контексте имеет наиболее конкретизированное представление в руководстве по разработке и поддержке региональных архитектур ИТС «Regional ITS Architecture guide», основной целью данного документа является обеспечение единого методического подхода для всех штатов США к созданию архитектуры как стратегического плана интеграции технологий и систем. Особенности применения ИТС коллегами из США, изложенные в данном документе, направлены на устранение временной погрешности выборок при измерениях трафиков данных, получаемых ИТС. Поэтому подавляющее большинство данных о дорожном движении, которые в настоящее время

собираются для планирования, управления и исследований, основаны на подсчетах трафика в течение короткого периода времени. Хотя предпринимаются попытки корректировки или расширения выборки, эти процедуры несовершенны. При использовании непрерывных данных нет необходимости проводить корректировки для контроля смещения выборки. Основные различия с тем подходом, который используется при внедрении ИТС в данном документе и в Российской Федерации:

- Архитектура в данном документе описывается как та часть ИТС, вокруг которой выстраиваются другие проекты, подразумевается встраивание проектов в существующую архитектуру. В России применяется большое количество эффективных решений, однако, внедрение ИТС носит локальный, проектный характер.

- Приоритетность в США – совместимость систем, обеспечение обмена данными между системами и ведомствами, приоритетность в России – выполнение конкретной функции, совместимость не представляется первостепенной;

- Архитектура ИТС в США представляется процессом, включающим в себя планирование, обновление, координацию. Архитектура ИТС в России сводится к завершенным проектам, исходя из жизненного цикла: разработали, внедрили, запустили, приняли в эксплуатацию, списали.

Стремительный прогресс в области технологий обработки информации и связи создал новые возможности в части безопасности и эффективности оказания транспортных услуг, а также реакции на растущий транспортный спрос. Однако многие из этих новых возможностей возможности зависят от эффективной координации между организациями как на институциональном и техническом уровне. [65]

С точки зрения стратегии при интеграции интеллектуальных транспортных систем особый интерес представляет Европейский союз. Таким образом, в исследовании «Cooperative and Connected Intelligent Transport Systems for Sustainable European Road Transport» авторов Meng Lu, Oktay Turetken, Evangelos Mitsakis, Robbin Blokpoel, Rick Gilsing, Paul Grefen, Areti Kotsi [66] указан тот набор проблем и вызовов, которые существуют в ЕС, а именно: перегруженность дорог,

дорожно-транспортные происшествия, загрязнение окружающей среды успешно решаются существующими интеллектуальными транспортными системами. Однако, ИТС на данный момент, достигают своего предела в решении вышеуказанных проблем по двум основным причинам:

- изолированность подсистем ИТС, нет взаимосвязи, что снижает общий уровень эффективности;
- отсутствие прогноза, происходит реакция на события (после), нет возможности предугадать.

В результате чего возникла инициатива, направленная на создание скоординированной архитектуры для услуг C-ITS, обеспечивающую интероперабельность между различными системами и пользователями.

В рамках создания скоординированной архитектуры, исследователями, обозначено понятие «Предписаний», которые являются многоуровневыми инструкциями, генерируемые системой для следующих категорий пользователей:

- Водитель. Оптимальная скорость для «зеленой волны», инструкция по объезду пробки, предупреждение об опасности.
- Транспортное средство. Автоматическая настройка систем: круиз контроль, прогнозирование энергопотребления для электромобилей и гибридов.
- Логистический оператор. Динамический пересчет маршрутов движения автопарка для минимизации издержек (пробег, простой, оптимизация окон доставки).
- Оператору дорожной инфраструктуры. Рекомендации по динамическому изменению режима работы светофоров, ограничений скорости на участке дороги.
- Разработанная архитектура, которая включает в себя следующие уровни архитектуры:
 - Уровень обработки данных. Подразумевает сбор, хранение и обработку информации от всех доступных источников;
 - Уровень интеграции. Использование технологий и стандартов для обеспечения совместимости и семантической интерпретации данных;

- Уровень сервисов. Ядро системы, где алгоритмы и модели производят анализ данных и генерируют «предписания»;
- Коммуникационный уровень. Обеспечение надежной и безопасной передачи данных по каналам V2X;
- Уровень применения. Интерфейсы для отображения предписаний пользователю (НМИ в автомобиле) или для интеграции в бизнес-процессы компаний.

Несмотря на ограничения в реализации пилотных проектов и необходимость больших инвестиций в инфраструктуру в данной работе приведен один из наиболее конкретизированных подходов к архитектуре и концепции корпоративных интеллектуальных транспортных систем. Одной из наиболее важных целей применения ИТС является сокращение аварийности на дорогах, снижение количества дорожно-транспортных происшествий тема большого количества исследований, однако особый интерес представляет опыт коллег из Китая [67].

Так, в статье китайских исследователей: «Анализ и прогнозирование аварийных ситуаций в трафике при условии использования машинного обучения», ключевым вопросом является методика анализа дорожно-транспортных происшествий и методы использования машинного обучения в прогнозировании дорожно-транспортных происшествий. Кроме того, в исследовании затронуты проблемы моделирования тяжести ДТП на основе учета наиболее эффективных переменных для разработки высокоточной модели и проблема представления вероятности возникновения категории будущих аварий. Таким образом, результаты данного исследования могут быть применены для определения приоритетности корректирующих мер в области организации дорожного движения для органов власти.

Также необходимо отметить, что модель машинного обучения, упомянутая в тексте, имеет более высокую точность прогнозирования (98,9%), однако имеет меньшие возможности для составления прогнозов.

На наш взгляд, в условиях большого процента пешеходов и постоянной интерференцией немоторизованных пользователей и транспортных средств в

городе, можно рекомендовать использовать более аналитические методы и распознавание образов типа машинного обучения для обеспечения лучших подходов к принятию решений. Так как такие типы инструментов способны представить наиболее точную модель прогнозирования ДТП с участием пешеходов, отдельно происходящих в городской среде.

Применение инновационных инструментов программирования ограничивается не только нейросетями, но и включает в себя машинное обучение. Исследователи : Tingting Yuan, Wilson Da Rocha, Neto Christian Esteve Rothenberg Katia Obraczka Chadi Barakat, Thierry Turlatti утверждают, что машинное обучение, как инструмент реализации функционала интеллектуальных транспортных систем следующего поколения является крайне перспективным в силу 2 факторов: снижение потребностей в фактических ресурсах оборудования. [68]

Интеллектуальные транспортные системы, обычно относятся к применению информационных, коммуникационных и сенсорных технологий в транспортных и транзитных системах. ИТС, вероятно, станет неотъемлемым компонентом «умных городов» завтрашнего дня и будет включать в себя различные услуги и приложения, такие как управление дорожным движением, информационные системы для путешественников, управление системами общественного транспорта, автономные транспортные средства и др. В данном разделе представлен обзор ИТС, включая: определение того, как ИТС рассматривается в настоящее время, перечисление некоторых из ее наиболее известных приложений и услуг, предложение ориентированной на приложения структуры ИТС, которая будет служить основой для исследования, и определение основных задач, которые используются в качестве строительных блоков приложениями ИТС. Примерами приложений программы CV являются предупреждение столкновений при движении вперед, интеллектуальный светофор и пешеходный переход.

Европейский институт телекоммуникационных стандартов предложил базовый набор приложений, всестороннее описание которых ETSI представлено в статье. Поскольку приложения ETSI являются приложениями ITS и данные, собранные инфраструктурным уровнем, могут использовать множество услуг,

предоставляемых ресурсным уровнем. Поскольку приложения ИТС имеют различные требования к ресурсам, услуги, предоставляемые ресурсным уровнем, должны предоставляться приложениям в соответствии с их потребностями.

Пользователи обеспечивают интерфейс между приложениями ИТС и ресурсным и инфраструктурным уровнями, обрабатывая запросы от различных приложений, планируя соответствующие ресурсы и/или получая запрашиваемую информацию, чтобы обеспечить приложениям необходимое качество обслуживания. Как уже говорилось ранее, существует широкий спектр приложений ИТС, начиная от помощи водителю и заканчивая эффективностью дорожного движения и загрузкой мультимедиа. Приложениям ИТС необходим доступ к различным ресурсам, инфраструктуре и данным.

Следующим европейским исследованием, представляющим интерес с точки зрения опыта комплексного внедрения ИТС является научная статья «A systematic review of the scope and definition of mobility-as-a-Service (MaaS)». Данная работа представляет собой научное исследование, направленное на систематизацию и структуризацию вопроса пользования мобильностью как сервисом. [69]

Рассмотрение мобильности как сервиса является актуальным трендом современного развития транспортной отрасли и повсеместно используется транспортными операторами, частным бизнесом, властями и рядом исследователей для обозначения перспективы развития транспортной отрасли в целом. Однако, с другой стороны, данный термин является неопределенным, существует большое количество определений из-за которых возникает смысловая коллизия. По данной причине происходит снижение скорости развития отрасли в целом, так как отсутствует возможность объективного сравнения результатов пилотных проектов, бизнес-моделей, разработки конкретизированных нормативных рамок.

В данном исследовании особое внимание уделено вопросу терминологической точности определения понятия Mobility as a service, в частности, обозначена проблема, связанная с тем, что большинство исследователей взаимозаменяют термины «MaaS», «Мультимодальность» и «Интегрированная мобильность», что усугубляет возникший терминологический хаос. Указанные

термины имеют совершенно разные области применения: технологическая платформа, бизнес-модель (подписка), стратегия развития, направленна на формирование бесшовного пользовательского опыта.

В качестве решения проблемы авторами была предложена иная идея – формирование единой таксономии составляющих частей понятия MaaS, которая стала бы структурным каркасом, позволяющим классифицировать все категории MaaS:

1. Ядро услуги (Интеграция);
2. Технологическая платформа;
3. Бизнес модель (Стейкхолдеры);
4. Условия внедрения (Стандартизация);
5. Цели и воздействие (Социальные эффекты).

Подобный подход позволил избежать споров относительно терминологического поля и перевести это в область компонентных составляющих и степени их реализации. Применение онтологии как научного разрешения – не единственная возможность, онтологическая модель является перспективным инструментом данном исследовании, является одной из интерпретаций онтологической модели, который применили как инструмент обобщения и формализации существующего знания.

В рамках анализа опыта применения онтологии в качестве инструмента разработки архитектуры ИТС, а также общего инструмента разработки изучено исследование «An ontology based approach to intelligent information processing in collaborative environments». Данное исследование посвящено разработке и применению онтологии для решения задач семантической интеграции данных в распределенных средах разработки, с перспективой преодоления семантических барьеров, связанных с разнородностью источников информации за счет использования онтологии как концептуальной модели предметной области. В сущности, работа построена вокруг разработки онтоцентрической архитектуры ИТС, где онтология выполняет роль семантического ядра системы. [70]

Особое место в исследовании уделяется механизму логического вывода на основе онтологий, позволяющему выявить основные связи между данными, которые не определены заранее. Таким образом, авторам удалось показать возможность автоматического дополнения онтологической модели через анализ существующих данных и выявление новых семантических сущностей.

В вышеуказанном исследовании продемонстрирована высокая степень эффективности применения онтологического подхода к разработке интеллектуальных транспортных систем. В частности, система, в которой присутствует онтологический слой способна идентифицировать эквивалентные концепты в различных источниках, даже если они используют разную терминологию. Ключевым результатом является демонстрация автоматического дополнения онтологии посредством применения внутреннего логического анализа системы, такая функция обеспечивает возможность эволюционного развития систем, основанных на онтологии.

Следующим исследованием является, посвященное интеграции данных с использованием онтологии «Ontology-based Integration of Traffic Data», где предлагается комплексная онтологическая модель, объединяющая данные датчиков, дорожной инфраструктуры и так далее. Основная особенность работы заключается в предложенном способе разрешения семантических конфликтов при помощи встроенной логической машины.

Результаты эксперимента в данном исследовании показывают, что увеличение точности определения транспортных инцидентов на 40% выше по сравнению с привлечением экспертной оценки или же использования машиночитаемого словаря.

Применение онтологии для прогнозирования параметров транспортных потоков описано в исследовании «Predictive traffic flow modeling using ontological reasoning». Авторами разработана динамическая онтология, способная интегрировать исторические данные параметров дорожного движения в реальном времени с учетом календарных данных.

Таким образом, авторами была создана система, способная выполнять онтологический вывод вместе с машинным обучением. В данном случае, онтология используется для генерации семантических признаков, повышающих точность LSTM сетей на четверть при прогнозировании высокой интенсивности дорожного движения на отдельных участках улично-дорожной сети. В рамках проведенных экспериментов система продемонстрировала эффективность, особенно в нестандартных обстоятельствах, где традиционные модели показывают низкий уровень эффективности. [71]

Онтологический подход позволяет реализовать подход, подразумевающий цифрового двойника системы и всех сущностей системы. В работе «Ontology-driven framework for cyber-physical systems» предлагается интеграция онтологии в киберфизическую систему транспорта. Подразумевается, что взаимодействие физических объектов (технические средства организации дорожного движения, транспортные средства, инфраструктура, участники дорожного движения и так далее) смоделировано цифровыми двойниками, что обеспечивает семантическую основу для:

- автоматического принятия решений в коммуникациях;
- динамической оптимизации маршрутов с учетом энергопотребления электромобилей;
- обнаружения киберугроз в реальном времени.

Таким образом, большинство исследований по теме применения технологических решений, связанных с интеграцией программных и технических решений в процесс разработки интеллектуальных транспортных систем, в частности, онтологического моделирования объединены практической ориентированностью. Все исследования фокусируются на трех основных аспектах:

- базовая интеграция данных;
- эволюция систем принятия (поддержки принятия) решения;
- динамические системы (уход от статичных систем).

Критическим вызовом для онтологии является масштабируемость, все исследования отмечают рост требуемой вычислительной сложности при

увеличении объема таксономии (объема данных). По мнению исследователей, наиболее перспективным направлением считается сочетание онтологий с машинным обучением для распределенной обработки данных.

Таким образом, по нашему мнению, дальнейшее развитие интеллектуальных транспортных систем связано с интеграцией онтологического слоя для преодоления текущих ограничений производительности ИТС. В свою очередь, применение машинного обучения противоречит концепции онтологического образования, а проблемы, возникшие при увеличении таксономии решаются дроблением онтологии на составные части, при котором скорость отклика онтологии останется на минимальном уровне. Вместе с тем, проанализированные нами работы являются основой для изменения основной парадигмы подхода к понятию интеллектуальности в понятии интеллектуальной транспортной системы. Возникает новый аспект интеллектуальности – онтологический.

2 ОСНОВНЫЕ МЕТОДИКИ РАЗРАБОТКИ ИТС С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

2.1 Критический анализ приоритетных направлений разработки интеллектуальных транспортных систем

Интеллектуальные транспортные системы представляют собой важный элемент современного управления дорожным движением, их влияние на оптимизацию транспортных потоков неоспоримо. Основные аспекты, связанные с внедрением ИТС, касаются повышения безопасности, улучшения пропускной способности и уменьшения времени поездок, что в конечном итоге в значительной степени зависит от эффективного функционирования транспортной инфраструктуры. Основные технологии, интегрируемые в ИТС, включают «умные» светофоры, системы контроля и прогнозирования дорожной ситуации, а также системы сбора и обработки данных. Эти инструменты позволяют не только более точно управлять движением, но и предугадывать возможные заторы, что создаёт условия для более равномерного распределения транспортных потоков. Например, применение современных алгоритмов управления светофорами позволяет сократить время ожидания и, как следствие, уменьшить вредные выбросы в атмосферу.

Представляют интерес исследования, проведенные в рамках национального проекта «Безопасные и качественные дороги» в России. Во время этих исследований было установлено, что использование ИТС на платных трассах снизило количество дорожно-транспортных происшествий, что подтвердило их эффективность для повышения безопасности дорожного движения. Однако несмотря на положительные результаты, полное и грамотное внедрение таких систем требует значительных ресурсов и времени. К ключевым преимуществам ИТС следует отнести их способность адаптироваться к изменяющимся условиям дорожного движения. Так, технологии обработки больших данных могут анализировать дорожные потоки в реальном времени и предоставлять информацию, необходимую для быстрого реагирования на нестандартные

ситуации, такие как ДТП, повышенная интенсивность дорожного движения, резкие изменения в дорожной обстановке или плохие погодные условия. Это открывает новые возможности для доработки существующих систем и внедрения инновационных решений, таких как использование беспилотных транспортных средств, что также может способствовать улучшению контроля за движением.

За последние 5 лет в сфере ИТС наблюдается тенденция, заключающаяся в том, что основное количество инноваций на транспорте все больше определено тем контекстом, в котором на данный момент находится цифровая эпоха, что в том числе отсылает к высокой степени интегрированности информационно-коммуникационных технологий в общественной среде. Изменение подходов к использованию транспортных средств, совместное использование автомобилей, поездки по требованию и микротранзит/общие микроавтобусы с гибким маршрутом, а также режимы совместного использования поездок на работу (карпулинг и ванпулинг) являются тем перечнем решений, которые в ближайшее время будут рекомендованы к применению в транспортной системе не только в России, но и по всему миру.

Необходимо отметить, что в России вышеуказанные явления не являются новинкой, их можно наблюдать повсеместно, не только на территории г. Москвы, даже в, относительно небольших городах можно наблюдать интеграцию социально-транспортного рейтинга (приложения мобильности – Яндекс Go, Uber и т.д.). При этом, многие администрации городов руководствуются видением повсеместной, интеллектуальной инфраструктуры, систем и услуг, где достижения в области сетевых и информационных технологий позволяют повысить эффективность, сократить расходы и улучшить качество жизни жителей. [72]

Разработка интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в России имеет долгосрочную стратегию, направленную на модернизацию и оптимизацию транспортной инфраструктуры. ИТС охватывают широкий спектр технологий, включая системы управления движением, навигации и обработки информации, что улучшает взаимодействие всех участников дорожного движения. Основные виды ИТС включают системы мониторинга транспортных потоков, информирования

водителей и пассажиров, а также решения для повышения безопасности на дорогах. Формирование ИТС в России началось относительно недавно — в 2016 году, когда они были включены в национальный проект «Безопасные и качественные дороги».

В данном контексте особую роль приобретают подходы к проектированию и разработке ИТС, связанные с использованием искусственного интеллекта, а также вспомогательных технологий, основанных на интеграции с другими системами. ИТС могут спасти жизни, поддерживать нашу страну в рабочем состоянии и готовить к будущим вызовам, опасностям и возможностям. Однако на первых этапах развития ИТС обычно существует неопределенная ситуация, неизвестная структура системы, последовательность создания компонентов и подсистем ИТС, параметры эффективности. Поэтому развитие ИТС требует дополнительных исследований для каждого конкретного варианта системы. Это связано не только с организационными и техническими проблемами. Создание ИТС требует привлечения существенных инвестиций, реализации схемы государственно-частного партнерства и эти исследования должны дать оценку соотношения издержки-выгоды и риска инвестиций. Поэтому подобно другим сложным системам для интеграции ИТС с другими транспортными системами необходимо создание архитектуры ИТС.

В настоящее время разработка национальной архитектуры ИТС является первым и приоритетным этапом, который определяет перспективы развития, функциональные требования, условия интеграции, уровень унификации компонентов ИТС. Первая национальная архитектура ИТС была разработана в США в 1996 году. Единая Европейская архитектура была разработана в 2000 году. Вышеуказанные особенности развития ИТС по всему миру приводят к тому, что в ближайшее время приоритет как развития ИТС, так и регулирования данной сферы будет смещен к применению новых технических решений. Одним из основных трендов, который будет расширять сферу применения является тренд на применение кооперативных ИТС, который направлен на объединение транспортной системы в единую сеть (информационную систему).

Следующий тренд заключается в смещении фокуса мобильности населения с

личного автотранспорта к использованию транспорта как сервиса, подразумевается, что весь существующий транспорт будет привязан к единой платформе и доступ к нему будет осуществляться с мобильного устройства. Применение Big Data и искусственного интеллекта для анализа больших массивов данных, поступающих с сенсоров, камер или в результате обработки и компиляции данных на основе машинного обучения. [73] Все вышеуказанные тренды в совокупности позволят добиться бесшовного подхода в разработке и применении интеллектуальных транспортных систем, однако, вместе с тем, отсутствует системность в направлениях развития, нет единого технического знаменателя, который объединял бы данные векторы развития.

На наш взгляд таким знаменателем может выступить онтологическое моделирование, которое на техническом уровне, может интегрировать как существующие системы, так и может являться основой для их модернизации по вышеуказанным направлениям. Так как понятие ИТС охватывает большое количество аспектов функционирования транспортного комплекса, включая управление дорожным движением, планирование маршрутов, а также предоставление информации для участников дорожного движения в реальном времени. Интеграция ИТС в реальность позволяет не только реагировать на изменения в ситуации на дорогах, но и предсказывать потенциальные проблемы, что делает управление транспортной системой проактивным. Однако, вместе с тем, систематизация и унификация ИТС в стране сопровождается рядом системных проблем и противоречий. [74]

Разработка и внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в России продолжает оставаться сложной задачей, которая требует преодоления множества организационных препятствий. Одной из центральных проблем является недостаточное нормативное обеспечение. Отсутствие четких стандартов и регламентаций затрудняет интеграцию различных компонентов систем, что, в свою очередь, ведет к неэффективному использованию ресурсов и замедляет процесс внедрения ИТС на территории страны. Регулирование в этой области часто не учитывает специфику различных регионов, что вызывает дополнительные

трудности при адаптации стандартов к местным условиям. В последнее время, в рамках внедрения и модернизации ИТС субъектов возник негативный тренд, заключающийся в неравномерности развития ИТС. Вместе с тем, не менее актуальны региональные различия в субъектах Российской Федерации. Каждый город имеет свои уникальные проблемы и задачи по организации транспортных потоков.

Таким образом, наиболее эффективные решения в одних регионах могут оказаться совершенно неуместными в других из-за различий в населении, инфраструктуре и транспортной культуре, что подразумевает необходимость разработки типовых модулей, адаптированных для использования в различных условиях. Как правило, регионы концентрируются на «доходных» подсистемах, таких как фиксация нарушений ПДД (39% регионов), игнорируя оптимизацию движения (светофорное управление внедрено лишь в 5,3% регионов). [68] Кроме того, разработка и интеграция цифровых платформ, таких как «Единая платформа управления транспортной системой» (ЕПУТС), направлено на объединение данных и управление трафиком в масштабах агломераций. Многие регионы используют оборудование иностранного производства (например, детекторы и ПО), что усложняет совместимость и повышает уязвимость к санкциям. [75]

Санкционное давление ускорило переход на российское ПО и оборудование. Например, комплексы фотовидеофиксации на 95,6% состоят из отечественных компонентов. Однако российские аналоги часто уступают зарубежным в точности и функциональности, особенно в сегменте IoT и искусственного интеллекта. Подсистемы ИТС, включенные в перечень критической инфраструктуры, требуют усиленной защиты, но многие регионы не имеют ресурсов для её обеспечения. Управление данными и моделирование сбор данных о трафике и их анализ через ГИС-платформы позволяют прогнозировать заторы и оптимизировать маршруты.

В Ростовской области установлено 175 детекторов и 56 адаптивных контроллеров, что повысило пропускную способность дорог. Однако, большинство регионов не используют данные для транспортного моделирования, ограничиваясь базовым мониторингом.

Развитие ИТС в России демонстрирует амбициозные цели и локальные успехи, но сталкивается с системными вызовами, которые носят монотипный характер для всех субъектов страны:

- Нормативные пробелы — отсутствие единых стандартов и законодательной базы, Федеральные законы не определяют ИТС как целостную систему, что приводит к фрагментарности архитектур и недобросовестной интерпретации требований. Для достижения целей транспортной стратегии до 2030 года требуется не только наращивание технологических мощностей, но и системная работа над устранением институциональных и инфраструктурных барьеров.

- Некоторые российские города уже достигли значительного прогресса в этой области. Например, в Красноярске был успешно внедрен ряд цифровых инструментов, что подчеркивает важность исполнения такой стратегии на уровне отдельных муниципалитетов. Эти примеры показывают, что даже в сложных условиях возможно внедрение решений, оптимизирующих транспортное движение и создающих более благоприятные условия для всех участников. [76] Кроме того, разрабатываемые механизмы и модели ИТС позволяют обеспечить интеграцию с другими транспортными системами, такими как общественный транспорт, что дает возможность сделать систему городского транспорта более эффективной и удобной для пользователей. Это также способствует улучшению экологической ситуации, снижая выбросы от транспортных средств за счет уменьшения пробок и нецелевого использования ресурсов.

- Отдельная проблема заключается в недостатке взаимодействия между секторами, связанными с автотранспортной и информационной сферами. Эффективные модели управления транспортными потоками могут быть реализованы только при наличии тесного сотрудничества участников рынка, что часто оказывается затруднительным из-за различий в интересах и недостатка единой информационной базы. Эти ограничения делают необходимым создание платформ взаимодействия для обмена данными и координации действий различными организациями.

– Интеграция интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в России сталкивается с многими трудностями, которые значительно снижают ее общую эффективность, таким образом, одним из первых критических моментов является недостаточная зрелость системы. На текущий момент ИТС в стране продолжают находиться на стадии развития, что в значительной степени снижает уровень и глубину их комплексного внедрения, несмотря на государственное финансирование и участие в различных национальных проектах, задача полного внедрения остается нерешенной с 2016 года.

– Структурная недостаточность. Текущие системы могут оказаться не готовыми к решению новых задач, возникающих в процессе эксплуатации. Это несоответствие может привести к значительному снижению общей эффективности системы, даже при условии правильного управления и проектирования. Как правило, на практике это означает, что даже лучшие технологии могут оказаться неэффективными из-за недостаточно проработанных процессов и интеграции различных подсистем.

– Современные ИТС сильно зависят от качества используемой аппаратуры и программного обеспечения для моделирования и регулирования транспортных потоков. В некоторых регионах может не хватать необходимых технологий, что серьезно подрывает возможность успешного внедрения систем. Недостаток технологий требует дополнительного внимания к созданию равных условий для всех регионов, на что должно направлено больше инвестиций и усилий.

Для исправления этих проблем существует необходимость дальнейшего изучения и перехода к более эффективным практикам внедрения ИТС. Системы, которые пытаются математически моделировать транспортный поток в высокой степени детализации, сталкиваются с необходимостью большего объема данных и их правильной интерпретацией. В конечном итоге, подобные ситуации требуют применения более эффективных и адаптивных подходов, что должно быть зафиксировано в стратегиях разработки ИТС. Таким образом, учет указанных недостатков и предпочтение к лучшим практикам при создании ИТС имеет

критически важное значение для достижения максимальной безопасности и эффективности в транспортной сфере России. К конструктивному и продуманному подходу к разработке систем и их интеграции необходимо подойти системно, основываясь на четких аналитических данных и реальных потребностях транспортной инфраструктуры.

Приоритетные направления разработки интеллектуальных транспортных систем требуют системного подхода со стороны как государственных структур, так и бизнеса. Экспертные оценки показывают, что для успешного внедрения ИТС необходимо создать четкие и сбалансированные финансовые механизмы, а также проработать методические рекомендации для участников на всех уровнях. Наиболее актуальным считается увеличение финансирования таких проектов. В 2023 году было выделено более 5 миллиардов рублей для поддержки инициатив на федеральном уровне, что указывает на намерение государства активно поддерживать ИТС по всей стране. Однако средства должны быть разумно распределены. Например, следует акцентировать внимание на создании методических рекомендаций для субъектов Российской Федерации. Это упростит процесс сбора заявок на получение субсидий и позволит сократить время на внедрение проектов. Важно, чтобы каждое учреждение, занимающееся реализацией ИТС, имело доступ к четкой и систематизированной информации о том, как правильно подавать заявки на финансирование.

Внедрение комплексного подхода также имеет критическое значение. Это подразумевает необходимость включения новых этапов в рамках государственной программы «Развитие транспортной системы», что позволит учитывать уникальные обстоятельства и потребности каждого региона. Создание типовой архитектуры и модуля ИТС также поможет стандартизировать подходы к внедрению систем, делая их более доступными для интеграции на уровне местных органов власти. Во многих крупных городах необходимо создать Центры управления транспортом, которые будут заниматься мониторингом и регулированием дорожного движения в реальном времени. Это особенно актуально для городов с населением свыше 300 тысяч человек, где требования к

управлению транспортными потоками значительно выше. Такие центры смогут не только повысить безопасность на дорогах, но и существенно уменьшить заторы за счет более эффективного распределения транспортных средств по улицам города.

Следующий важный аспект — это соответствие внедрения ИТС стратегиям цифровой трансформации в транспортном секторе. Каждое новое решение должно быть увязано с общими целями по модернизации транспортной инфраструктуры и увеличению её привлекательности для пользователя. Важно, чтобы все уровни государственно-частного партнерства работали в одном направлении цифровизации и автоматизации процессов, что, безусловно, улучшит качество транспортных услуг в целом. Современные вызовы, стоящие перед транспортной инфраструктурой, требуют внедрения инновационных решений, способных повысить эффективность и безопасность транспортных потоков. В условиях стремительного роста городов, увеличения числа автомобилей и ухудшения экологической ситуации, необходимость в разработке и внедрении ИТС становится особенно очевидной. [77]

В таких условиях технологии, связанные с использованием цифровых двойников — виртуальной модели физического объекта или процесса, синхронизированной с реальностью в режиме реального времени, становятся ключевым инструментом для оптимизации проектирования, тестирования и управления ИТС. Концептуально и технологически основой данного подхода считается динамическая модель, которая отражает состояние объекта (дороги, светофоров, транспортных потоков) через сбор данных с датчиков, камер и других IoT-устройств. Вместе с тем, системы, основанные на таких технологиях, позволяют прогнозировать сценарии, а также управлять ими, что обеспечивает взаимодействие между компонентами системы через облачные платформы. Таким образом, в Сингапуре цифровой двойник городской транспортной системы позволяет моделировать последствия изменения маршрутов общественного транспорта, снижая загруженность дорог на 15–20%.

Влияние ИТС на оптимизацию транспортных потоков и управление дорожным движением также было предметом нашего анализа. Внедрение

интеллектуальных систем управления движением может значительно повысить эффективность транспортной инфраструктуры, снизить уровень пробок и улучшить безопасность на дорогах. Однако для достижения этих целей необходимо не только разработать соответствующие технологии, но и обеспечить их интеграцию в существующие транспортные системы. [78] Будущее развития ИТС в России зависит от множества факторов, включая политическую волю, уровень инвестиций и готовность бизнеса к сотрудничеству с государственными структурами. Важно, чтобы все участники процесса осознали значимость ИТС и начали активно работать над их внедрением. В этом контексте мы предлагаем ряд рекомендаций для государственных структур и бизнеса, направленных на улучшение ситуации в области разработки и внедрения ИТС. К ним относятся необходимость создания единой стратегии развития ИТС, активизация сотрудничества между государственными и частными секторами, а также развитие образовательных программ, направленных на подготовку специалистов в данной области.

Критический анализ приоритетных направлений разработки интеллектуальных транспортных систем в России позволяет сделать вывод о том, что для успешного внедрения ИТС необходимо преодолеть существующие организационные проблемы, улучшить механизмы взаимодействия между участниками процесса и обеспечить подготовку квалифицированных кадров. Только комплексный подход к решению этих задач позволит России занять достойное место в числе стран, активно развивающих интеллектуальные транспортные системы, и обеспечить устойчивое развитие транспортной инфраструктуры в условиях современных вызовов.

Таким образом, в рамках анализа, мы пришли к выводу, что объектно-ориентированный подход (далее - ООП), представляющий собой эффективную методологию проектирования сложных систем за счет структурирования компонентов в виде взаимодействующих объектов является наиболее подходящим к применению в рамках развития ИТС. Основные принципы ООП — инкапсуляция, наследование, полиморфизм и абстракция, что позволяет моделировать элементы

ИТС как независимые сущности с четко определенными интерфейсами и логикой поведения. Например, такие компоненты, как датчики дорожного движения, светофоры, алгоритмы маршрутизации или модули анализа данных, могут быть представлены в виде классов, инкапсулирующих их свойства (например, местоположение, состояние) и методы (обработка сигналов, передача данных). Происходит упрощение разработки ИТС, поскольку каждый объект функционирует автономно, а взаимодействие между ними осуществляется через стандартизированные протоколы, что снижает риски системных конфликтов. [79]

Принцип наследования позволяет создавать иерархии классов, что особенно актуально для ИТС, где требуется унифицировать обработку разнородных объектов. Например, базовый класс «Транспортное средство» может быть расширен подклассами «Электромобиль» или «Общественный транспорт», каждый из которых наследует общие атрибуты (скорость, координаты), но добавляет уникальные особенности (уровень заряда батареи, расписание). Полиморфизм обеспечивает гибкость при интеграции новых технологий: интерфейсы для взаимодействия с системами машинного обучения или IoT-устройствами могут оставаться неизменными, даже если внутренняя реализация объектов эволюционирует.

Ключевым преимуществом ООП в контексте ИТС является повышение модульности и масштабируемости. Система, построенная на объектно-ориентированных принципах, легко адаптируется к изменениям — будь то добавление новых типов датчиков или внедрение алгоритмов оптимизации трафика. Кроме того, инкапсуляция данных и методов минимизирует риски несанкционированного доступа и упрощает тестирование отдельных компонентов. Например, модуль управления светофорами может быть изолирован от подсистемы сбора данных, что позволяет корректировать его логику без влияния на другие элементы. Таким образом, применение ООП в проектировании ИТС не только структурирует разработку, но и создает основу для интеграции инновационных технологий, таких как автономный транспорт или адаптивное управление потоками, обеспечивая устойчивость системы к динамичным изменениям

транспортной среды.

В сегодняшних условиях требуется формирование концептуальных моделей, способных объединить технологические достижения в рамках существующей транспортной инфраструктуры. Инновационные решения, такие как внедрение алгоритмов машинного обучения и адаптивных систем управления, требуют более глубокого анализа и доказательства своей эффективности, что нередко оказывается под угрозой из-за отсутствия достаточной поддержки на всех уровнях. Необходимость в четких и обоснованных подходах к внедрению новых технологий становится особенно актуальной в условиях стремительного роста объема данных и динамичной среды транспортного взаимодействия.

В связи с вышеизложенными аспектами, для позитивного развития ИТС требуется комплексный подход, включающий создание типовых архитектур и систем, а также разработку руководств и рекомендаций, охватывающих все аспекты внедрения систем в муниципалитетах. В частности, важно определить оптимальные модели для создания центров управления и мониторинга транспортной системы в крупных городах, которые были бы основаны на лучших мировых практиках и опыте успешного внедрения ИТС. Преодоление указанных проблем невозможно без активного участия как государства, так и частного сектора, что должно включать не только финансовые, но и организационные меры, направленные на укрепление взаимосвязей и создания необходимых условий для внедрения современных технологий.

Выводы о необходимости оптимизации работы транспортных систем в России, сделанные в ряде аналитических материалов, показывают, что интеграция ИТС может значительно повысить уровень безопасности на дорогах. Интеллектуальные системы напрямую влияют на статистику аварийности, способствуя не только снижению количества инцидентов, но и улучшая реакцию экстренных служб на чрезвычайные ситуации. Тем не менее, на пути внедрения ИТС существуют и определенные сложности. Прежде всего, это отсутствие единой стратегии и стойкой инфраструктуры для реализации таких систем. Необходима подготовка квалифицированных кадров, способных эффективно развивать и

поддерживать новые технологии, что является одним из актуальных направлений в системе образования. Стратегия должна быть направлена не только на внедрение технологий, но и на формирование качественно новой среды для автомобилистов.

В заключении необходимо отметить, что разработка интеллектуальных транспортных систем в России зависит от четкой координации действий между государственными органами, частными предприятиями и гражданским обществом. Инвестиции в ИТС должны быть оправданными, а проекты — четко структурированными. Только так можно ожидать выполнения целей по улучшению безопасности дорожно-транспортной инфраструктуры, повышению ее эффективности и созданию комфортных условий для пользователей. Кроме того, текущие недостатки в организации системы дорожного движения часто могут быть связаны с его устаревшими методами управления, что подтверждает необходимость переоснащения и модернизации существующей инфраструктуры. Таким образом, подход к разработке ИТС требует комплексного подхода, включая оценку текущих и будущих потребностей, взаимодействие с пользователями и субъектами транспортного процесса.

Внедрение и адекватное использование ИТС предполагает не только технологические изменения, но и интеграцию этих систем в повседневную практику транспортного управления. Примеры успешного внедрения ИТС в других странах показывают, что своевременное и поэтапное количество таких мероприятий позволяет не только сократить время в пути, но и значительно увеличить общую эффективность транспортной системы. Тем не менее, будущее работы ИТС в России во многом будет зависеть от государственно-частного партнерства и готовности всех участников к активному взаимодействию и обмену опытом.

Такой многогранный и интегрированный подход к разработке ИТС в России способствует не только улучшению транспортной инфраструктуры, но и созданию современного, безопасного и комфортного городского пространства для всех участников дорожного движения. Ключевыми направлениями в этом процессе остаются оптимизация управления потоками, обеспечение безопасности и качество

транспорта, на основе онтологической модели ИТС.

2.2 Онтология как совокупность прикладных возможностей для повышения эффективности разработки архитектуры ИТС

Онтология информационной системы является составной частью системы организации знаний и, первоначально, служила для формального описания знаний из определенной предметной области. Слово «онтология» означает совокупность знаний; термин «семантические технологии» подчеркивает тот факт, что они обеспечивают работу со смыслом информации. Существует несколько определений термина «онтология», однако, наиболее распространенным вариантом интерпретации является эксплицитная (формальная) онтология. [80]. Онтология с точки зрения Грубера представляет собой описание декларативных знаний, сделанное в виде классов с отношением иерархии между ними. Формализованное описание знаний, классов, сущностей, типов данных и т.д. позволяет уйти от чтения только человеком к созданию описания в канонической форме, которое предназначено для чтения машинами. Исходя из вышеуказанной теоретической базы, каждая интеллектуальная транспортная система может предоставлять несколько таких описаний, соответствующих различным областям хранящихся в ней декларативных знаний и представлять собой хранилище библиотеки онтологий. Грубер представлял, что интеллектуальный аспект системы будет заключаться, в том числе, в свободном обмене информацией между онтологиями. При этом библиотеке онтологий уже не обязательно быть интеллектуальной системой, достаточно просто предоставлять сервис по передаче онтологий по требованию. [81]

Создание подробного описания декларативного знания – онтологическое моделирование, как правило, требует большой работы и определенных навыков. Грубер дал этому процессу название, специальный термин – «концептуализация», а процессу описания присвоен следующий термин – «спецификация». То есть, при создании онтологической модели интеллектуальной транспортной системы, необходимо учитывать составные части, этапы и действия, которые приведены в

таблице 1.

Таблица 1 - Описание соотношения составных частей ИТС и этапов онтологического моделирования

Составная часть ИТС:	Этап разработки модели:	Действия в рамках этапа:
Функциональная архитектура системы	Концептуализация	Создание иерархии классов
Физическая архитектура системы	Присваивается спецификация	Создание индивидов, привязка к классам, описание параметров
Интеграционная платформа	Присваивается спецификация	Создание вспомогательных классов, создание индивидов, описание параметров

Таким образом, онтология по Груберу определяется как спецификация концептуализации. Однако, со временем, возникла необходимость в более современном понимании термина «онтология», так как введенное Грубером разделение спецификаций знаний на две составляющие (каноническую форму и онтологию) не очень удобно, в силу того, что приходится описывать одни и те же знания два раза. Современные языки описания онтологий позволяют совместить эти формы спецификаций в единое целое.

Таким образом, на данный момент онтологией считается любое описание декларативных знаний, сделанное на формальном языке и снабженное некоторой классификацией специфицируемых знаний, позволяющей человеку удобно воспринимать их. Каноническая форма не обязательно использует язык логики предикатов, могут использоваться и другие формализмы.

Концепция онтологического подхода, а также идеи автоматизированной обработки формализованного знания неоднократно выдвигались мыслителями начиная со Средних веков и актуализировались в наше время.

Онтология как инструмент формализованной обработки данных ограничено

использовалась в лучшие годы советской плановой экономики, но до функционально ориентированного воплощения доросли только сейчас. На данный момент существует большое количество компонентов, методик и технологий, необходимых для работы с онтологическими моделями.

В контексте разработки информационных систем онтология является предметом обработки с помощью семантических технологий, которые представляют собой набор способов представления и использования концептуализированной информации в электронном виде. Наиболее явным представлением особенностей данных технологий является сравнение с другими способами представления информации. [82]

Представленная в потоковом виде информация – это сигнал, для расшифровки и воспроизведения которого используются специальные аппаратные и программные средства, при этом, как правило, программное обеспечение не анализирует содержимое (смысл) такого сигнала, полностью возлагая задачу его интерпретации на пользователя. Несколько особняком стоит текстовое представление: текст может анализироваться при помощи статистических и иных методов, которые облегчают поиск и структурирование информации в нем.

Семантические технологии подразумевают управление знаниями посредством применения различных информационных технологий, основывающихся на моделях предоставления данных в семантической форме. Применение такой комбинации инструментов информационных технологий позволяет перейти от традиционных ИТ на семантические технологии, что является переходом от работы с данными к работе со знаниями.

Для эффективного использования онтологий необходимо наличие инструментов, позволяющих:

- создавать и модифицировать онтологии;
- импортировать онтологии из других источников;
- объединять онтологии различного происхождения;
- автоматически создавать онтологии для источника данных с использованием метаданных этого источника;

- осуществлять различные другие операции над онтологиями;
- поддерживать аннотирование и версионность онтологии;
- связывать концепты онтологии с различными типами данных;
- обеспечивать многоязычную поддержку.

Очевидно, что в масштабах одного, даже достаточно крупного проекта, нет возможности имплементации всех технологий с использованием семантики и онтологий.

Некоторые авторы [83] используют термин «онтология» только для спецификаций знаний о мире, целью которых является описание структуры бытия безотносительно какой-либо инженерной задачи - такой концептуализацией занимается философия, и в философии термин «онтология» применяется именно в этом смысле – как спецификация знаний об окружающем мире. Программисты сталкиваются с иного рода задачами: они проводят концептуализацию с целью построения модели решаемой задачи. Таким образом, философы и программисты преследуют различные цели, когда проводят концептуализацию: первые имеют целью описание свойств окружающей реальности, а вторые строят формальную модель конкретной задачи.

Основной особенностью применения онтологического подхода в обработке данных и информационных технологиях является структура данных, а именно, в нереляционной структуре представления данных. Концептуальная схема подобного подхода представляет собой не что иное, как схему базы данных, подразумевается отсутствие конкретного вида архитектуры данных. Изменение концептуальной схемы, которая используется для представления данных, а также их обработки позволяет перейти к более широкому спектру инструментов работы с данными.

	База данных	База знаний
Тип содержания:	<ul style="list-style-type: none"> • Простой формат представление данных: цифры, символы; 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Данные+формат соотношения+правила применения</u>;
Структура:	<ul style="list-style-type: none"> • Таблица, документ; 	<ul style="list-style-type: none"> • Графы связей, онтология;
Использование:	<ul style="list-style-type: none"> • Обращение – получение информация; 	<ul style="list-style-type: none"> • Систематизация, выявление взаимосвязей, получение новых знаний;
Использование:	<ul style="list-style-type: none"> • Запрос-ответ. 	<ul style="list-style-type: none"> • Адаптация к контексту.

Рисунок 1 - Анализ различий между базой данных и базой знаний

Онтология имеет широкий спектр инструментов выражения, а также разработки, в частности, языки программирования: RDF, OWL, а также языки обеспечивающие работку логической машины: SWRL и языки, обеспечивающие обмен данными с реляционными базами данных и онтологиями: SPARQL.

– выполнимости концепта при фиксированном TBox, сложность проблемы выполнимости базы знаний или проблемы ответа на запросы при фиксированном TBox и меняющемся ABox (так называемая *сложность по данным*, англ. *data complexity*).

– Свойство конечности моделей, или иначе полнота относительно конечных моделей (finite model property): исследуется вопрос, всегда ли верно, что если концепт выполним (относительно TBox), то он выполним и на некоторой *конечной* модели (данного TBox). Из наличия данного свойства у конкретной ДЛ обычно следует, что для данной ДЛ более просто строится разрешающая процедура, например, табло-алгоритм.

– Свойство древовидности моделей, или иначе полнота относительно древовидных моделей (tree model property): аналогичный вопрос, но не о конечных, а о «древовидных» моделях. При этом древовидными здесь могут считаться структуры, слегка отличающиеся от традиционного понятия дерева; например, могут допускаться петли (ребра, ведущие из вершины в эту же вершину),

мультирёбра (несколько ребер различных «типов», ведущих из одной вершины в другую), транзитивные деревья (структуры, являющиеся транзитивным замыканием обычных деревьев), а также их комбинации. У логик, обладающих данным свойством, обычно более низкая вычислительная сложность, в частности, более просто строится разрешающий табло-алгоритм.

Рассмотрим язык RDF более подробно, изначально данный язык программирования разработан для того, чтобы описывать содержимое Web-сервисов в семантическом поле (Semantic Web). Одним из основных принципов применения языков программирования в семантической сети является возможность распознавания конечного продукта как компьютером (специальные программы-агенты, которые производили бы такое чтение), так и человеком. Таким образом, под RDF подразумевается не только сам язык, но также и различные дополнительные программные модули, необходимые для обеспечения полноценного чтения и обмена информацией, записанной на этом языке. [84]

Главным элементом языка RDF является триплет, он представляет собой совокупность трех сущностей:

1. Субъект.
2. Объект.
3. Предикат (Свойство).

Тройка имеет также представление в виде графа вида субъект–предикат–объект, где субъект и объект представлены как узлы, а предикат выступает в роли ребра, которое эти узлы соединяет.

Язык RDF основан на математическом аппарате дескрипционной логики. Дескрипционная логика (Description Logic – DL) базируется на формализмах семантических сетей и фреймов, но использует аппарат математической логики. В математической логике производится явное разделение на синтаксис и семантику. Синтаксис задает язык, с помощью которого записываются различные высказывания об элементах мира данной логической системы. Семантика задает ту часть описываемого мира, которая удовлетворяет заданным ограничениям. Таких частей может быть более одной или даже бесконечно много. Каждая такая часть

мира называется моделью данной логической системы. Опишем ограничения, налагаемые на синтаксис и семантику дескрипционных логик.

Язык любой дескрипционной логики состоит из следующих элементов:

1. Множество унарных предикатных символов, обозначающих имена понятий.
2. Множество бинарных предикатных символов, обозначающих имена ролей.
3. Рекурсивное определение термов понятий, задаваемое с помощью конструкторов на основе понятий и ролей.
4. Понятия обозначают множества сущностей, которые им принадлежат, т.е. это классы в программистской терминологии. Роли задают отношения между понятиями. В качестве конструкторов термов выступают как операции логики первого порядка, такие, как перечисленные выше конъюнкция, дизъюнкция, ограничения универсальности и существования и т.д., так и операции, задающие ограничения ролей, т.е. бинарных отношений.

Ввиду того, что RDF предполагается использовать для описания ресурсов, распределенных по разным участкам Web, необходимо как-то решить проблему идентификации имен узлов и ребер RDF графа, т.е. элементов троек. Для этого используется стандартный подход: каждый элемент описывается посредством так называемого Унифицированного Идентификатора Ресурса (URI – Uniform Resource Identifier [85]). Обычно URI представляет собой либо URL (Унифицированный Указатель Ресурса–Uniform Resource Locator [86]), содержащий информацию о местонахождении данного ресурса в Web, либо URN (Унифицированное Имя Ресурса – Uniform Resource Name [87]), позволяющий идентифицировать данный ресурс в некотором пространстве имен. Пространство имен представляет собой просто именованное множество элементов и используется, чтобы обеспечить уникальность имен этих элементов в Web.

Фундаментальными характеристиками той или иной ДЛ являются следующие:

1. Разрешимость: обычно рассматривают разрешимость проблем выполнимости концепта (относительно TBox), совместимости базы знаний, ответа на конъюнктивные запросы.

2. Вычислительная сложность: изучается вычислительная сложность указанных выше алгоритмических проблем относительно размера входных данных (концепта, TBox, ABox). Отдельно выделяют сложность проблемы В литературе по искусственному интеллекту содержится много определений понятия онтологии, многие из которых противоречат друг другу.

3. В рассматриваемой предметной области (классов, иногда их называют понятиями), свойств каждого понятия, описывающих различные свойства и атрибуты понятия (слотов, иногда их называют ролями или свойствами), и ограничений, наложенных на слоты (фацетов, иногда их называют ограничениями ролей).

4. Онтология вместе с набором индивидуальных экземпляров классов образует базу знаний. В действительности, трудно определить, где кончается онтология и где начинается база знаний.

В свою очередь, схема RDF, включенная в онтологию, представляет собой расширение языка RDF, позволяющее описывать простые онтологии данных, находящихся в хранилищах RDF. Так же, как схема базы данных описывает структуру базы данных в виде заголовков таблиц и связей между ними, схема RDF позволяет описывать структуру RDF-хранилища. Структура описывает хранилище в терминах типов и отношений между ними. На самом деле, как в этом чуть позже убедится читатель, схема RDF позволяет описывать только классификации с некоторыми дополнительными отношениями. Чтобы описать более сложные виды отношений, необходимо привлекать более мощные средства, такие, как OWL.

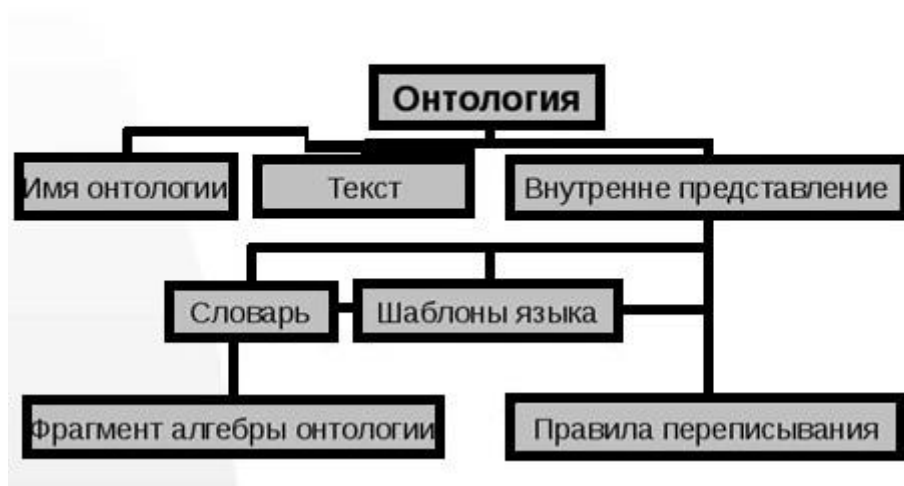


Рисунок 2 - Общая структура онтологии

В RDFS можно задавать классы, которые определяются в дескриптивной логике как унарные отношения. Для этого в RDFS определен специальный объект `rdfs:Class` – класс всех классов. Вообще, каждый объект RDF – это экземпляр класса `rdfs:Resource`, и `rdfs:Class` здесь не исключение. Но, с другой стороны, `rdfs:Resource` – это класс, а значит должен быть определен как экземпляр объекта `rdfs:Class`. Таким образом, объекты `rdfs:Resource`, и `rdfs:Class` определяются рекурсивно посредством друг друга – случай нередкий в языках описания онтологий.

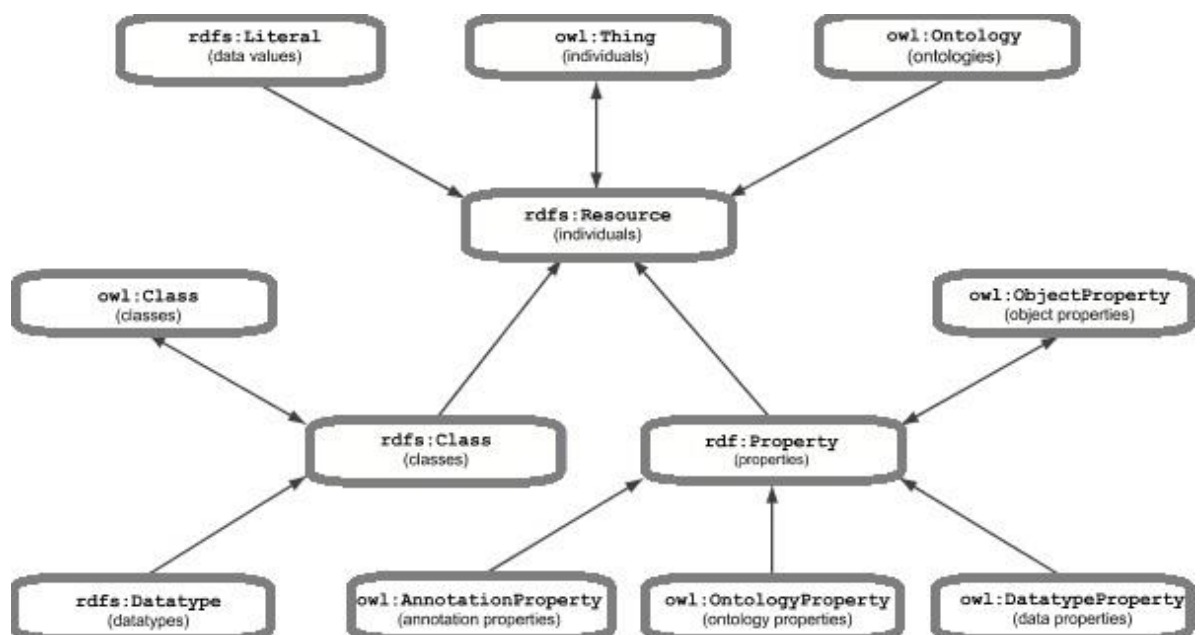


Рисунок 3 - Структура сущностей онтологической модели

При этом, с математической точки зрения, тройка представляет собой экземпляр некоторого бинарного отношения. В данном случае, отношение – это множество последовательностей, состоящих в точности из n элементов для некоторого заранее определенного натурального числа n . Если $n = 2$, то отношение называется бинарным, т.е. бинарное отношение представляет собой множество пар. Например, отношение «сенсоры» задает множество пар элементов вида («сенсор», «накопительное_устройство»).

При этом, каждая тройка определяет одну пару из некоторого бинарного отношения, но кроме этого дополнительно задает еще имя отношения, т.е. если имеется пара («сенсор», «накопительное_устройство») является составной частью отношения «подсистема», то эту пару можно выразить тройкой («сенсор», «подсистема», «накопительное_устройство»).

Для полноценного описания, кроме задания отношений, необходимо еще задать ограничения на их содержимое. Например, для отношения «подсистема» необходимо уточнить, что первый элемент каждой пары этого отношения должен быть фиксирующим устройством, а второй – хранилищем. Для задания такого ограничения необходимо ввести понятия «фиксирующее устройство» и «хранилище», после чего задать ограничение, выражающее тот факт, что если имеется тройка вида («имя 1», «подсистема», «имя 2»), то сущность «имя 1» должна быть экземпляром понятия «фиксирующее устройство», а сущность «имя 2» – экземпляром понятия «хранилище», такого рода операции выполняются посредством высказываний. При этом, для высказываний существует свой язык, включающий переменные и логические операции, в качестве логических операций могут выступать: логическое «или» (дизъюнкция), логическое «и» (конъюнкция) и логическое следование (импликация).

В рамках работы с онтологией, в частности, с формализацией данных, понятий и их отношений применяются различные подходы к представлению знаний и данных. Онтологический подход работы с данными подразумевает описание данных (знаний) посредством базы знаний. Для унификации вида базы знаний разработан ряд стандартов, в рамках данного исследования нами

рассмотрены стандарты, созданные консорциумом всемирной паутины (w3c): модель RDF (Resource Description Framework), языки OWL (Web Ontology Language), SPARQL, SWRL (Semantic Web Rule Language), а также их различные синтаксисы и нотации.

Использование данных стандартов также позволяет легко переносить разработанную БЗ между разными средствами работы с ней. В частности, можно создавать онтологию с использованием инструментальных средств с удобным графическим интерфейсом (в рамках данного пособия будет рассматриваться система Protégé, разрабатываемая в Стэнфорде), а использовать в дальнейшем в рамках своего программного кода. [88]

В рамках модели RDF онтология предполагает определение любых понятий предметной области в виде троек:

субъект – предикат – объект

ИТС потенциально имеет большое количество сущностей, отношений и атрибутов. Вместе с тем, при применении онтологического моделирования в рамках разработки интеллектуальной транспортной системы в диссертации сформулированы следующие междисциплинарные термины:

- онтологическая модель ИТС (ОМ ИТС) – программное формализованное описание совокупности условных единиц системы, включающее иерархию, пределы допустимых значений, форму обмена данными, логические правила функционирования; (Представляет собой онтологическое описание интеллектуальной транспортной системы, включающее в себя все виды архитектуры, а также логические правила, согласно которым осуществляются процессы внутри ИТС, в частности: цепочка обмена информацией, управление отдельными периферийными точками).

- условная единица ОМ ИТС – составная часть системы, находящаяся в иерархии, обладающая пределом значений и (или) формой обмена данными с другими частями системы и (или) подчиненная действию логических правил функционирования (также может представлять: совокупность формализованных потребностей пользователей, а также служебного функционала интеллектуальной

транспортной системы). При этом масштаб условной единицы ОМ ИТС (подсистема, система, периферия), а также её функционал определен потребностями пользователей интеллектуальной транспортной системы. Данное определение содержит в себе особенность, связанную с тем, что условная единица ОМ ИТС может быть начальной (в случае, если класс, индивид является точкой инициации исполнения функции) или конечной (в случае, если класс, индивид является конечным исполнителем функции); (Условная единица, которая необходима для упрощения процесса построения интеллектуальной транспортной системы, может быть представлена как классом, так и индивидом (АСУДД или светофорный объект)).

- класс – формализованное описание иерархии классов, индивидов, которые имеют ряд общих атрибутов, поведение или отношение в контексте ИТС. Класс определяет значения, ограничения для создания конкретных компонентов. Ограничен масштабом подсистемы, либо системы ОМ ИТС; (Условная единица ОМ ИТС, которая может включать в себя другие классы и (или) индивиды, может быть представлена в виде подсистемы, или многосоставного компонента ИТС, не может иметь одно конкретное математическое или логическое значение).

- индивид – конкретный, уникальный представитель определенного класса, реальный объект или событие, которое существует в ИТС, свойства которого имеют конкретные значения, является составной частью условной единицы ИТС, ограничен масштабом периферии, либо конкретным значением. (Индивид представляет собой условную единицу ИТС, ограниченную конкретным математическим или логическим значением. На практике: Детектор, сенсор, либо внутренняя переменная.)

- связь – отношение, которое устанавливает факт взаимодействия или зависимости между условными единицами ИТС (или между сущностью и значением данных), определяет структуру обмена данными в ИТС. Таким образом, понятие Связи является детерминирующим по отношению к аспекту начальной условной единицы ОМ ИТС, а также конечной условной единицы ОМ ИТС. (На практике этот термин включает в себя: Логическое обозначение связи –

соподчиненность, совокупность процессов, последовательность логических процессов, которые происходят исходя из возникающих значений, например, датчик фиксирует специальный транспорт и получает значение (S_1), а исходя из наличия этого значения запускается другое логическое правило, которое запускает светофорный объект в режим обеспечения приоритета проезда. 2. Фактическое наличие цифровой связи с наличием конкретного протокола и стандарта общения.

Логическое правило ОМ ИТС - определяет является ли Условная единица ОМ ИТС начальной или конечной, задает последовательность действий внутри модели для конечного принятия решения, включает в себя: условие активации правила (набор значений или событий), а также действие, которое происходит при выполнении условия. (Совокупность условий, при которых срабатывает логическое правило, а также действий, как механизма управления системой). Логическое выражение для единицы хранения данных онтологической модели ИТС выражено следующим образом:

Таким образом, исходя из научной концепции, в которой обозначена модель Онтологии:

$$O = \{C \ P \ R\}; \quad (1)$$

где C — множество понятий (классов) предметной области;

P — множество свойств этих понятий (классов);

R — множество связей между этими понятиями (классами).

Можно вывести следующее выражение для онтологической модели интеллектуальной транспортной системы:

$$ИТС_{ОМ} = \{(SubS_{ITS} \vee S_{SubS} \vee P_S) Lim_{ITS} DT_{ITS}\}, \quad (2)$$

где SS_{ITS} — подсистема ИТС как начальная условная единица ОМ ИТС, S_{SubS} — компонент, относящийся к конкретной подсистеме ОМ ИТС как начальная условная единица ИТС, P_S — периферийное оборудование конкретной системы ИТС как начальная условная единица ОМ ИТС; Lim — предел допустимых значений, описание конкретной подсистемы (системы, периферийного оборудования); DT_{ITS} — способ передачи, а также форма представления передаваемых данных и направление их передачи.

Для детализации, а также учета механизмов управления интеллектуальной транспортной системы, данное описание подходит не в полной мере, так как не выражает наличие механизмов управления и условий возникновения сценариев функционирования системы. Однако, применительно к онтологической модели интеллектуальной транспортной системы, данное описание подходит не в полной мере, так как не выражает наличие механизмов управления и условий возникновения сценариев функционирования системы. Исходя из данной потребности, а также в случаях, характерных для задач автоматизации цифровых производств и генерирования новых знаний, в онтологической модели, к стандартному триплету добавляется множество аксиом, которое, в отличие от остальных множеств, является потенциально бесконечным:

$$O = \{C P R A\}; \quad (3)$$

где A — множество аксиом, которое может быть получено из понятий, их свойств и связей между ними.

Применительно к ИТС данный формат выражен следующим образом:

$$ИТС_{OM} = \{(SubS_{ITS} \vee S_{SubS} \vee P_S) Lim_{ITS} DT_{ITS} LR_{ITS}\}, \quad (4)$$

где LR_{ITS} - совокупность логических правил, определяющих последовательности процессов работы системы, а также условия при которых они должны происходить.

Вместе с тем, алгоритм разработки онтологической модели интеллектуальной транспортной системы представляет собой совокупность действий, которые направлены на разработку семантической модели ИТС, которая имеет иерархию, минимальное количество дублирующих сущностей и связей, а также обладает достаточным количеством логических правил для выполнения функций, которые предполагаются интеллектуальной транспортной системой.

При разработке онтологии сервисов ИТС необходимо учитывать, что сущностями будут: транспортные средства, дороги, пешеходы, светофоры и другие элементы транспортной инфраструктуры. Кроме того, вся информация в онтологии представлена в виде триплетов, например, "автомобиль движется по дороге" или "пешеход пересекает улицу", при этом,

они также могут иметь атрибуты, выступающие в качестве характеристики сущностей, такие как скорость автомобиля, тип дороги или статус светофора.

В рамках проведенного анализа онтологических инструментов для данного исследования наиболее приоритетными к использованию определены стандарты, созданные консорциумом всемирной паутины (w3c), в частности:

- Модель RDF (Resource Description Framework), которая позволяет создавать сложные структуры базы знаний, а также наиболее точно описывать логические взаимосвязи между сущностями и классами;
- Язык OWL (Web Ontology Language) как имеющий наиболее унифицированный синтаксис для описания онтологии;
- SWRL (Semantic Web Rule Language) в качестве инструмента логического программирования внутри базы знаний;
- SPARQL как инструмент, позволяющий отправлять и получать ответы на запросы со стороны периферийного оборудования и баз данных;
- Protégé – среда разработки с логической машиной Pellet.

На данный момент, наиболее перспективное направление решения проблемы интеграции разнородной информации являются технологии семантического связывания на основе онтологий. В настоящей работе обсуждаются некоторые аспекты имплементации этой технологии в рамках существующего набора разнообразных коллекций в составе электронной библиотеки.

Одним из актуальных и приоритетных направлений в области интеллектуальных транспортных систем на сегодняшний день, является развитие и эволюция архитектуры ИТС, а также интеграционной платформы ИТС, которая сводится к созданию Федеральной сети ИТС. Благодаря интенсивному развитию и применению инновационных методов и практик в эксплуатации и разработке ИТС, в последние годы в этой области наблюдается резкое увеличение объема информации. Получаемые данные, представляющие собой, главным образом описание иерархической структуры системы с полной последовательностью получения, передачи, обработки информации, а также характера обработки

информации, получаемой с периферийного оборудования (датчики, детекторы, видеодетекторы). Таким образом, в условиях экспоненциального развития ИТС, и как следствие, кратного увеличения количества данных в рамках формирования единой сети ИТС в Российской Федерации. [89]

Необходимая информация сосредоточена также в многочисленных базах данных; в локальных базах, содержащих результаты фиксации средств наблюдения и результаты анализа этих данных. [90] В связи с тем, что многочисленные источники информации, необходимой для эффективной работы, в частности, транспортной системы, создаются в разных местах оборудованием, имеющим различный профиль, предназначение с использованием различных технологий и инструментария, речь идет о гетерогенных слабоструктурированных динамически изменяющихся информационных массивах большого объема. [91]

В настоящее время, в рамках проводимой работы, актуальной задачей представляется систематизация существующих динамических массивов, а также создание инструментария, позволяющего пользователю эффективно ориентироваться в информационном пространстве и осуществлять поиск необходимой информации. В результате анализа литературы был сделан вывод о том, что наиболее перспективным направлением решения проблемы интеграции разнородной информации являются технологии семантического связывания на основе онтологий [92].

Очевидно, что разработка онтологического описания определенной предметной области, невозможна без выработки, формирования набора, последовательности действий при разработке ОМ ИТС. Таким образом, Авторский алгоритм разработки онтологической модели интеллектуальной транспортной системы состоит из 5 основных фаз и 19 конкретных пунктов, которые определяют последовательность разработки, изображены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Алгоритм разработки онтологической модели интеллектуальной транспортной системы

Таким образом, важным моментом в создании онтологии является использование концептов, имеющих четкое определение. Более того, можно рекомендовать использовать в качестве концептов общепринятые, общеупотребительные, базовые понятия и термины, а также вовлекать общепринятые схемы и классификации в создаваемые онтологии. Большой исторический опыт по созданию классификационных систем в области биологии и медицины свидетельствует о том, что как только создаваемые классификации становятся большими, детализированными и разветвленными, они теряют гибкость и их уже трудно поддерживать. Для нужд данной ИС онтологии намеренно разрабатывались предельно компактными и обзримыми, чтобы сделать работу с ними удобной для пользователей. Например, анализ определенного концепта и связанных с ним данных позволяет формировать новые, дополнительные концепты онтологий и устанавливать новые связи-взаимоотношения.

2.3 Анализ основных методов и принципов онтологического моделирования при создании интеллектуальной транспортной системы

Основные составляющие теоретической составляющей описательных информационных моделей в рамках применения онтологической методики при разработке ИТС заключаются в выборе подходов к созданию модели той или иной

информационной системы, которой, в том числе, является интеллектуальная транспортная система. Вместе с тем, существует ряд других подходов, одним из популярных является использование нейросетей – то есть имитация цепочки биологических процессов, которые происходят при взаимодействии нейронов. Однако, при применении такого рода средств возникает коллизия, связанная с этической точки зрения так как создание вычислительных машин и алгоритмов, способных выполнять мыслительные функции является пограничной к функционалу, выполняемому человеком.

Нейросеть может быть обучена для применения в качестве средства поддержки принятия решений, однако с ростом числа факторов, требуемых для оценки ситуации, сложности их структуры, способов влияния на ситуацию, возможности нейросетей становятся все менее убедительными. Количество времени, требуемого на обучение нейросети растет экспоненциально количеству факторов, которые она должна учитывать, а результаты работы носят вероятностный характер, не обеспечивают логической доказуемости, а также не являются воспроизводимыми во многих случаях. [93]

Ключевым аспектом формирования функционала онтологии является дискрипционная логика, которая строится от логического мышления человека как когнитивного процесса, который можно воспроизвести в вычислительной среде. В связи с этим нами были сформирован ряд принципов построения онтологической модели интеллектуальной транспортной системы, а именно:

1. Принцип формального определения.

Заключается в том, что каждая сущность (понятие, класс, индивид) и отношение должно иметь точное, непротиворечивое и формализованное определение на выбранном языке логики.

2. Принцип минимальных онтологических обязательств.

Онтология должна быть сформирована таким образом, чтобы в процессе работы reasoner (встроенного, например, в Protege) у модели возникало минимальное количество предположений о мире, что обеспечит ее гибкость и охват. Описанию подлежат основные сущности (базовые), а не

конкретизированное представление отдельной узкой задачи. На примере ИТС это выглядит следующим образом, онтологическая модель должна иметь только основные понятия: «Дорога», «Транспортное средство», «Событие», «Участник движения» и так далее, но не должна быть ориентирована под конкретного производителя сенсоров или технических средств организации дорожного движения.

3. Принцип отсутствия референциальной неоднозначности.

Каждый примененный в онтологии термин должен иметь единственное значение, не допускается описание одного процесса, сущности, связи двумя и более терминами в одной онтологии. При создании ИТС в большинстве случаев допускается присвоение разных имен одним и тем же объектам в рамках разных подсистем, например, «светофор», «светосигнальная установка», «регулятор перекрестка», для онтологии, в свою очередь, необходим один, конкретный канонический термин, либо необходимо установить отношение эквивалентности, при которых все интерпретации будут обладать одинаковыми характеристиками.

4. Принцип Таксономии (Иерархичности).

Система классов онтологии должна быть выстроена в форме строгой иерархии по принципу «is-a», от общего к частному, отсюда следует, что и наследование в модели должна подчиняться логике: «Если В является подклассом А, то каждый экземпляр В является экземпляром А». [94]

5. Принцип диверсификации.

Онтология должна иметь модульную структуру, с точки зрения эффективности одна монолитная, сложная онтология хуже, чем несколько связанных между собой. Применительно к интеллектуальным транспортным системам подразумевается, что наиболее эффективной структурой будет следующее:

- Онтология интеграционной платформы, верхняя часть иерархии в которую поступают уже обработанные данные, скомпилированные для принятия решений верхнего уровня иерархии.

– Онтология каждой из представленных подсистем ИТС в части функциональной архитектуры, является онтологией среднего уровня, которая может обеспечивать принятие решения на локальных уровнях ИТС.

– Онтология первого слоя иерархической структуры ИТС по соотношению к каждой из функциональных подсистем.

6. Принцип практико-ориентированности онтологии.

Суть любой онтологии заключается в решении конкретной задачи, соответственно, ее структура должна отражать те данные, которые представлены в ИТС и тот спектр запросов, которые будут поступать.

Определение понятия интеллектуальной транспортной системы, а также транспортно-логистической системы является недостаточно исследованным вопросом, что вызывает разрозненность терминов в научной и правовой сфере. Подобные особенности научного поля подчеркивают необходимость формулирования единой концепции, которая бы учитывала, как технологические, так и организационные компоненты переработки данных, необходимых для эффективного управления. При учете вышеуказанных особенностей, на наш взгляд, одной из основных концепций применения онтологии информационных систем в ИТС является онтологическая модель интеллектуальной транспортной системы (ОМ ИТС).

Описательная информационная модель представляет собой формализованное представление предметной области, которое описывает структуру данных, их взаимосвязи и семантику. В отличие от математических или имитационных моделей, описательная информационная модель фокусируется на логической организации информации, что делает её ключевым инструментом при проектировании сложных информационных систем. ОИМ имеет следующие основные составляющие:

Применение онтологических моделей позволяет дать формализованное определение понятия, атрибутов, отношений, а также логических правил, что имеет ряд общих характеристик с FRAME – инфраструктурной архитектурой европейской интеллектуальной транспортной системы (ИТС). [95]

В общем, FRAME и ОМ ИТС — концептуально схожие подходы к созданию интеллектуальных транспортных систем, однако, механизмы реализации значительно отличаются: онтологическая модель конкретизирует количество сущностей, количество связей и т.д.; логика функционирования — стандартизирована; основа концепции — технологии семантического программирования; онтологической моделью предусмотрена возможность извлечения новых знаний; отсутствие ограничений в части технологий и языков программирования; использование метода логической декомпозиции для упрощения ИТС, выделяются ключевые логические сущности. Во FRAME — functional, service, physical views, в ОМ ИТС — формальное определение условных единиц; обеспечение семантической интероперабельности. Основой FRAME и ОМ ИТС является формальный концептуальный каркас; структура выстроена на основе сервисно-ориентированной архитектуры, описание интеллектуальной транспортной системы как взаимосвязанных сервисов; абстрактное представление как основа разработки интеграции, Reference Architecture и ОМ ИТС (Верхняя часть иерархии) представляют собой непротиворечивый теоретический фундамент, структура для дальнейшей разработки конкретных систем или интеграции существующих; моделирование функциональных возможностей и ограничений системы, обеспечение логического аспекта посредством пред- и постусловий, ограничений и политик; если привести сравнение к выводу, то ОМ ИТС — формально-логический уровень, FRAME — описание функций и пользовательских потребностей.

Исходя из изложенных принципов разработки интеллектуальной транспортной системы на основе комплекса онтологических моделей, изложенных выше разработана авторская интеллектуальная транспортная система. Онтологическая модель интеллектуальной транспортной системы, приведена на рисунке 5.

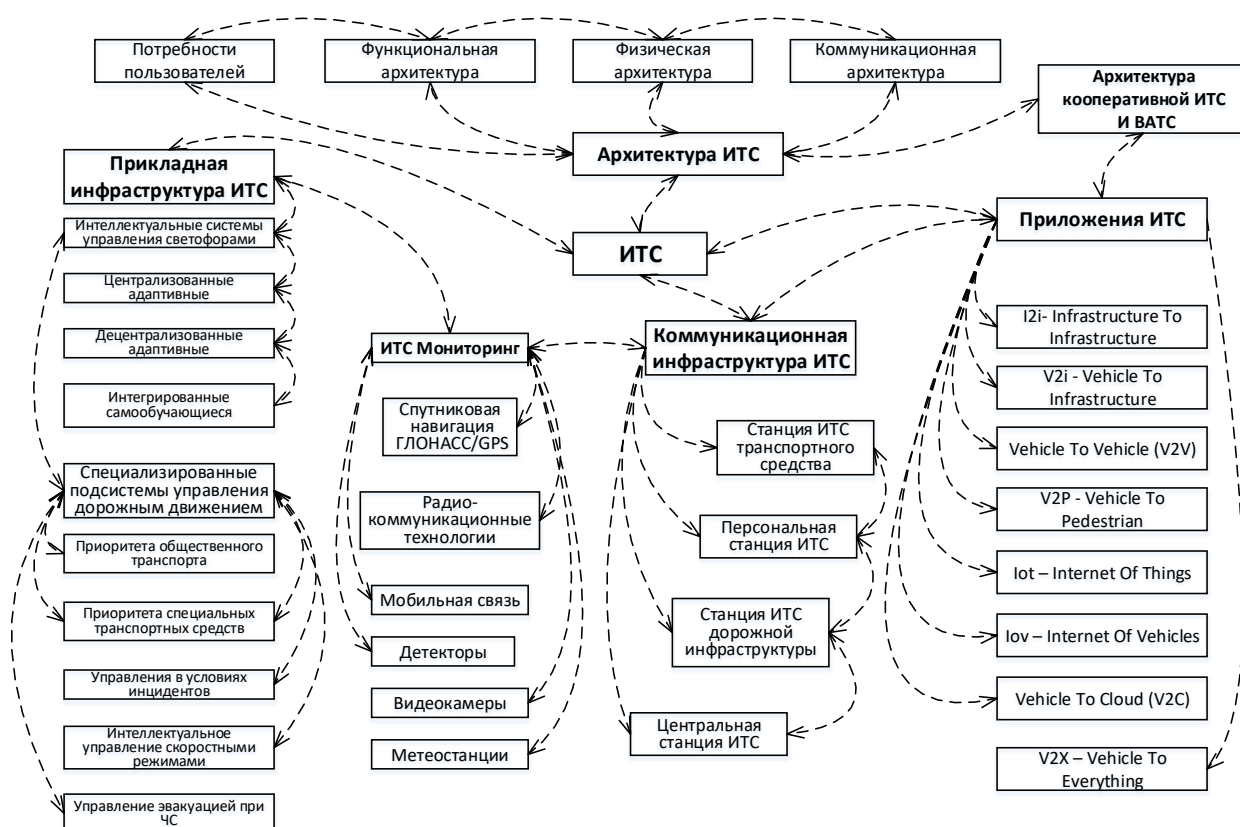


Рисунок 5 - Онтологическая модель разработанной интеллектуальной транспортной системы

На схеме отображены основные виды применяемой архитектуры:

1. Физическая архитектура, которая описывает аппаратные компоненты и их распределение. Включает в себя 4 основных слоя, Периферийный (оконечные устройства), Агрегационный (локальные серверы хранения и обработки данных), Центральный уровень (централизованные серверные мощности для развертывания основных вычислительных моделей, а также семантических хранилищ и средств обработки базы знаний);
2. Функциональная архитектура, определяет логическую структуру программных сервисов и их взаимодействие. В этой связи, в отличие от применяемых повсеместно стандартных наборов программных сервисов, предлагаемый вариант функциональной архитектуры дополнен сервисами: Сервис управления онтологиями и данными, который включает машину логического вывода и семантическое хранилище и отвечает за хранение онтологии и выполнение семантических запросов на языке SPARQL, также обеспечивает генерацию новых знаний на основе правил онтологии; Сервис семантического

управления, генерирует сценарии управления на основе выводов машины логического вывода (оптимизация дорожного движения, управление светофорными объектами и т.д.).

3. Коммуникационная архитектура, регламентирует протоколы и стандарты обмена данными, в частности: Технологии связи DSRC, C-V2X, Cellular, Wi-Fi Ethernet; Протоколы и форматы обмена сообщениями, в частности, для передачи семантически аннотированных данных используются стандартизированные форматы RDF и JSON-LD с расширенными семантическими метками (сообщения содержат ссылки на классы, взаимоотношения и другие сущности, определенные онтологией). Коммуникационная архитектура, в свою очередь взаимосвязана с коммуникационной инфраструктуры, так как спектр решаемых ею задач определяет техническое и программное наполнение инфраструктурной части. Таки образом, инфраструктура состоит из следующих станций: ИТС транспортного средства, персональная станция, станция дорожной инфраструктуры, а также центральная станция ИТС.

4. Архитектура кооперативной ИТС, реализует взаимодействие между участниками движения, в частности в форматах: V2V (Vehicle to vehicle, обмен данными о скорости, направлении движения, выявление аварийных ситуаций); V2I (Vehicle to infrastructure, взаимодействие с техническими средствами организации дорожного движения, светофорными объектами, парковками); V2P (Vehicle to pedestrian, предупреждение о пешеходах, велосипедах, средствах индивидуальной мобильности); V2N (Vehicle to network, подключение к облачным сервисам через сотовые сети).

5. Архитектура высокоавтоматизированного транспортного средства, отвечает за обеспечение работы автономных транспортных средств, в частности: сенсорный комплекс (многомодульные системы восприятия), камеры, лидары, радары; система локализации (позиционирование ТС), обеспечение высокоточного определения местонахождения ИТС; система управления (планирование траектории, контроль движения ТС); система безопасности (обеспечение функционирования механизмов full-safe).

При этом, как Архитектура К-ИТС, так и ВАТС включает в себя следующие приложения:

- I2I (Infrastructure to Infrastructure), обеспечивает взаимодействие между элементами дорожной инфраструктуры. Основные функции – координация работы светофорных объектов на смежных перекрестках, обмен данными между дорожными датчиками и управляющими устройствами, синхронизация систем управления дорожным движением, совместное использование ресурсов инфраструктуры;

- V2I (Vehicle to infrastructure), обеспечивает двустороннюю связь между транспортными средствами и дорожной инфраструктурой. Основные функции – получение информации о дорожных условиях (обстановке), передача данных о транспортном потоке от ТС к инфраструктуре, доступ к платным услугам, получение рекомендаций по скоростному режиму и маршрутизации;

- V2V (Vehicle 2 vehicle), обеспечивает прямой обмен данными между транспортными средствами, в рамках следующего функционала: - обмен информацией о скорости, направлении, ускорении ТС, предупреждение об экстренном торможении впереди едущего ТС, либо возникновения дорожных заторов, координация маневров при перестроении и объединении потоков, совместное обнаружение препятствий и опасностей в рамках движения;

- V2P (Vehicle to Pedestrian), взаимодействие между транспортными средствами и пешеходами. Подразумевает следующие сценарии взаимодействия: - обнаружение пешеходов и велосипедистов в слепых зонах, предупреждение о появлении пешехода, оповещение пешеходов о приближающихся ТС, защита детей, пожилых людей в зонах учебных заведений и больниц;

- IOT (Internet of things) в транспорте, объединение существующих сенсоров, камер и датчиков, а также иного связанного периферийного оборудования в единую систему. Имеет следующие компоненты: дорожные сенсоры, датчики и камеры, системы мониторинга состояния дорожного покрытия, системы навигации, автоматизированное управление парковкой, датчики отслеживания состояния окружающей среды и погоды;

- IOV (Internet of Vehicles), отдельное направление IoT, сфокусированное на подключенных транспортных средствах. Имеет ряд особенностей: распределенная сеть интеллектуальных (подключенных) транспортных средств, облачная платформа для управления и анализа данных (на основе онтологической модели существующих подключенных ТС, а также инфраструктуры), поддержка автоматических постоянных обновлений, интеграция с существующими системами Умного города;

- V2C (Vehicle to cloud), обеспечивает связь между транспортными средствами и облачными сервисами. Функции: передача данных телематики, доступ к навигационным и информационным сервисам, обновление программного обеспечения и карт, хранение и анализ исторических данных на основе постоянно дополняемой онтологической модели;

- V2X (Vehicle to everything), является всеобъемлющим инструментом (концепцией) связи транспортного средства со всеми составляющими интеллектуальной транспортной системы. Комплексность данного подхода выражена в объединении всех видов связи, создании единой коммуникационной экосистемы, обеспечение сквозной безопасности и эффективности, поддержке автоматизированного вождения.

- Прикладная архитектура, обеспечивает функционирование следующих сервисов: ИТС управления светофорами, который включает в себя Централизованные адаптивные, Децентрализованные адаптивные, а также интегрированные самообучающиеся светофорные объекты; а также комплекс Специализированных подсистем управления дорожным движением, обеспечивающих приоритет движения общественного и специального транспорта, управление в условиях инцидентов, управление эвакуацией при чрезвычайных ситуациях, а также интеллектуальное управление скоростными режимами.

Кроме того, прикладная модель также включает в себя систему ИТС мониторинга, которая включает в себя часть периферийного оборудования, в частности: оборудование обеспечивающее бесперебойное функционирование системы спутниковой навигации (ГЛОНАС, GPS), радио коммуникационное

оборудование (локального действия), модули мобильной связи (поддерживающие актуальные стандарты обмена данными), сенсоры (датчики), средства видео фиксации, а также метеорологическое оборудование.

Построение наиболее точной онтологической модели подразумевает определение ключевых компонентов и взаимосвязей, необходимых для моделирования транспортных процессов, так как именно это позволит создать более полное и точное представление о том, как различные элементы ИТС взаимодействуют друг с другом.

Использование онтологии в ИТС также может быть выражено в возможности интеграции данных от различных источников, таких как сенсоры, системы мониторинга и так далее, что позволяет обеспечить высокую степень взаимосвязанности и взаимодействия между компонентами системы, необходимую для реализации современных требований в области транспорта и логистики. Данные о движении, заторах, дорожной обстановке, состояниях дорог и других элементах инфраструктуры должны обрабатываться и передаваться в реальном времени, что требует от систем высокой степени адаптивности и поддержки соответствующих технологий. Использование онтологии как основной единицы хранения и обработки информации в рамках данной архитектуры позволяет улучшить следующие процессы в разработке и работе ИТС:

Маршрутизация – учет не только расстояния, но и таких факторов, как текущая интенсивность дорожного движения, сечение дороги, погодные условия, дорожную обстановку, наличие дорожных работ.

Управление светофорами – адаптивное регулирование на основе реальной интенсивности движения.

Прогнозирование заторов – анализ исторических данных и выявление закономерностей.

В данном случае, применения описательной информационной модели (онтологической модели) позволит преобразовать разнородные данные в общий, единый формат. Например, информация о местоположении автомобиля может

поступать в разных системах координат (WGS-84, локальные системы аэропортов), но онтология обеспечивает их приведение к общему стандарту.

Семантическая модель авторской интеллектуальной транспортной системы структурирована в следующем виде: Физическая архитектура, включает в себя онтологический уровень (семантические хранилища, набор логических SWRL правил, система принятия решений); Функциональная архитектура; Коммуникационная архитектура; Архитектура кооперативной ИТС; Архитектура высокоавтоматизированного транспортного средства; Прикладная архитектура.

Применение онтологии может простимулировать развитие интеллектуальных транспортных систем в Российской Федерации, а также изменение операционных процедур приведёт к децентрализованной и динамической интеграции систем, сервисов.

Интеллектуальные транспортные системы функционируют как сложные программно-технические комплексы, в которых особую роль играют решения, основанные на обширных знаниях, включающих в себя различные аспекты, такие как поведение пользователей, состояния транспортных средств и условий дорожного движения. Высокая степень систематизации данных и минимизация сбоев и ошибок в таких системах может быть обеспечена наличием стандартов, по которым можно разработать и интегрировать новые решения. Однако, в условиях быстрого технологического прогресса, а также перманентной необходимости интеграции и адаптации систем становится актуальной гибкость системы и возможность изменения существующих стандартов и логик взаимодействия составных частей друг с другом. Онтологическая модель обеспечивает необходимый уровень «гибкости» системы благодаря широкому спектру инструментов:

- возможность построения таксономии исходя из тех правил и логик, которые применимы в конкретном сценарии;
- возможность масштабировать существующие сущности до необходимого уровня;

- применение логических правил в онтологической модели позволяет без ограничений создать то количество закономерностей и ограничений, которое необходимо;
- интеграция в любую из существующих систем.

Использование онтологий в контексте ИТС позволяет не только унифицировать базу знаний, но и облегчить внедрение новых технологий, а также оптимизировать взаимодействие всех участников транспортного процесса.

Таким образом, процесс формирования онтологической модели интеллектуальной транспортной системы представляет собой интеграцию различных технологий, направленных на управление и оптимизацию транспортных процессов. В данный процесс также включено размещение и реализация систем, обеспечивающих сбор, обработку и распределение данных о транспортной ситуации, такие данные используются для формирования предсказуемых и безопасных транспортных потоков, что особенно важно в условиях растущего числа транспортных средств.

В данном случае, онтологическая модель служит основой для разработки адаптивных моделей, которые способны учитывать изменения в дорожной обстановке, меняющиеся потребности пользователей и новые требования со стороны законодательства. Кроме того, обеспечение постоянного покрытия тех или иных изменений в работе системы необходимо выбрать среду разработки и вспомогательные программные инструменты, которые позволят обеспечить необходимые параметры.

Применение инструментов онтологического моделирования в процессе создания ИТС подразумевает использование конкретного программного инструмента, языка программирования. Основные характеристики существующих технических решений, а также их преимущества и недостатки, приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Сравнительный анализ существующих подходов к созданию онтологической модели

Инструмент	Поддерживаемые языки	Преимущества	Недостатки	Применение в ИТС
Protégé	OWL, RDF	- Интуитивный интерфейс -reasoning-систем	Ограниченная работа с большими онтологиями	Концептуальное моделирование
GraphDB	RDF, SPARQL	- Высокая производительность - Поддержка семантических запросов	Требует настройки сервера	Интеграция данных от датчиков в реальном времени
Apache Jena	RDF, OWL, SPARQL	- Гибкость - Возможность встраивания в Java-приложения	Сложность для новичков	Обработка потоковых транспортных данных
WebVOWL	OWL, JSON	- Визуализация онтологий в браузере - Простота использования	Ограниченные возможности редактирования	Демонстрация транспортных онтологий заказчикам

Таким образом, исходя из приведенных критериев выбора инструмента для работы с ИТС наиболее эффективными являются: Редактор онтологий Protege, а также вспомогательные инструменты в виде: Apache Jena (обмен данными в реальном времени) и GraphDB (визуализация).

Protégé как инструмент онтологического представляет собой мощный инструмент для создания, анализа, планирования и управления действиями в онтологии интеллектуальной транспортной системы, позволяя гармонизировать различные компоненты и обеспечивать эффективный обмен информацией.

Онтологическая модель прочный фундамент для дальнейших исследований и практических разработок в области транспорта и логистики, взгляд на которые в

современных условиях требует применения новых подходов и технологий. Онтологическая модель, разработанная для функционирования интеллектуальной транспортной системы должна иметь широкий спектр охвата функций ИТС, начиная от интеграции высокоавтоматизированных и полностью автоматизированных транспортных средств до взаимодействия с «умной» инфраструктурой.

Согласно последним исследованиям, интеграция различных компонентов системы, включая датчики, использующиеся как в транспортных средствах, так и в дорожной инфраструктуре, позволяет значительно повысить уровень безопасности и производительности дорожного движения. Например, использование датчиков в железнодорожных системах дает возможность более точно контролировать потоки и повышать качество обслуживания пассажиров. [96]

При разработке онтологий для ИТС необходимо учитывать специфику технологий, применяемых для обработки информации и управления данными. Это может включать автоматизированные системы управления ресурсами, которые исторически основывались на централизованных и иерархических моделях. Однако, поскольку условия и требования к тем системам эволюционировали, современный подход должен учитывать децентрализованные модели, что позволяет системе быть более гибкой и адаптивной к изменениям внешней среды.

Отдельно следует отметить важность разработки онтологий на основе процессно-объектного подхода, который успешно применялся в железнодорожной отрасли. Так как процессно-объектный подход позволяет не только лучше систематизировать информацию, но и улучшить взаимодействие между всеми заинтересованными сторонами, что в свою очередь влияет на качество управления транспортными процессами. Внедрение таких подходов позволит интегрировать различные компоненты ИТС в одно целое, обеспечивая более высокое качество принимаемых решений. [97]

Современные требования к разработке и внедрению интеллектуальных транспортных систем подразумевают осознание значимости онтологий в обеспечении интеграции и упрощении взаимодействия всех компонентов системы,

необходимых для достижения реальных результатов в области повышения эффективности и снижения рисков. Повышение эффективности работы через онтологию может способствовать более эффективному обмену данными не только между транспортными средствами, но и между различными секторами, обеспечивая единую экосистему для транспортной и логистической отрасли. Что в свою очередь, как показывает практика, может существенно снизить затраты, повысить производительность и безопасность на дорогах.

Важно рассматривать эволюцию ИТС в контексте создания единой платформы, на которой будут интегрированы различные аспекты от планирования до исполнения логистических операций, что позволит уменьшить количество ошибок и повысить скорость реакции на изменения. Однако, применение дополнительного онтологического слоя в ИТС может снизить скорость обработки сырых данных на 15-20% (в зависимости от объема данных), но при этом, скорость принятия системой комплексного решения происходит в 3-5 раз быстрее, следовательно, скорость реагирования системы на инциденты (оценка ситуации, координация служб) также происходит быстрее.

Таким образом, жертвуется незначительная доля производительности на уровне вычислительных мощностей для получения качественного скачка в скорости, комплексности и эффективности принятия решений на уровне интеграционной платформы.

Разработка интеллектуальных транспортных систем наличие четкого понимания ключевых компонентов и их взаимосвязей обретает особую значимость. Каждый из компонентов требует всестороннего анализа для создания функционально завершенного и эффективного решения, которое будет учитывать различные аспекты управления транспортными потоками.

В свою очередь, разработка концептуальной модели онтологии для интеллектуальных транспортных систем (ИТС) подразумевает высокий уровень детализации и структурированный подход, который обеспечит адекватное представление интегрируемых данных и поддержку взаимодействия между различными компонентами системы.

Проблемы онтологического инжиниринга становятся особенно актуальными при разработке онтологий для таких сложных систем, как ИТС. Необходимость в стандартизации и унификации терминов, а также в адекватном описании процессов и связей приводит к разработке более сложных концептуальных моделей, включающих в себя многоуровневую структуру. Конкретные примеры применения методологии демонстрируют возможность реализации эффективных процессов автоматизации и интеграции данных в контексте конкретных областей, таких как живопись. Параллели с областью ИТС показывают, что подобные методологии могут серьезно ускорить процесс внедрения онтологий и повышения качества принимаемых решений в реальном времени.

Таким образом, применение онтологии может простимулировать масштабное развитие интеллектуальных транспортных систем в Российской Федерации. Аргументы, методы и подходы, изложенные в этой части нашей работы обеспечат масштабное внедрение устойчивых сервисов в сложных городских условиях, а также гарантирует интероперабельность и бесперебойную доступность высококачественных услуг для конечных пользователей, которые будут успешными с коммерческой точки зрения. [98]

Вместе с тем, ключевым аспектом внедрения онтологии является поддержка обмена информацией не только внутри транспортной системы, но и на стыке с другими системами, что требует учета множества факторов, таких как временные задержки, отказоустойчивость и адаптация к изменяющимся условиям. Для этого важно, чтобы онтология покрывала свойства и поведение элементов системы, включая динамику данных, поступающих от датчиков и других источников. Так, интеграция различных типов сенсоров позволяет более эффективно получать информацию о состоянии дорожной обстановки и транспортных средствах, что в свою очередь усиливает аналитику и предсказательные возможности системы.

Внедрение онтологии в ИТС также может обеспечивать интеграцию с другими системами на уровне обмена данными, что ведет к созданию масштабируемых решений, что в свою очередь, увеличивает производительность всей системы. Структура и компоненты интеллектуальной транспортной системы

формируют единую экосистему, нацеленную на улучшение транспортного обслуживания и повышение уровня безопасности на дорогах, из-за чего происходит снижение энергетической нагрузки от транспортного сектора как информационной системы. [99]

Кроме того, в силу того, что системы оперативного контроля, являющиеся неотъемлемой частью ИТС - отвечают за координацию действий всех участников дорожного движения, включая в себя оперативное взаимодействие с службами экстренного реагирования, управление общественным транспортом, а также оповещение водителей о возникших затруднениях на дорогах. На наш взгляд оперативность и стабильность функционирования ИТС должна быть обеспечена благодаря применению онтологической модели как процессов, происходящих внутри функциональных подсистем, так и физической архитектуры системы.

При этом важной составной частью является система баз знаний в купе с логическими правилами, обеспечивающими автоматизированность управления, которая позволяет быстро и эффективно принимать решения по управлению транспортными потоками. Автоматизация процессов управления существенно снижает вероятность человеческого фактора в принятии решений и повышает общую надежность системы.

В контексте функционирования ИТС как информационной системы, применение иных подходов и технических решений является не корректным в силу определенных особенностей. Таким образом, нейросети как инструмент решения задач транспортной инженерии имеет ряд ограничений, в частности, выход за пределы заранее ограниченного круга ситуаций и сценариев приводит к невозможности получить от нейросети результат, пригодный для дальнейшего применения.

Кроме того, технологии машинного обучения имеют ряд схожих недостатков, которые, в случае их применения в ИТС, ограничивают функциональную составляющую системы, а также точность конечного результата. Онтологическая модель (имитация логического мышления в рамках формализованных знаний) не имеет подобного рода ограничений и недостатков.

Коррекция логической схемы при изменении условий требует куда меньших усилий, чем переобучение нейросети, при этом, при составлении логических моделей принципиально важным становится их корректность, непротиворечивость, релевантность, зависящая от разработчика модели.

3 ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ РАЗРАБОТКИ ОНТОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СОЗДАНИИ АВТОРСКОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

3.1 Онтология как инструмент создания базы знаний сферы интеллектуальных транспортных систем

На данный момент происходит активная фаза интеграции и развития новых технологий и методик разработки интеллектуальных транспортных систем, появляются инновационные способы обработки данных внутри информационных систем. Развитие цифровых технологий открывает возможность для разработки и применения новых подходов к созданию систем управления данными.

В данном исследовании рассматривается вопрос применения онтологических инструментов (Платформа разработки Protege, язык программирования OWL), с целью создания базы знаний ИТС, которая позволит систематизировать и упорядочить дальнейшее развитие архитектуры интеллектуальной транспортной системы. Кроме того, анализируются возможности, которые возникнут вследствие разработки концептуальной схемы, выражающейся в базе знаний, позволяющей оптимизировать набор процессов, связанных с созданием и функционированием интеллектуальной транспортной системы посредством применения онтологического подхода. [100]

Одним из методологических ограничений исследования по онтологии интеллектуальной транспортной системы является неоднозначность и сложность терминологии, противоречия между методическими требованиями при создании ИТС и практикой внедрения ИТС. Поэтому одним из возможных ограничений может быть использование определенных предположений и упрощений при разработке онтологической базы знаний. Предметной областью данной статьи является применение онтологического подхода к разработке архитектуры интеллектуальной транспортной системы. Применение данных методов и инструментов разработки позволит упорядочить и систематизировать процессы и потоки данных внутри ИТС, а также выявить новые знания.

Процесс разработки онтологической модели, в том числе для интеллектуальной транспортной системы начинается с полного анализа необходимого комплекса составляющих (подсистемы, отдельные процессы внутри и т.д.). Для обеспечения наиболее точного результата в разработке онтологии необходимо иметь точное понимание о том какой вид архитектуры ИТС необходима для конечного пользователя. Основные составляющие разработки онтологии интеллектуальной транспортной системы приведены на рисунке 6.



Рисунок 6 - Диаграмма обмена данными информационной части системы

Информационная составляющая в онтологическом контексте позволяет унифицировать терминологию, присваивает конкретные определения для каждого понятия. Кроме того, совокупность связей, которые возникают в процессе работы подсистем ИТС, становятся более очевидны, возникают новые взаимосвязи, что непосредственно влияет на интероперабельность системы.

Первый элемент информационной части – дорожная сеть, она является физической основой онтологии и может содержать:

Классы:

- «Узловое соединение» - точка соединения элементов УДС, включая подклассы: «Перекресток», «Примыкание» и т.д.;
- «Связь» - участок между двумя узлами, включающий подклассы: «Проезжая часть», «Полоса», «Трамвайные пути», «Пешеходный переход», «Велосипедная дорожка»;
- «Сегмент» - промежуток УДС между узловыми соединениями. Имеет связь с остальными классами информационной части системы;

- «Точка интереса» - та часть инфраструктуры, которая связана со сосредоточением людей и транспорта, содержит подклассы: «Остановка», «АЗС», «Парковочное пространство», «Учреждение», «Торговый центр» и т.д.;

- Технические средства организации дорожного движения, содержит подклассы «Дорожные знаки», «Указатели», «Вертикальная дорожная разметка», «Горизонтальная дорожная разметка», «Автоматизированные средства организации дорожного движения» и так далее.

Атрибутивная часть, в данном случае, содержала бы следующие составляющие «расстояние», «пропускная способность», «скоростные диапазоны», «количество полос», «уклон дороги», «радиус кривизны», «аварийность». В свою очередь совокупность отношений, возникающая между всеми указанными классами и атрибутами, сводилась бы к: «быть частью», «подключено к», «имеет ограничения», «находится на», «управляет».

Особым условием при построении части системы, которая представляет собой онтологическую модель дорожной сети является соответствие существующим техническим регламентам, государственным стандартам, а также отраслевыми дорожными методическими документами, в частности:

- Технический регламент таможенного союза 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог», а также совокупность действующих стандартов, которая указана в данном документе;

- ГОСТ Р 52398 – 2005 «Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования», для определения иерархии дорог, а также их атрибутов; [101]

- ГОСТ Р 52766 – 2007 «Дороги автомобильные общего пользования. Элементы обустройства. Общие требования.», для составления подробного описания технических средств организации дорожного движения; [102]

- Отраслевые методические стандарты в части определения порядка вычисления атрибутов онтологии.

В свою очередь, контроль спроса на мобильность со стороны населения выражен следующей совокупностью классов, атрибутов и отношений:

Классы:

- «Поездка» - целевая единица данной части системы, обозначающая перемещение из точки А в точку Б;
- «Маршрут» - совокупность информационных связей, возникающих в следствии перемещения транспортного средства (пользователя) из точки А в точку Б, в зоне действия системы;
- «Транспортное средство» («Пользователь»), лицо, использующее сервис (совокупность сервисов) для перемещения в зоне действия системы (транспортном районе);
- «Транспортный район», совокупность Точек интереса, объединенная по географико-социальному принципу в единую зону спроса;

Атрибуты, обеспечивающие полноту информации, содержащейся в спросе на мобильность выстроены следующим образом:

Для класса «Поездка» - время_начала, точка_отправления (О), точки назначения (D), назначение (коммерческая, для собственных целей), приоритет (присваивается исходя из подстатуса: скорая помощь, общественный_транспорт, полиция, спец. транспорт);

Для класса «Транспортное средство» («Пользователь») – транспортный_район, тип_транспортного_средства, приоритет, время_в_пути, точки_интереса, выбранный_вид_мобильности;

В свою очередь, отношения в рамках данной подсистемы имеют следующие аспекты:

- имеет_маршрут;
- имеет_поездку;
- имеет_тип_тс;
- относится_к_транспортному_району;
- вид_мобильности;
- имеет точки интереса;

Основными источниками данных для данной подсистемы будут являться данные сотовых операторов, модели транспортного спроса (в частности, модели, разработанные для агломераций и крупных городов, а также комплексные схемы организации дорожного движения, данные системы «Умный город», данные системы «Паутина» и иных систем, агрегирующих данные, связанные с потоковым изображением).

Одной из важных подсистем является учет параметров транспортных потоков, которая описывает, учитывает, предлагает перечень действий для их корректировки в реальном времени. Классовая составляющая данной подсистемы выглядит следующим образом:

- «Дорожное движение» - класс, описывающий параметры транспортного потока в отдельном Сегменте, также может быть привязан к Полосе или Связи.
- «Событие» - состоит из следующих подклассов: Затор, ДТП, Дорожные работы.
- «Мера реагирования» - класс, описывающий совокупность возможных мер для нормализации дорожной обстановки на основании атрибутов и отношений других классов данной подсистемы.

Данной совокупности классов соответствуют следующие метрики: - интенсивность_движения; - скорость_движения; - плотность_движения; - задержка_движения; - уровень_обслуживания; - наличие_инф_ДТП; - наличие_инф_Ремонт; а также соотношения: - измеряется; - причина; - имеет_значение.

Применение данной подсистемы подразумевает соответствие атрибутов и методов их измерения следующим государственным стандартам: ГОСТ Р 33466-2015 «Дороги автомобильные общего пользования Методы измерения интенсивности движения транспорта» [103]; ГОСТ Р 33467-2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Методы измерения скорости движения транспортных средств» [104]. В рамках взаимодействия с существующими ИТС наиболее эффективной будет интеграция в автоматизированную систему

управления дорожным движением города (агломерации) в качестве семантического слоя.

Стратегии управления дорожным движением описаны следующей совокупностью классов:

- «Стратегия управления», имеющий подклассы: «Координация светофоров», «Управление съездами», «Управление знаками переменной информации», «Перенаправление потоков». Атрибуты: время_активации, целевой_параметр;
- «Светофорное регулирование», атрибуты: цикл, фаза, длительность_фазы;

Вышеуказанным сущностям соответствуют следующие отношения:

- контролирует (как правило относится к перекресткам и инициируется стратегией или иными системами управления);
- влияет (как правило относится к параметрам транспортного потока в контексте оценки эффективности примененных мер);
- активация_при (активация стратегий управления при возникновении события или резком и негативном изменении параметров транспортного потока)

При этом, все вышеуказанные сущности и взаимосвязи должны быть выстроены в соответствии с действующими стандартами, в частности ГОСТ Р 57144_2016 «Средства организации дорожного движения. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения» [105]. Кроме того, необходимо обеспечить связь между применением данной подсистемы между ИТС региональной и ИТС на уровне муниципального образования, города, агломерации, в частности, в рамках функционирования центров управления дорожным движением, так как онтологическая модель в данном случае позволит описать условия и сценарии реагирования на инциденты в полном объеме.

Подсистема, оценивающая критерии безопасности дорожного движения на основе онтологической модели, сводится к формализации понятия «безопасность» и состоит из следующих классов:

- «Критерии_БДД» - совокупность диапазонов значений отдельных параметров дорожного движения и транспортного потока, имеет подклассы: «Риск_ДТП», «Уровень_БДД». Атрибуты: максимальный_риск, текущий_риск, историческое_значение;

- «Конфликтная_точка» - любой перекресток или примыкание, подразумевающее пересечение транспортных потоков в отдельных полосах или полном смещении дороги. Атрибуты: тип_конфликта, масштаб_конфликта – оценивается по количеству полос, задействованных в конфликте.

- «Индикатор_безопасности» - состоит из двух основных показателей это «ТТС» - время, которое остаётся до столкновения между 2 участниками дорожного движения и «РЕТ» - время между последовательными прибытиями в одну точку в пространстве двух участников дорожного движения;

Отношения вышеуказанных сущностей выглядят следующим образом: «Повлиял_на» - используется для обозначения взаимосвязей между критериями и итоговыми значениями БДД, «Угрожает» - индикация критических для системы отклонений значений.

В данном случае, ключевым источником данных, а также верификации онтологической модели Критериев безопасности дорожного движения будет являться официальная база данных о дорожно-транспортных происшествиях ГИБДД РФ, при этом, критерии оценки, на наш взгляд, должны коррелировать с:

– Методикой проведения экспертизы проектов организации дорожного движения;

– Концепцией Vision Zero, которая является одной из наиболее актуальных среди концепций, направленных на снижения аварийности на дороге, так как онтология позволяет формализовать ее цели на 100% [106];

– Методами анализа безопасности, такими как определение и классификация точек аварийности, особенно в части наполнения классов «КритерийБезопасности и «Конфликтная точка».

Подсистема (онтологическая модель), обеспечивающая Информационное обеспечение направлена на формализацию данных о информационных потоках в ИТС, а также информирование участников дорожного движения (пользователей) и состоит из следующих классов:

- «Сенсоры (Датчики)» – фиксирующие устройства, содержит совокупность подклассов, описывающих все виды существующих устройств фиксации (Индукционная_петля, Видеокамера, Радар, Дрон и так далее). Атрибуты: частота_опроса, точность, местоположение;

- «Обрабатывающие устройства» - описание исходя из принципа входящих информационных потоков и входящих, подклассы: «устройство_вход_поток», «устройство_выход_поток», «устройство_входвыход_поток»;

- «Протоколы» - описание совокупности используемых языков общения между периферийными устройствами;

- «Информационные потоки» - совокупность поступающей в каждое обрабатывающее устройство информации, подклассы: «входящий поток», «выходящий поток», «инверсивный поток»;

- «Информационное сообщение» - уведомление об изменениях для пользователей системы, имеет подклассы: «сообщение_ЗПИ», «сообщение_приложение», «прогноз». Атрибуты: содержание, время_рассылки, актуальность.

Отношения, возникающие между вышеуказанными сущностями описаны следующим образом:

- измеряет – относится к сенсорам (датчикам);
- предоставляет данные – относится к обрабатывающим устройствам, а также сенсорам (датчикам);
- уведомляет – относится к сообщению;
- адресат – пользователь сервиса.

Данный блок онтологического моделирования является одним из наиболее важных в условиях интеграции в общегосударственные системы, в частности,

необходимо обеспечить интеграцию в систему 112 (семантическая совместимость для передачи информации о происшествиях из ИТС в Системы-112 и обратно для пользователей системы), в ЭРА-ГЛОНАС (включение классов описания данных, поступающих от терминалов ЭРА-ГЛОНАС как источника информации о событиях и дорожной обстановке), на наш взгляд, интеграция семантического слоя в рамках разработки онтологической модели интеллектуальной транспортной системы должна способствовать разработке единых протоколов общения систем для обеспечения стабильного обмена данными между муниципалитетами, регионами и коммерческими системами.

Совокупность информационных потоков является основой построения нашей модели, данные, которые образуются в рамках функционирования ИТС необходимы для:

1. Их учета, формализации, выявления закономерностей;
2. Для принятия решений (поддержки принятия решений) при помощи логических машин.



Рисунок 7 - Визуализация описания функций системы

Функциональные особенности определены совокупностью потребностей пользователей системы и представляют собой набор конкретных функций, имеющих соответствующее информационное обеспечение и регламент осуществления.

Взаимосвязь функциональной составляющей и процесса моделирования при разработке онтологической модели выглядит как на рисунке 8.



Рисунок 8 - Визуализация соотношения блоков онтологического моделирования и функциональной части

Интеграция общего перечня функций системы в модель является основной задачей разработки, таким образом, функции нашей онтологической модели соотносятся с моделью согласно порядка, изложенного в таблице 3.

Таблица 3 - Соотношение функций и онтологической модели

Часть модели:	Функция:
Параметры транспортных потоков сети	Моделирование дорожной сети, Распределение транспортных потоков
Матрицы корреспонденций в сети	Распределение транспортных потоков, Моделирование маршрутов
Прогнозирование дорожного движения	Моделирование маршрутов, Управление дорожным движением.
Расчет адаптивных программ управления	Управление дорожным движением, анализ опасных ситуаций
Динамическая маршрутизация	Анализ опасных ситуаций, Оперативное информационное обеспечение сервиса

На данное соотношение функций и модели наибольшее влияние имеет как архитектура интеллектуальной транспортной системы, так и особенности, и ограничения онтологической модели.

Конечный вид функциональной, информационной, физической, коммуникационной архитектуры интеллектуальной транспортной системы зависит от потребностей пользователей при реализации общей концепции мобильности современного общества, организации движения и перевозок, обеспечении безопасности движения и экологической безопасности.

Разработка онтологической модели архитектуры ИТС состоит из следующих этапов разработки:

- общей архитектуры, а также концептуальной модели;
- функциональной архитектуры для определения функций и процессов, которые необходимы для удовлетворения потребностей конечных пользователей;
- физической архитектуры, которая определяет перечень подсистем и технических средств, их структуру, взаимосвязи;
- коммуникационной архитектуры, которая определяет систему передачи информационных потоков;
- организационной архитектуры, которая определяет принципы создания структуры и определение функций подсистем и компонентов ИТС.

Важность создания архитектуры ИТС заключается в том, что наличие архитектуры обеспечивает глобальные преимущества и создает системный механизм для координации действий органов власти, транспортно-дорожного комплекса, производителей компонентов ИТС, конечных пользователей.

Существует большое количество моделей разработки архитектуры интеллектуальной транспортной системы, однако, инструменты разработки онтологии ИС могут быть применены к созданию архитектуры ИТС наиболее эффективно в рамках V-образной модели разработки к следующим типам архитектуры:

- Функциональной архитектуре;

- Информационной архитектуре;
- Физической архитектуре;
- Коммуникационной архитектуре.

Это позволит повысить точность выявления необходимого набора функций, определить перечень необходимого периферийного оборудования посредством снижения количество цепочек обработки информации и упрощения процесса принятия решения.

В рамках создания базы знаний необходимо исходить из существующих методов и моделей разработки информационных систем. Таким образом, если представить методику процесса интеграции онтологии в разработку архитектуры ИТС в формате модели, то наиболее подходящим вариантом будет V-образная методология разработки программного обеспечения. V-образная модель подразумевает нисходящую последовательность в левой части, по центру этап кодирования, и в правой части находится восходящая последовательность тестирования.

Применительно к интеграции онтологической базы знаний в технологический процесс создания архитектуры интеллектуальной транспортной системы V-образная структура разработки выглядит следующим образом:

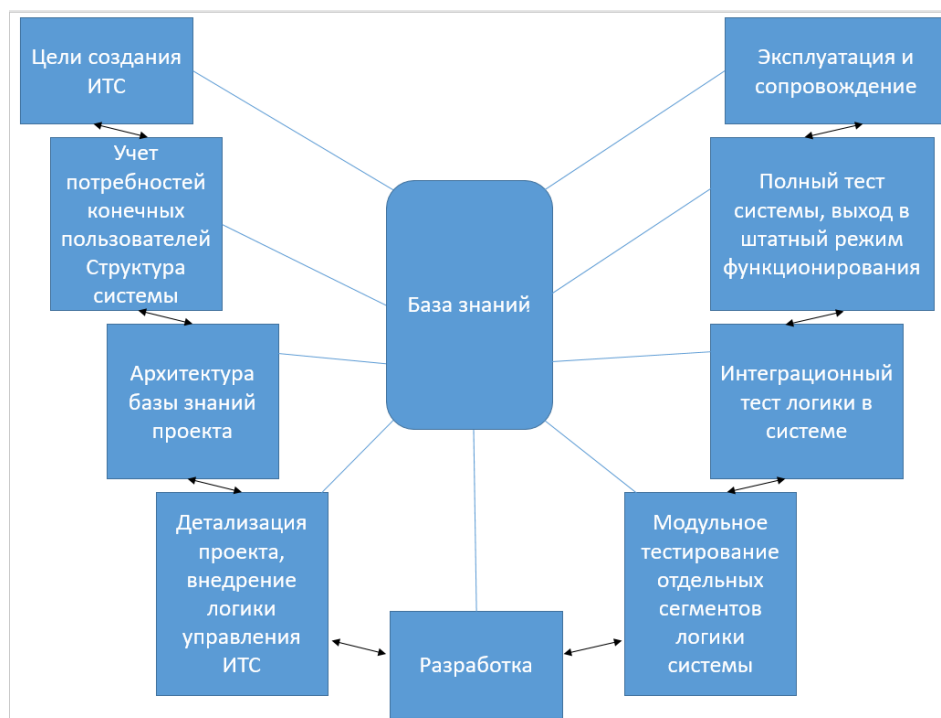


Рисунок 9 - V-образная модель разработки ОМ ИТС

Применение совокупности (модель+база знаний) решений состоит в том, чтобы обеспечить разработку архитектуры ИТС, имеющей оптимизированный набор процессов, связанных с созданием и функционированием интеллектуальной транспортной системы. В большинстве случаев, основным просчетом при разработке и интеграции ИТС является отсутствие глубокого анализа целей владельцев системы и, как следствие, несоответствие конечного вида и функционала системы с его проектным видом.

Таким образом, системное проектирование и моделирование посредством инструментов онтологии информационной системы, базирующиеся на первых этапах разработки архитектуры ИТС, позволит избежать неполной функциональности создания ИТС.

Применение V-образной модели жизненного цикла, совместно с инструментами онтологии, минимизирует расхождения с запланированными функциями ИТС. Методика разработки архитектуры ИТС предполагает последовательное формирование определенных видов архитектуры.

Ниже представлен перечень видов архитектуры с информацией об интеграции онтологических инструментов:

- Организационная архитектура. Устанавливает принципы создания структуры и присвоение функций (так называемое воздействие) отдельным активным компонентам системы (или уровням управления) является создание модели данного вида архитектуры, которая будет учитывать основные процессы, а также основные цепочки обмена данными между подсистемами;
- Использование онтологических инструментов применительно к:
- Функциональная архитектура. Определяет отдельные функции элементов, модулей и подсистемы, включая связи между ними, в результате чего она дает возможность создавать конкретные приложения для удовлетворения потребностей пользователей;
- Информационная архитектура. Определяет принципы формирования структуры соответствующей информационной подсистемы, включая требования к размещению, кодированию и передаче информации;

– Физическая архитектура. Определяет физические устройства, которые исполняют отдельные функции так, чтобы было обеспечено функционирование приложений, т.е. установление связей отдельных элементов, модулей и подсистем в функциональной архитектуре с соответствующими физическими устройствами (объектами);

– Коммуникационная архитектура. Описывает передачу информации в рамках системы в соответствии с физической архитектурой.

Подобное распределение архитектурных особенностей системы позволит повысить точность выявления необходимого набора функций, определить перечень необходимых датчиков, исполнительных механизмов, а также цепочек обмена информацией между подсистемами и периферийным оборудованием, а также определить логические правила функционирования подсистем.

Следующий шаг в создании онтологической модели ИТС – выбор языка онтологии, так как для каждой задачи существует собственный метод формализации информации. Языки онтологии могут быть классифицированы следующим образом:

1) Логические языки. Описывают логику предикатов первого порядка, базируемую логику, дескрипционную логику;

2) Фреймовые языки. Представляют собой языки подобные реляционным базам данных.

3) Языки на основе графа. Формализовано описать: семантическую сеть, аналогию с сетью. Кроме того, могут содержать в себе объяснение для семантической сети.

В нашем случае логические языки являются наиболее гибким и точным инструментом для создания логико-математической модели архитектуры интеллектуальной транспортной системы так как имеют широкий спектр применения (формализация, создание логических законов, наличие возможности интеграции полученной модели с логической машиной). Для наиболее высокой точности модели необходимо провести исследование ранее рассмотренных функций различных языков онтологии.

- Проект CYC представляет собой собственный язык онтологии под названием CYCL, основная задача языка - расчет предикатов первого порядка с некоторым расширением высшего порядка, что является ограниченным функционалом для разработки онтологической модели архитектуры ИТС (далее – ОМА ИТС) [107];
- DOGMA (Developing Ontology Grounded Methods And Applications), язык, который применяется для моделирования, ориентированный на фактах, для обеспечения более высокого уровня семантической устойчивости системы, в рамках целей и задач нашего исследования не обладает необходимым набором функций (отсутствует возможность интеграции логической машины)[108];
- Язык Gellish, основан на правиле собственного расширения, таким образом, интегрирует онтологию с языком онтологии, имеет ограниченный функционал, возможно применения в качестве вспомогательного при разработке ОМА ИТС;
- IDEF 5 – это метод разработки ПО для применения точных доменных онтологий, наиболее эффективно применяется в создании web-онтологий, поисковых систем и т.д.;
- KIF — представляет собой синтаксис для логики первого порядка, которая основывается на S выражениях, в следствии этого имеет узкий спектр применения;
- RIF (Формат правил обмена) и F-логика сочетают онтологии и правила, данный язык применим в процессе создания ОМА ИТС, однако, имеет довольно усложненный синтаксис и логику формализации данных;
- OWL является языком для создания онтологических операторов, формализации данных с возможностью интеграции реляционных баз данных и логической машины, изначально создан для использования во Всемирной сети Интернет, но со временем получил широкое применения в разных сферах.

Таким образом нами рассмотрены основные языки создания онтологии. Нами проанализированы различные функции такие, как правила, отношения, микротеоории, виды, состояния, константы и процессы.

Подразумевается, что потребность данного семейства языков имеет высокую степень актуальности в контексте развития технологий и ических заключений для системы OWL. При этом, данные, которые были описаны посредством применения языка OWL, интерпретируются как множество «объектов» и «утверждений свойств», которые связывают эти объекты друг с другом.

На практике большинство OWL-онтологий построены вокруг ряда аксиом, которые налагают ограничения на множества объектов (называемых «классами»), а также на типы отношений, разрешенных между ними. Такого рода аксиомы обеспечивают семантику, позволяя системам вывести дополнительную информацию на основе открыто представленных данных. OWL является и синтаксисом для описания и обмена онтологиями, и имеет официально определенную семантику, которая дает онтологиям значения. Подтвержденная W3C спецификация OWL включает определение трех вариантов OWL с разными уровнями выразительности. Это OWLLite, OWL DL и OWL Full. [109]

Кроме того, тестирование и валидация онтологии являются важными процессами, которые обеспечивают её соответствие требованиям, а также корректность и качество представленных знаний. В контексте разработки интеллектуальных транспортных систем (ИТС) необходимость в таких процедурах становится особенно актуальной, так как от правильности работы системы зависит безопасность и эффективность транспортных процессов.

Внедрение онтологии в интеллектуальные транспортные системы (ИТС) требует системного подхода и детальной проработки. Основной задачей на этом этапе является создание единой терминологической системы, которая обеспечит взаимодействие между различными компонентами системы. Онтология, выступая в роли формализованного описания области, позволяет четко определить термины и их взаимосвязи, что является залогом успешной интеграции различных

компонентов ИТС, таких как транспортные средства, инфраструктура и системы управления.

Таким образом, когда основные модели и подходы определены, можно переходить к формализации онтологии, то есть к представлению выявленных сущностей и связей в машиночитаемом формате, в большинстве случаев для этого используются языки Semantic Web, соответствующие стандарту ISO/IEC 21838: RDF, OWL, поскольку они предоставляют наиболее широкий спектр выражения сложных отношений между объектами.

3.2 Применение онтологического моделирования в рамках разработки архитектуры интеллектуальной транспортной системы

Общая схема интеграции базы знаний в работу интеллектуальной транспортной системы, где нижний уровень – база знаний, содержащая в себе необходимый набор логических утверждений, заданных параметров, сущностей и классов, средний уровень (логический) – система поддержки принятия решения (либо принятия решения) на основе компиляции совокупности логических выводов Pellet и верхний уровень – интеграционная платформа ИТС, в рамках управления которой принимается конечное решение. Подобный подход, подразумевающий многослойность базы знаний позволяет обеспечить высокую стабильность функционирования модели (таксономии) при факте большого количества поступающих обращений к каждой из ее частей. Ниже изображена схема, описывающая вышеизложенный подход.

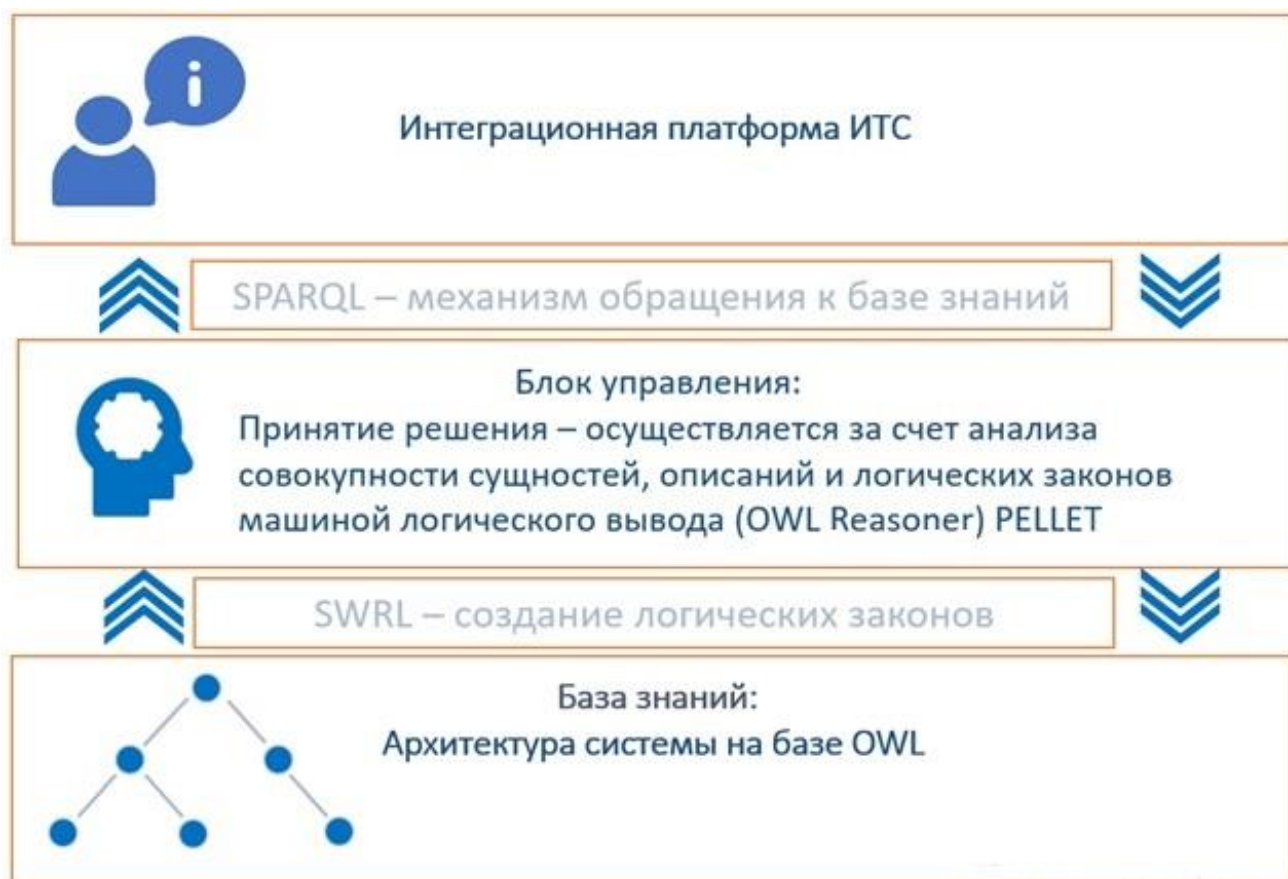


Рисунок 10 - Визуализация интеграции элементов онтологического моделирования в функционирование ИТС

Предлагаемый подход к разработке архитектуры данных онтологической модели предлагаемой системы состоит в добавлении третьего слоя, онтологического, который будет обращаться к остальным слоям в процессе функционирования модели. Таким образом, структура выглядит следующим образом:

- На первом (нижнем) уровне была разработана онтология, включающая полное описание авторской архитектуры интеллектуально транспортной системы (полный набор необходимых подсистем, описание функциональной части и физической части системы, включая полный набор взаимосвязей и взаимоотношений, вплоть до вида данных, которыми необходимо осуществлять обмен).

- На втором уровне находится логическая машина на основе встроенной в Protégé Pellet, которое выполняет функцию контроля ввода и вывод

новых знаний, используя различные правила и аксиомы существующего описания онтологической модели.

– На третьем уровне происходит выполнение запросов к содержимому модели, посредством инструмента Apache Jena и с использованием языка SPARQL интеграционная платформа обращается к онтологии в зависимости от конкретных дорожно-транспортных ситуаций. [110]

Разработка онтологической модели архитектуры интеллектуальной транспортной системы имеет высокую эффективность, однако, для получения более высокого качества данных, необходимо их представить в формате онтологии дорожного движения, при этом необходимо обеспечить чёткое распределение взаимосвязанных понятий на две группы:

-Первая группа: Функциональная часть системы. Подсистемы, основной задачей которых, является обеспечение функции, а именно, расчет, хранение и обработка данных с выводом какого-то конкретного результата;

-Вторая группа: Физическая часть системы. Часть архитектуры, которая описывает весь Backend системы, информационные потоки, стандарты данных, протоколы работы системы, логику принятия решения.

Схема интеграции базы знаний в работу интеллектуальной транспортной системы приведена на рисунке 11.

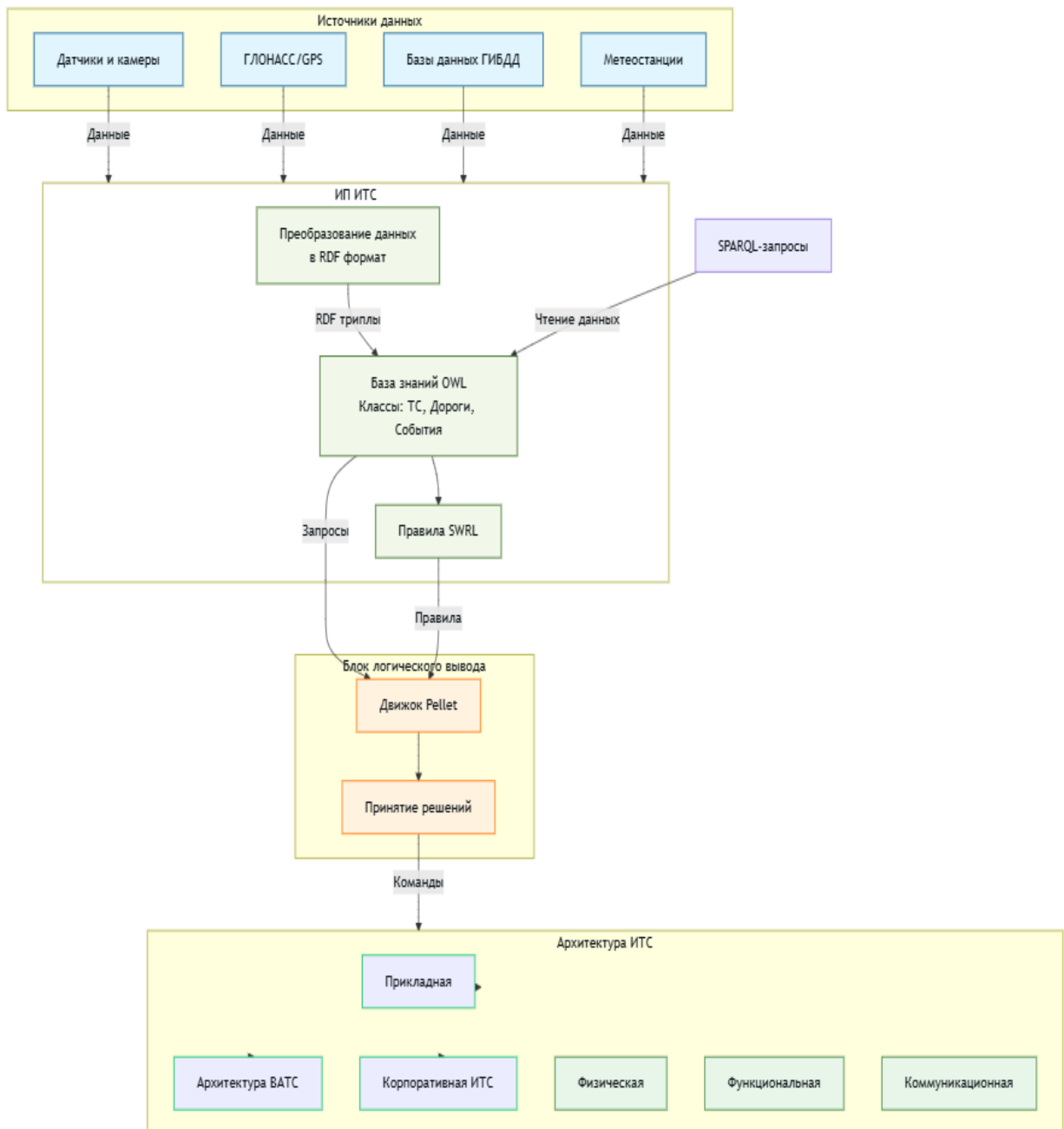


Рисунок 11 - Алгоритм функционирования онтологического слоя архитектуры ИТС

Предлагаемый подход к разработке архитектуры данных онтологической модели предлагаемой системы состоит в добавлении третьего слоя, онтологического, который будет обращаться к остальным слоям в процессе функционирования модели, таким образом, структура представляет собой 3 основных составляющих. На первом (нижнем) уровне была разработана онтология, включающая полное описание авторской архитектуры интеллектуально транспортной системы (полный набор необходимых подсистем, описание

функциональной части и физической части системы, включая полный набор взаимосвязей и взаимоотношений, вплоть до вида данных, которыми необходимо осуществлять обмен). На втором уровне находится логическая машина на основе встроенной в Protégé Pellet, которое выполняет функцию контроля ввода и вывод новых знаний, используя различные правила и аксиомы существующего описания онтологической модели. На третьем уровне происходит выполнение запросов к содержимому модели, посредством инструмента Apache Jena и с использованием языка SPARQL интеграционная платформа обращается к онтологии в зависимости от конкретных дорожно-транспортных ситуаций.

Следуя данной логике, построение онтологической модели начинается с выделения классов – основных категорий объектов. Таким образом, класс «Интеллектуальная транспортная система» может включать подклассы «Локальная зона», «Сеть сервисов», «Пересечение», «Информационная цепь», «Сегмент», «Потребности пользователей», «УДС Города», а класс «Информационная цепь» – «Моделирование маршрутов», «Модель транспортной сети», «Выбор управляющих воздействий», «Выбор пунктов отправления – назначения» и так далее.

Важно выстроить иерархию таким образом, чтобы она отражала реальные отношения между понятиями: например, «Зонирование спроса» должно быть подклассом «Управление спросом». На рисунке 12 приведен вид иерархической структуры первых классов системы, посредством модуля «Ontograf» редактора Protege.

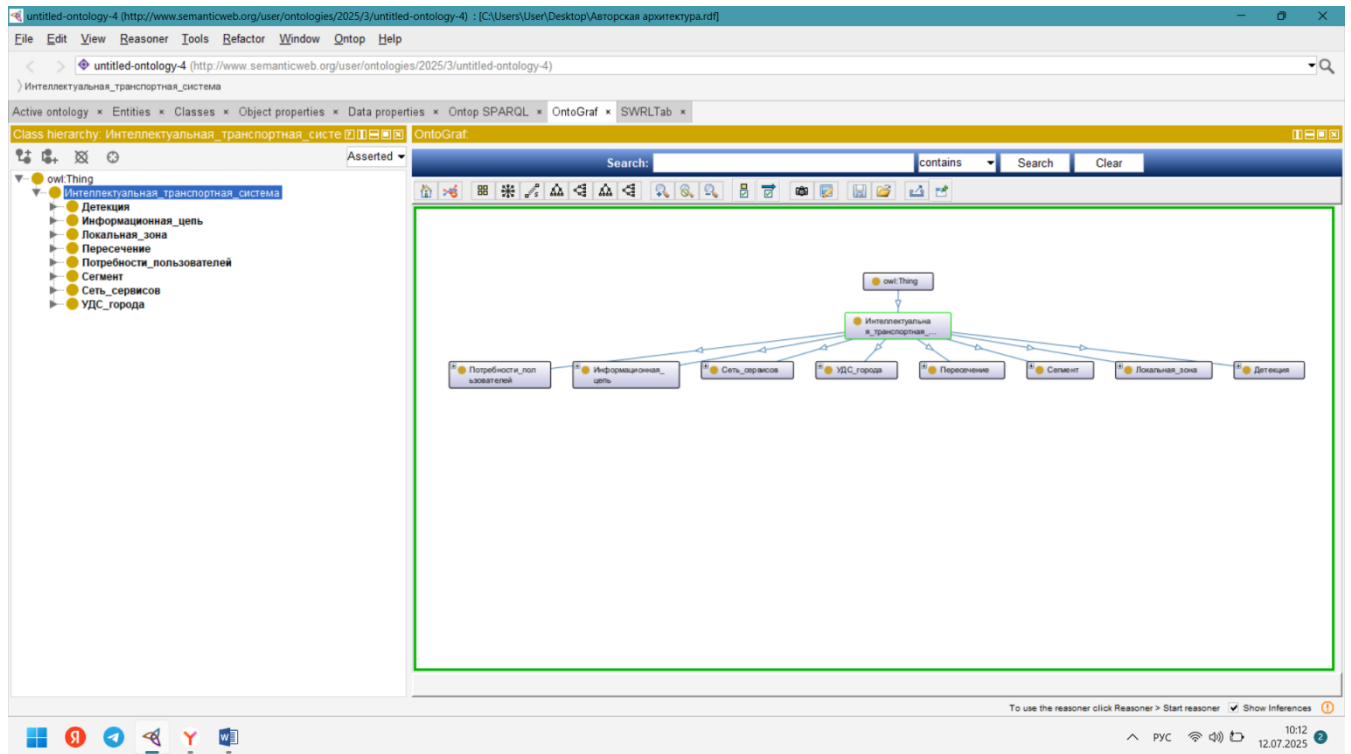


Рисунок 12 - Изображение интерфейса среды разработки онтологической модели Pellet (Модуль Ontograf)

После определения необходимого спектра классов модели необходимо описать их свойства и характеристики, которые могут быть у объектов каждого класса. Например, для класса «Управление парковками» это может быть «циклический обмен данными с» индивидом «база данных загруженности парковок» с типом данных «String». Особое внимание уделяется объектным свойствам – тем, что связывают объекты разных классов между собой. Например, свойство «расположенНа» связывает «ТранспортноеСредство» с «Дорогой», а «регулирует» – «Светофор» с «Перекрестком».

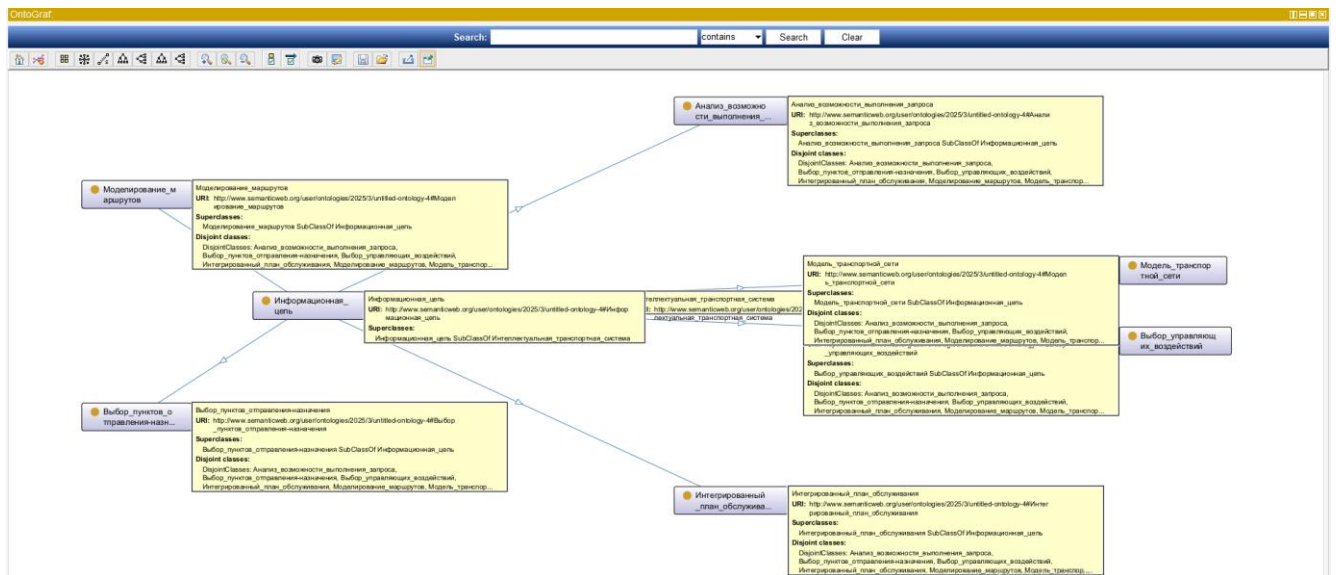


Рисунок 13 - Отображение сущностей онтологии в модуле Ontograf, системы Protege

В наиболее точных онтологических моделях свойства имеют четко определенные домены (классы, к которым они применяются) и диапазоны (классы или типы данных, которые могут быть их значениями), что позволяет избежать семантических ошибок при дальнейшем использовании модели. Исходя из этого принципа каждому классу соответствует конкретный набор свойств, индивидов, а также типов данных

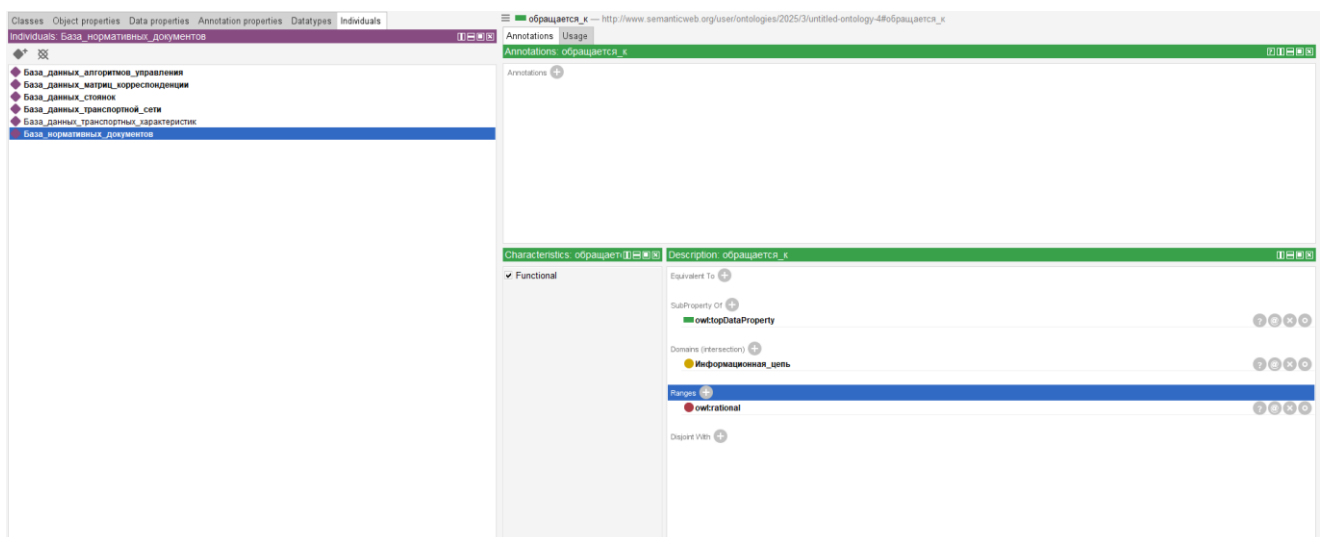


Рисунок 14 - Интерфейс создания индивидов, а также присвоения их диапазона допустимых значений

Важной частью процесса является введение ограничений, которые делают онтологию более строгой и приближенной к реальности. Например, можно указать, что свойство «управляется» может связывать только объекты классов «Перекресток» и «Автоматизированная Система Управления», но не «Перекресток» и «Водитель».

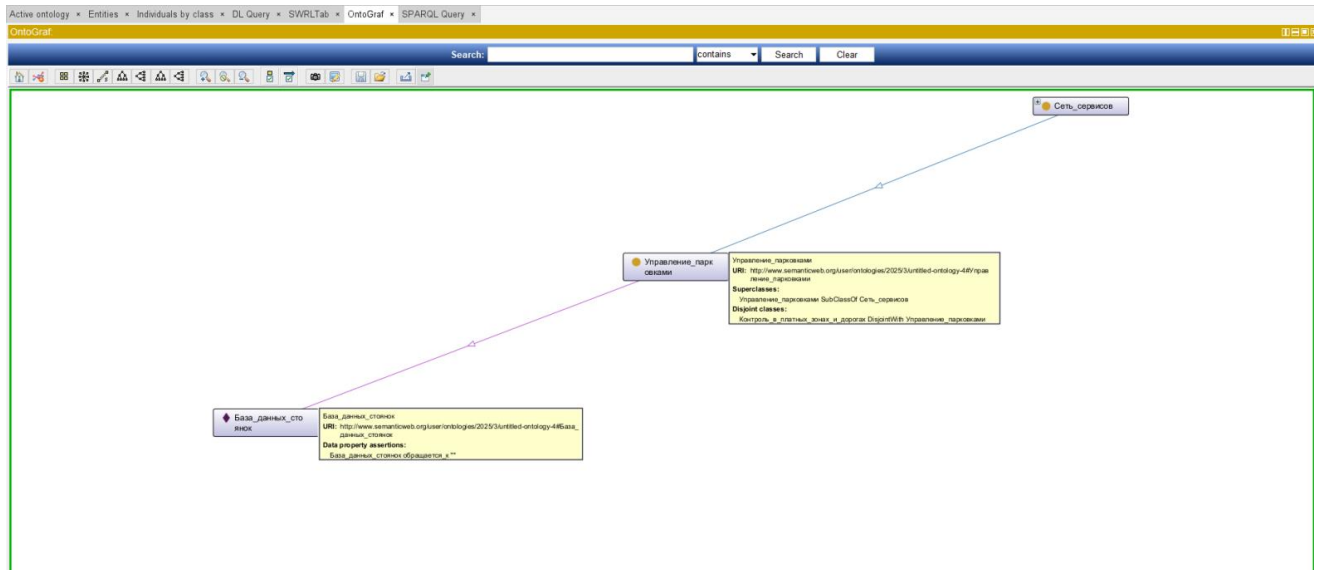


Рисунок 15 - Отображение вариантов отношений сущностей

В процессе использования онтологическая модель расширяет спектр классов, индивидов и свойств, так как в реальных условиях неизбежна доработка и расширение. Могут появляться новые типы транспортных средств (например, беспилотные грузовики), новые виды датчиков, новые алгоритмы управления трафиком.

Создание онтологической модели подразумевает проектировку с учетом возможности расширения охвата, допускать добавление новых классов и свойств без необходимости пересматривать всю существующую структуру. При этом, процесс поддержки и обновления онтологической нашей модели подразумевается, как непрерывный, как и развитие самой интеллектуальной транспортной системы, для которой она создана.

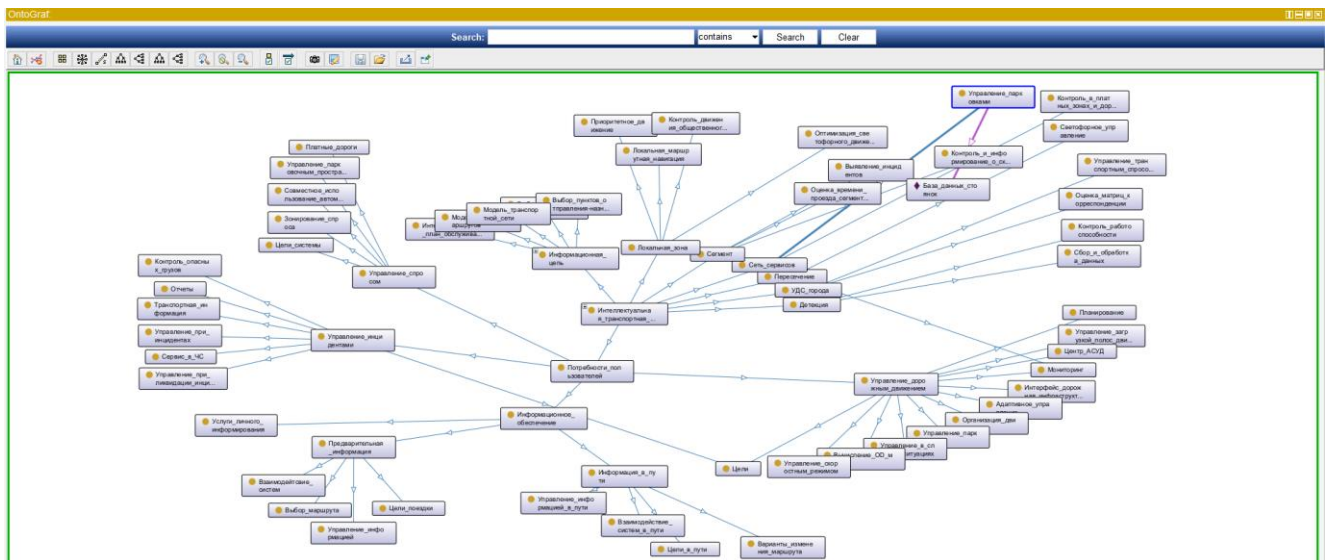


Рисунок 16 - Граф онтологической модели архитектуры интеллектуальной транспортной системы

Вышепредставленные схемы (граф) онтологической (информационной модели) таксономии (совокупности классов), описывающей архитектуру интеллектуальной транспортной системы в формате представления .DOT выглядит следующим образом:

```

digraph g {
    "Управление_спросом" -> "Цели_системы" [label="has subclass"]
    "Информационная_цепь" -> "Интегрированный_план_обслуживания" [label="has subclass"]
    "Управление_инцидентами" -> "Цели" [label="has subclass"]
    "Управление_дорожным_движением" -> "Планирование" [label="has subclass"]
    "Детекция" -> "Контроль_работоспособности" [label="has subclass"]
    "Сеть_сервисов" -> "Управление_парковками" [label="has subclass"]
    "Пересечение" -> "Светофорное_управление" [label="has subclass"]
    "Информация_в_пути" -> "Варианты_изменения_маршрута" [label="has subclass"]
    "Интеллектуальная_транспортная_система" -> "Пересечение" [label="has subclass"]
    "Информационное_обеспечение" -> "Информация_в_пути" [label="has subclass"]
    "Потребности_пользователей" -> "Информационное_обеспечение" [label="has subclass"]
    "Потребности_пользователей" -> "Управление_спросом" [label="has subclass"]
    "Управление_инцидентами" -> "Управление_при_ликвидации_инцидента" [label="has subclass"]
    "Управление_инцидентами" -> "Сервис_в_ЧС" [label="has subclass"]
    "Информационное_обеспечение" -> "Услуги_личного_информирования" [label="has subclass"]
    "Информационная_цепь" -> "Моделирование_маршрутов" [label="has subclass"]
    "Информационная_цепь" -> "Анализ_возможности_выполнения_запроса" [label="has subclass"]
    "Информационная_цепь" -> "Модель_транспортной_сети" [label="has subclass"]
}

```

```

"Локальная_зона" -> "Приоритетное_движение" [label="has subclass"]
"Управление_дорожным_движением" -> "Управление_загрузкой_полос_движения"
[label="has subclass"]
"Управление_дорожным_движением" -> "Центр_АСУД" [label="has subclass"]
"Информационная_цепь" -> "Выбор_управляющих_воздействий" [label="has
subclass"]
"Информационное_обеспечение" -> "Предварительная_информация" [label="has
subclass"]
"Предварительная_информация" -> "Управление_информацией" [label="has
subclass"]
"Интеллектуальная_транспортная_система" -> "Информационная_цепь"
[label="has subclass"]
"Управление_спросом" -> "Зонирование_спроса" [label="has subclass"]
"Интеллектуальная_транспортная_система" -> "Сегмент" [label="has
subclass"]
"Предварительная_информация" -> "Выбор_маршрута" [label="has subclass"]
"Управление_дорожным_движением" -> "Мониторинг" [label="has subclass"]
"Интеллектуальная_транспортная_система" -> "Потребности_пользователей"
[label="has subclass"]
"Управление_инцидентами" -> "Управление_при_инцидентах" [label="has
subclass"]
"Управление_дорожным_движением" -> "Интерфейс_дорожная_инфраструктура-
автомобиль" [label="has subclass"]
"Управление_спросом" -> "Совместное_использование_автомобилей"
[label="has subclass"]
"Сегмент" -> "Выявление_инцидентов" [label="has subclass"]
"Предварительная_информация" -> "Взаимодействие_систем" [label="has
subclass"]
"Сегмент" -> "Оценка_времени_поезда_сегмента" [label="has subclass"]
"Управление_дорожным_движением" -> "Адаптивное_управление" [label="has
subclass"]
"Информация_в_пути" -> "Цели_в_пути" [label="has subclass"]
"Предварительная_информация" -> "Цели_поездки" [label="has subclass"]
"owl:Thing" -> "Интеллектуальная_транспортная_система" [label="has
subclass"]
"Интеллектуальная_транспортная_система" -> "УДС_города" [label="has
subclass"]
"Информационная_цепь" -> "Выбор_пунктов_отправления-назначения"
[label="has subclass"]
"Управление_дорожным_движением" -> "Организация_движения" [label="has
subclass"]
"Управление_инцидентами" -> "Транспортная_информация" [label="has
subclass"]
"Управление_инцидентами" -> "Отчеты" [label="has subclass"]
"Потребности_пользователей" -> "Управление_дорожным_движением"
[label="has subclass"]
"Интеллектуальная_транспортная_система" -> "Детекция" [label="has
subclass"]
"Управление_дорожным_движением" -> "Управление_парковкой" [label="has
subclass"]
"Управление_спросом" -> "Управление_парковочным_пространством"
[label="has subclass"]
"Локальная_зона" -> "Контроль_движения_общественного_транспорта"
[label="has subclass"]
"УДС_города" -> "Управление_транспортным_спросом" [label="has subclass"]
"Управление_дорожным_движением" -> "Управление_в_сложных_ситуациях"
[label="has subclass"]
"УДС_города" -> "Оценка_матриц_корреспонденции" [label="has subclass"]
"Управление_дорожным_движением" -> "Вычисление_OD_матриц" [label="has
subclass"]
"Пересечение" -> "Мониторинг" [label="has subclass"]

```

```

    "Управление_дорожным_движением" -> "Управление_скоростным_режимом"
[label="has subclass"]
    "Управление_дорожным_движением" -> "Цели" [label="has subclass"]
    "Управление_спросом" -> "Платные_дороги" [label="has subclass"]
    "Сегмент" -> "Контроль_и_информирование_о_скоростных_режимах" [label="has
subclass"]
    "Локальная_зона" -> "Локальная_маршрутная_навигация" [label="has
subclass"]
    "Потребности_пользователей" -> "Управление_инцидентами" [label="has
subclass"]
    "Информация_в_пути" -> "Взаимодействие_систем_в_пути" [label="has
subclass"]
    "Локальная_зона" -> "Оптимизация_светофорного_движения" [label="has
subclass"]
    "Управление_инцидентами" -> "Контроль_опасных_грузов" [label="has
subclass"]
    "Сеть_сервисов" -> "Контроль_в_платных_зонах_и_дорогах" [label="has
subclass"]
    "Интеллектуальная_транспортная_система" -> "Локальная_зона" [label="has
subclass"]
    "Информация_в_пути" -> "Управление_информацией_в_пути" [label="has
subclass"]
    "Детекция" -> "Сбор_и_обработка_данных" [label="has subclass"]
    "Интеллектуальная_транспортная_система" -> "Сеть_сервисов" [label="has
subclass"]
}

```

Онтологическая модель представляет собой основу для семантического поиска и логического вывода, в отличие от традиционных баз данных, где поиск идет по строго заданным критериям, семантический поиск позволяет находить информацию, даже если она выражена в других терминах или требует вывода через цепочку связей.

Например, можно запросить «все участки дорог, где вероятны дорожные заторы в дождь», и система, используя онтологию, найдет дороги с определенным типом покрытия, историей затоплений и высокой загруженностью, даже если в данных прямо не указано «высокая интенсивность движения». Логический вывод позволяет получать новые знания из имеющихся – скажем, определять, что если на соседних перекрестках скопилось много машин, а на одном из участков дороги произошло ДТП, то вероятно образование затора на определенном маршруте.

В конечном итоге разработанная нами онтологическая модель является не просто техническим инструментом, а своего рода «цифровым двойником» транспортной системы, отражающим ее структуру, поведение и взаимосвязи. Модель позволяет различным подсистемам и приложениям "понимать" данные

одинаково, обеспечивает согласованность принимаемых решений и открывает возможности для более сложного анализа и прогнозирования.

Несмотря на схожесть понятий онтологической модели и «цифровой двойник», большинство исследователей сходятся во мнении, что онтологическая модель – семантический каркас любой информационной системы, главной задачей которого является обеспечение семантической интероперабельности системы, отсутствие противоречий в функционировании системы. Однако, вместе с тем, отмечают, что онтология не обладает должной гибкостью и динамичностью и имеет, скорее, теоретический характер функций. Вместе с тем, по нашему мнению, применение онтологической модели как точки фокуса построения интеллектуальной транспортной системы в полной мере обеспечивает и динамичность (подключение к онтологии происходит посредством SPARQL-запросов, время ответа на которые, выше чем у целого ряда других языков), а аспект эволюции онтологии может быть обеспечен за счет добавления новых сущностей (так как взаимосвязи и правила их функционирования в системе определит *reasoner*, встроенный в среду разработки). [111] Таким образом, онтологическая модель представляет собой техническое решение, которое может осуществлять управление, изменение, дополнение, в том числе, цифровых двойников, используемых в ИТС, без потери быстродействия или иных характеристик.

Особенностью онтологического подхода является его способность обеспечить смысловое ядро для создания цифрового двойника транспортной системы, а также отдельных её частей. Цифровой двойник, в данном случае, обеспечивается возможность достоверного моделирования различных сценариев развития транспортной ситуации, позволяя оценивать последствия принимаемых управленческих решений до их практической реализации, что создает прочную основу для согласованного управления всеми элементами ИТС, обеспечивая синергетический эффект от взаимодействия различных подсистем.

Важным аспектом внедрения ОМ ИТС является управление городской дорожной сетью, в данном случае онтологическая модель предоставляет

уникальные возможности для балансировки интересов различных групп пользователей транспортной инфраструктуры. Возникает возможность моделировать последствия различных сценариев управления, оценивая их влияние на разные категории участников дорожного движения, что способствует принятию более сбалансированных и справедливых решений в области транспортной политики. Таким образом, можно оценить, как изменения в организации дорожного движения повлияют на пользователей личного транспорта, пассажиров общественного транспорта, пешеходов и велосипедистов. Комплексность данного подхода способствует созданию более инклюзивной и устойчивой транспортной системы.

В рамках исследования эффективности применения онтологического подхода к разработки интеллектуальных транспортных систем нами проведено сравнение с существующими подходами к интеграции новых технических решений в разработку ИТС на основании экспертных оценок и имеющихся данных о иных возможных решениях.

При практическом применении ОМ ИТС в рамках создания Интеллектуальной транспортной системы Ростовской агломерации в части разработки следующих мероприятий:

- разработка архитектуры интеллектуальной транспортной системы Ростовской агломерации с выбором подсистем ИТС на основе принципов онтологии, описанием иерархии и потоков данных;
- применение кластерной оценки интеллектуальной транспортной системы по совокупности критериев, включающих онтологическую полноту, семантическую согласованность, архитектурную интеграцию, масштабируемость, надежность;
- алгоритм адаптивного управления светофорным объектом на основе онтологического моделирования, обеспечивающий снижение задержки до 24%.

Таким образом, в рамках разработки применен подход, подразумевающий интеграцию онтологической модели ИТС. При применении достигнуто повышение пропускной способности перекрестков на 15-25% и сокращение задержки

транспортного средства на 24%. Кроме того, существенно возрастает предсказуемость поездок: отклонение от расчетного времени прибытия снижается на 7-15%, в то же время, точность прогноза времени прибытия общественного транспорта возрастает до 90-95%.

Современные мегаполисы сталкиваются с растущей нагрузкой на транспортную инфраструктуру, что требует принципиально новых подходов к управлению дорожным движением. Традиционные системы светофорного регулирования, основанные на жестких временных алгоритмах, демонстрируют свою неэффективность в условиях нестабильного трафика. В данном исследовании рассматривается инновационное решение - онтологическая модель управления, сочетающая семантические технологии и динамическую адаптацию к изменяющимся дорожным условиям. Таким образом, интерпретируемость обеспечена «чистотой» и полнотой поступающих данных со стороны системы, кроме того, время реакции системы при обращении к ней со стороны принятия решения значительно снижается при применении ОМ ИТС, результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты внедрения системы регулирования работы светофорного объекта

Параметр	Традиционная система	Онтологическая модель
Время адаптации, сек.	8.2	1.1
Энергоэффективность, Вт.	185	142
Гибкость настройки	Низкая	Высокая

Нами произведен комплексный анализ влияния интеграции инструментов светофорного регулирования, основанных на технологии онтологического моделирования в процесс функционирования светофорного объекта, расположенного на перекрестке Текучева/Доломановский, в г. Ростов-на-Дону.

Основой экспериментального тестирования, связанного с фактической оценкой временных, а также эффективных показателей после применения онтологической модели управления являются временные показатели.

Исходя из результатов экспериментального тестирования, которое включало в себя следующие сегменты оценки:

1. Сравнение с традиционным светофором (фиксированные интервалы);
2. Тестовый полигон: 4-сторонний перекресток;
3. Метрики: среднее время ожидания, пропускная способность – эффективность системы позволяет обеспечить эффективное светофорное регулирование. Перейдем к количественным оценкам, приведенным в таблице 5.

Таблица 5 – Количественная оценка системы регулирования работы светофорного объекта

Параметр	Статическая система	Наша система	Улучшение
Среднее время ожидания (с)	38.7 ± 2.1	29.4 ± 1.8	24.1%
Пропускная способность (авто/час)	420	498,8	24 %
Кол-во переходов фаз/час	60	47	21.7%
Энергопотребление (кВт·ч/сутки)	5.2	4.8	7.7%

Таким образом, при применении инструментов онтологического моделирования среднее время ожидания отклика системы снижается на почти 25 процентов, следовательно, пропускная способность автомобилей в час повышается, а также энергопотребление снижается. По итогам сравнения количественных показателей имеем следующее распределение показателей, которые говорят о высокой эффективности системы. В частности, время адаптации к изменению потока: 2.3 цикла (против 5.1 у нейросетевого аналога), Отказоустойчивость: система сохраняет работоспособность при потере 40% данных сенсоров. Однако, вместе с тем, наблюдаются определенные ограничения в виде предварительное моделирование онтологии, существует зависимость от качества данных сенсоров, а также присутствует необходимость периодического обновления правил.

В заключение следует отметить, что внедрение онтологической модели интеллектуальной транспортной системы представляет собой стратегическую инвестицию в развитие транспортной инфраструктуры. Несмотря на определенные

первоначальные затраты, связанные с ее разработкой и внедрением, долгосрочные результаты значительно превосходят необходимые затраты. В свою очередь онтологическая модель создает основу для непрерывного совершенствования транспортной системы, позволяя гибко адаптироваться к изменяющимся условиям и новым вызовам. Она способствует созданию более эффективной, безопасной и устойчивой транспортной системы, отвечающей потребностям современного города и его жителей. Дальнейшее развитие этого подхода открывает новые перспективы для создания интеллектуальных транспортных систем, способных к самообучению и адаптации в реальном времени.

Кроме того, осуществлено внедрение принципов онтологического моделирования в деятельность филиала Федерального агентства автомобильного транспорта в Южном Федеральном округе в рамках работы над оптимизацией выпуска пассажирских транспортных средств на маршрут следования. (Акт о использовании результатов кандидатской диссертации от 10.07.2025).

Вместе с тем, применение онтологической модели интеллектуальной транспортной системы внедрено при осуществлении контрольной (надзорной) деятельности, связанной с весогабаритным контролем. Таким образом, создана и апробирована онтологическая модель, содержащая типы транспортных средств, отдельные технические характеристики и совокупность возможных нарушений. В ходе применения данной модели время работы инспектора, связанное с фактическим выявлением нарушений, сокращено на 50%, что подтверждено актом о использовании результатов кандидатской диссертации МТУ Ространснадзора по ЮФО от 10.07.2025 г

3.3 Интеграция логических правил на основе SWRL при моделировании регулирования дорожного движения при помощи технических средств организации дорожного движения

Одним из основных аспектов функционирования онтологической модели является работа логической машины Pellet, а также применение базовых принципов дескрипционной логики в онтологической информационной модели

предусматривает представление информации о какой-либо области реальности, выраженное в электронном виде. Допускается одновременное рассмотрение процессов построения информационной модели, и ее воплощения в электронной форме в соответствии с методикой онтологического моделирования. При этом, база знаний, созданная с использованием OWL-RDF, предполагает, что при разработке производится логический вывод, который позволяет проверить непротиворечивость БЗ, а также вывести новые отношения, что особенно актуально в рамках большого объема генерируемой ИТС информации.

В отличие от реляционных баз данных, онтологическая модель допускает дополнение: новые формы отношений, классы, объекты и т.д., в том числе, задание ограничений для них. Кроме того, работа с описанием предметной области информационной онтологической модели ведется в терминах объектной или любой интересующей нас модели.

В OWL-RDF, в большинстве случаев, ограничения выражаются с помощью аксиом, которые позволяют компьютеру не просто хранить данные, но и проверять их корректность, а в некоторых случаях – делать логические выводы. Например, если в онтологии сказано, что все транспортные средства на дороге с ограничением скорости 60 км/ч не должны превышать эту скорость, а конкретный автомобиль связан с такой дорогой, то система может автоматически заключить, что для этого автомобиля действует указанное ограничение.

После нескольких итераций доработки онтология достигает состояния, когда ее можно интегрировать с реальными данными и системами. В интеллектуальных транспортных системах источниками данных могут быть дорожные камеры, датчики движения, GPS-трекеры в транспортных средствах, сообщения от водителей и пешеходов, метеорологические сервисы.

При разработке архитектуры ИТС онтологическая модель является общей семантической сетью, которая обеспечивает связь всех данных, включенных в единую архитектуру. Применение подобного функционала может быть обеспечено посредством сопоставления (модель/реальность), интеграции реальных данных в

модель (с дальнейшим применением данных в расчетах и проверка их точности посредством логической машины, встроенной в среду разработки). [112]

В нашей модели присутствуют элементы как минимум трех других видов – различные виды группировки объектов, описания их свойств и связей. Целостная концептуальная модель, построенная по рассматриваемой нами методологии, будет содержать сущности таких типов:

- Индивидуальные (конкретные) объекты.
- Определения классов (групп) объектов.
- Определения статических атрибутов объектов.
- Определения связей между объектами.

Сущности описывают «терминологию» модели, при этом, этот процесс подобен процессу заданию структуры информации в реляционной базе данных. В онтологическом моделировании данная часть моделирования системы называется TBox – от английского Terminology Box, набор терминов.

В модели, созданной для решения более практико-ориентированных задач, как правило, задают конкретные параметры и значения для отдельных индивидуальных объектов, конкретные связи между ними, такая часть модели описывает конкретные факты и называется ABox – от Assertion Box, набор утверждений. Третьей частью полной онтологической модели может быть набор правил получения логических выводов.

Например, данные о скорости автомобилей с определенного участка дороги, поступающие от датчиков, могут быть сопоставлены с описанием этого участка в онтологии (количество полос, ограничение скорости), а затем использованы для выявления аномалий – резкого снижения скорости, которое может указывать на высокую интенсивность движения или дорожно-транспортное происшествие, что обеспечит высокую оперативность управления дорожным движением. [113]

Необходимо отметить, что при создании таксономии необходимо выстроить иерархию таким образом, чтобы она отражала реальные отношения между понятиями: например, «Зонирование спроса» должно быть подклассом «Управление спросом». Ниже на рисунке 17 приведен вид иерархической

структуры первых классов системы, посредством модуля «Ontograf» редактора Protege.

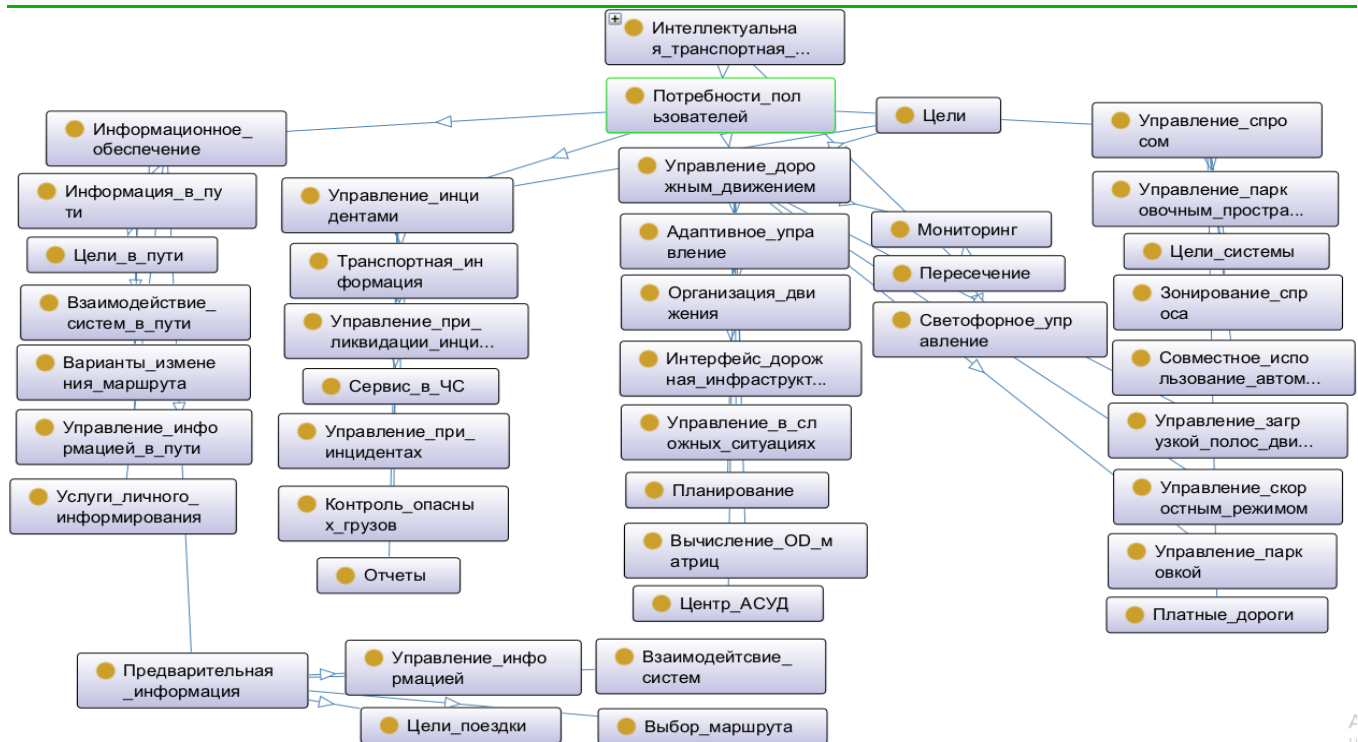


Рисунок 17 - Описание потребностей пользователей ИТС

В данном случае онтология будет являться машиночитаемым «мозгом» ИТС, так как при указании всех задействованных сущностей и необходимых SWRL-правил ИТС будет в состоянии управляться автономно на основе получаемых, либо расчётных данных.

Массив классов и сущностей модели в Protégé изображен на рисунке 18.

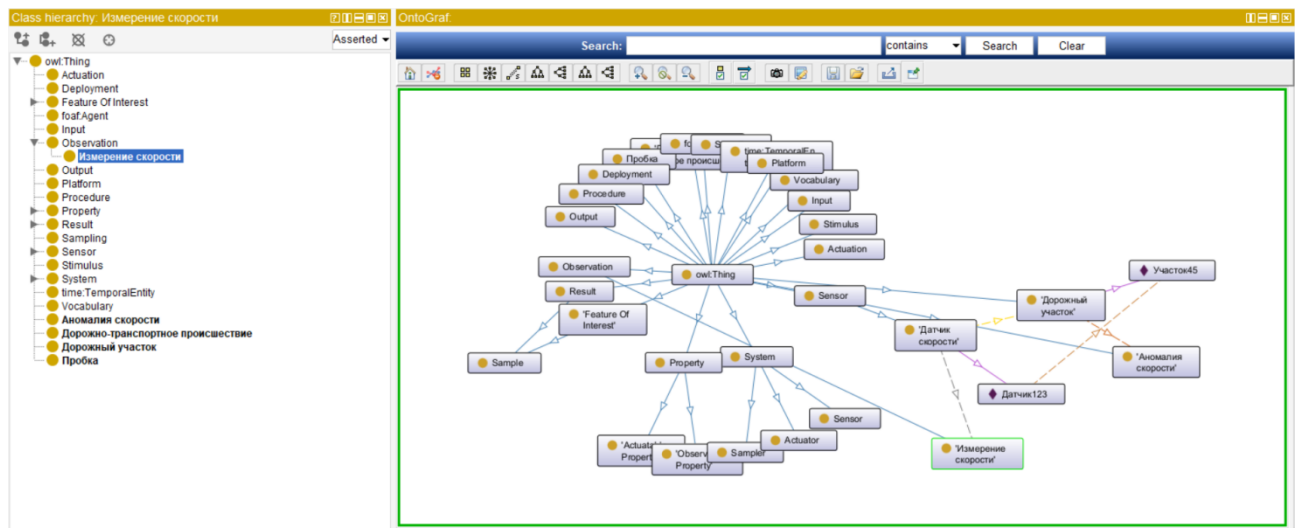


Рисунок 18 - Пример формирования модели для интеграции логического правила

Задача онтологического моделирования состоит в поиске практически обоснованного и оптимального соотношения между уровнем детализации модели (и, как следствие, достоверности результатов моделирования) и требуемых для этого ресурсов, исходя их отсутствия логических ошибок в pellet, создана оптимальная структура онтологической модели.

С практической точки зрения возможность определять логические правила и законы, в соответствии с которыми должны возникать логические выводы внутри системы является одной из ключевых функциональных особенностей онтологической информационной модели и имеет название SWRL. Программная реализация SWRL в Protégé, благодаря простому синтаксису правил и широкому спектру параметров, которые можно задать как для класса, так и для индивида, позволяет создавать масштабные логические системы, при невысокой нагрузке на мощность устройства.

Структура правила имеет две основных части:

- условие (выполняется или не выполняется);
- вывод, формирующийся, если условие выполнено или не выполнено;

При этом, как вывод, так и условие допускают многосоставность (допускается несколько атомов – элементарных логических выражений). Выполнение условия происходит в том случае, если все составляющие его атомы

(обстоятельства) имеют значение «истина». Необходимо отметить, что существуют и ограничения в SWRL, которые выражаются в отсутствии возможности добавить отрицание и дизъюнкцию в атомы. Вместе с тем, при процессе составления правила, в качестве аргумента может выступать переменная или конкретный объект, при этом, предикаты могут включать в себя собой не только утверждения о связях.

Данная составная часть онтологической модели позволяет создать систему управления почти любой подсистемой или периферийным оборудованием, при этом имеет минимальное количество ограничений в функциях и не имеет ограничений по интеграции с существующими техническими решениями, написанными на более распространенных языках программирования.

Таким образом, пример простого логического правила, определяющего аномальные значения параметра дорожного движения (на основании данных с датчиков), изображен на рисунке 19.

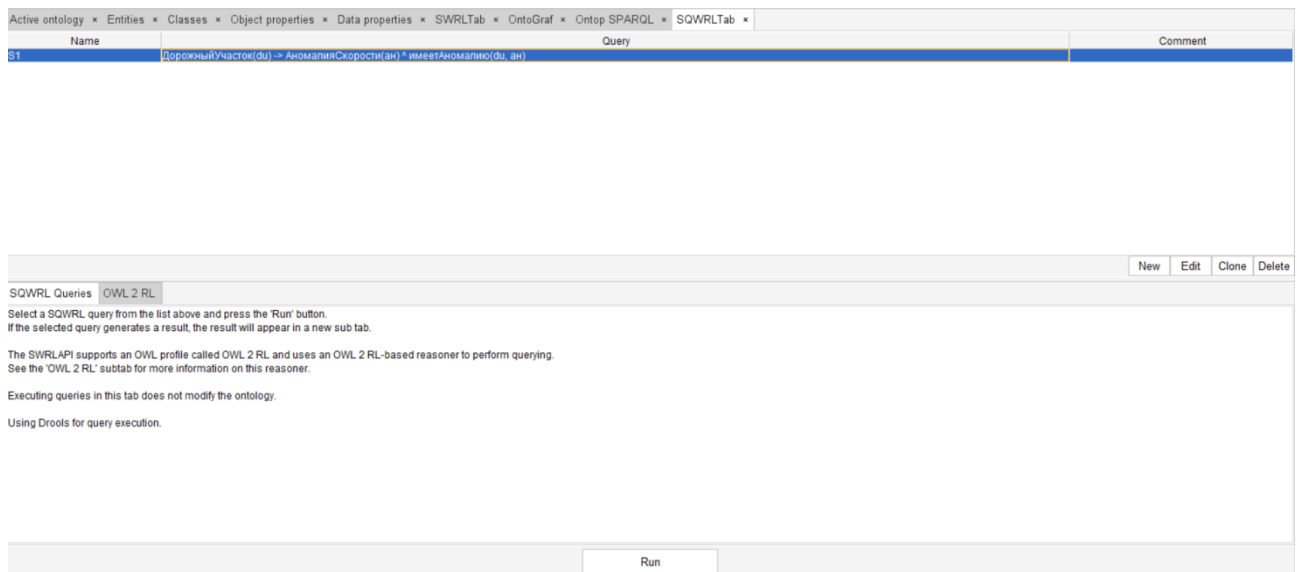


Рисунок 19 - Пример формирования логического правила в редакторе Protege

Далее создано логическое правило, на основе SWRL языка, который позволяет задать определенные условия функционирования модели при интеграции с потоком данных, возникающим в следствии функционирования ИТС:

S1 ДорожныйУчасток(du) -> АномалияСкорости(ан) ^
имеетАномалию(du, ан)

Теоретическая база и методические особенности применения онтологического подхода в интеллектуальных транспортных системах, позволяет вести разработку моделей, основанных на принципах формального представления данных, значительно сокращая время и затраты на разработку конечной модели. Основные особенности и отличия нашей модели заключаются в:

1. Формализации дорожной ситуации (набор аксиом OWL 2 DL);
2. Реализации динамического управления системой посредством гибридной архитектуры;
3. Повсеместное применение процедурные правила (SWRL + Java).

Кроме того, при разработке онтологической модели необходимо учитывать тот комплекс моделей, которые существуют в области знаний, связанных с интеллектуальной транспортной системой. На рисунке 20 изображено отображение базы знаний, которая описывает существующие модели, описывающие движение транспортных потоков.

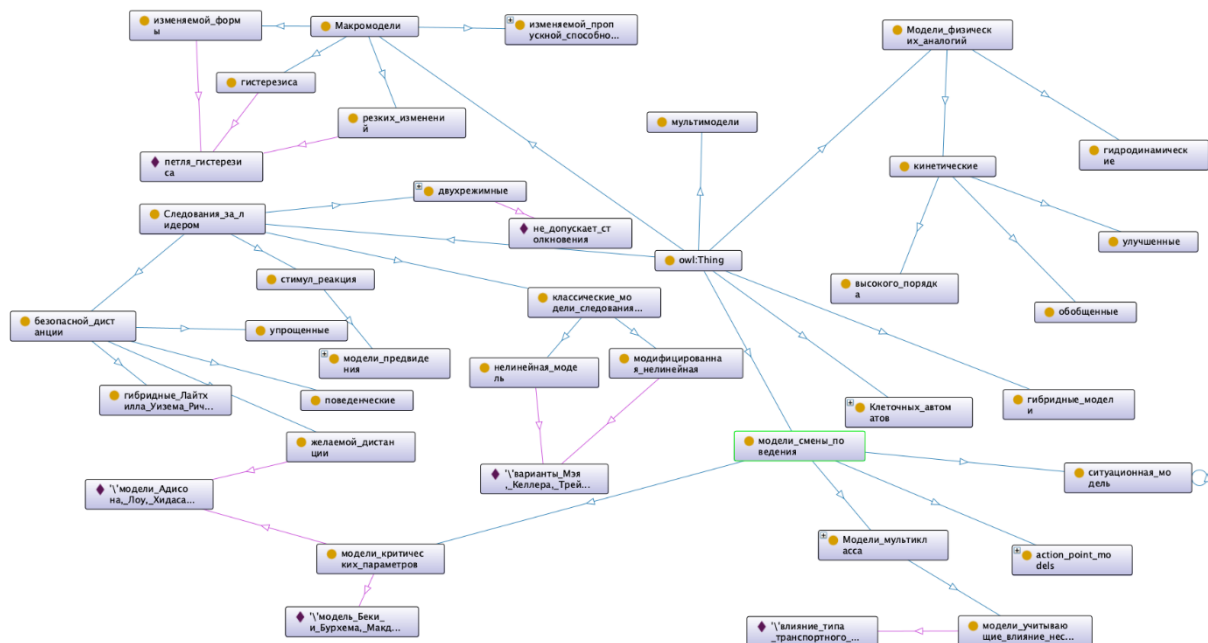


Рисунок 20 – Онтология моделей, применяемых в ИТС

Исходя из возможностей Semantic Web, а также среды разработки Protégé допускается применение логических правил по замкнутому принципу, то есть, системе не обязательно получать данные извне, достаточно значений, уже заданных внутри модели. Таким образом, открывается возможность создания не

только систем учета, систем, осуществляющих управление на основе потока поступающих данных, но и систем, которые в рамках замкнутого цикла позволяют осуществлять управление конкретным дорожным объектом. [114]

Примером является система управления светофорным объектом, которая основана на SWRL правилах. Ключевым отличием предложенной модели является:

- Управление с учетом интенсивности дорожного движения.
- Поддержка режимы работы, учитывающая фактическое наличие ТС, при определении длительности фаз работы.

Длительность предоставленного права на движение одному или нескольким конфликтующим потокам («Зеленый свет») определяется в зависимости от количества транспортных средств, интенсивности дорожного движения, приоритетности транспортного средства и т.д. Таким образом, мнемосхема, определяющая порядок чередования фаз и длительность их тактов заменяется онтологической моделью процесса, которая фактически принимает решение о смене фазы или изменении длительности такта, формируя цикл регулирования.

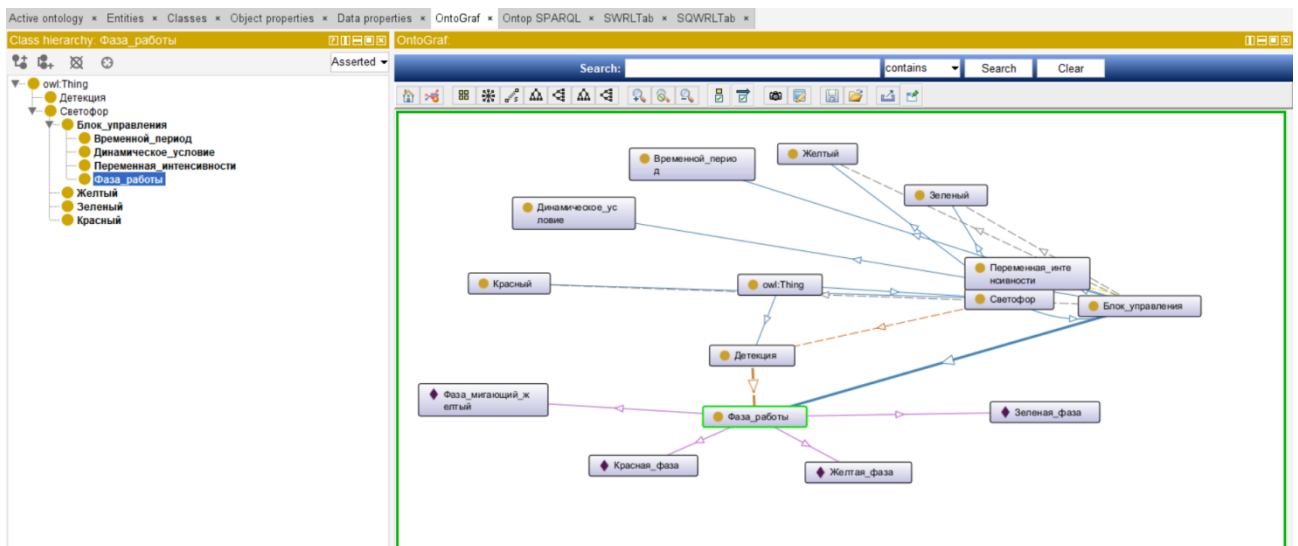


Рисунок 21 - Набор классов и сущностей динамической системы управления светофором

Наша система управления светофорным регулированием подразумевает аспект адаптивности – использование доступных данных о транспортном потоке и обеспечение координации работы нескольких светофорных объектов. В частности,

заданных внутри модели. Например, правилом предусмотрено добавление времени в работу «Зеленой фазы» светофора на экипажное время при детектировании транспортного средства в зоне перекрестка, при учете параметров минимальной базовой длительности зеленой фазы, а также максимальной.

Правило: `swrlb:add(?newDur, ?curr, 10) ^ untitled-ontology-31:Детектирован(?tl, ?det) ^ untitled-ontology-31:Максимальная_длительность_фазы(?phase, ?max) ^ untitled-ontology-31:Светофор_1(?tl) ^ untitled-ontology-31:Куппрентная_длительность(?phase, ?curr) ^ untitled-ontology-31:Текущая_фаза_светофора(?tl, ?phase) ^ untitled-ontology-31:Увеличение_фазы(?det, ?phase) ^ untitled-ontology-31:Базовая_длительность_фазы(?phase, ?base) ^ swrlb:lessThan(?curr, ?max) -> untitled-ontology-31:Куппрентная_длительность(?phase, ?newDur)`

Кроме того, предусмотрен ряд других правил, которые позволяют осуществлять управление перекрестком.

Следующий аспект, который определяет синхронность действий, выполняемых в рамках осуществления светофорного регулирования - координация. Переключение режимов работы светофоров на одном перекрестке, дублирования функции датчиков и детекторов, создание зеленой волны – все это обеспечено SWRL правилами, которые отвечают за координацию.

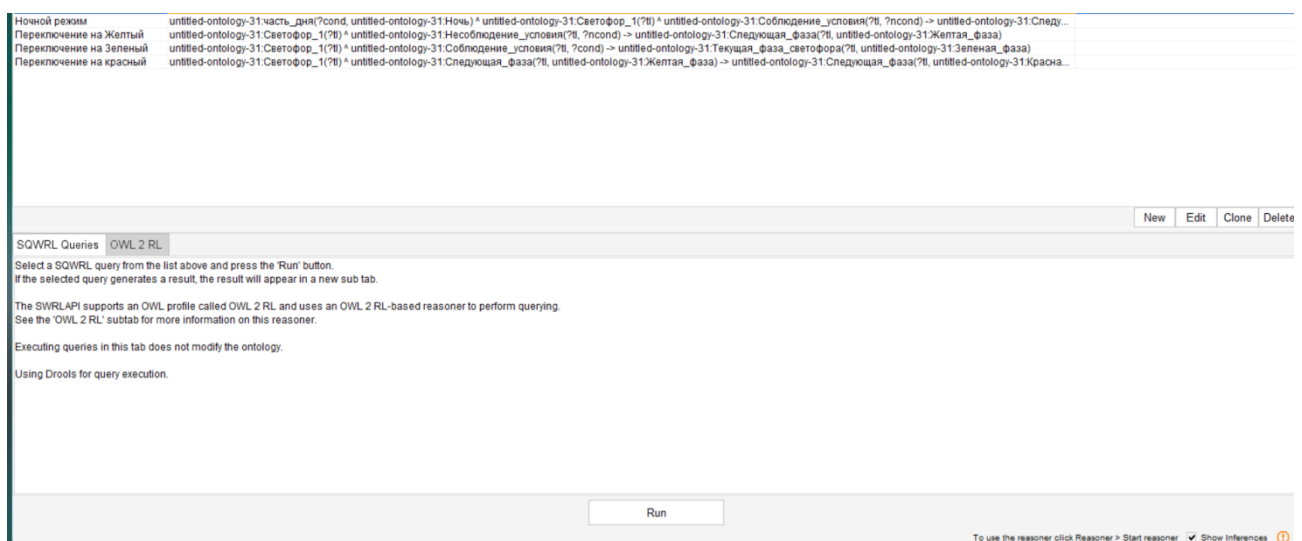


Рисунок 23 - Совокупность адаптивных Правил SWRL

Кроме того, в рамках системы предусмотрен приоритет для движения общественного и специального транспорта, то есть светофоры автоматически предоставляют приоритет общественному транспорту, сокращая время его прохождения через перекрёстки.

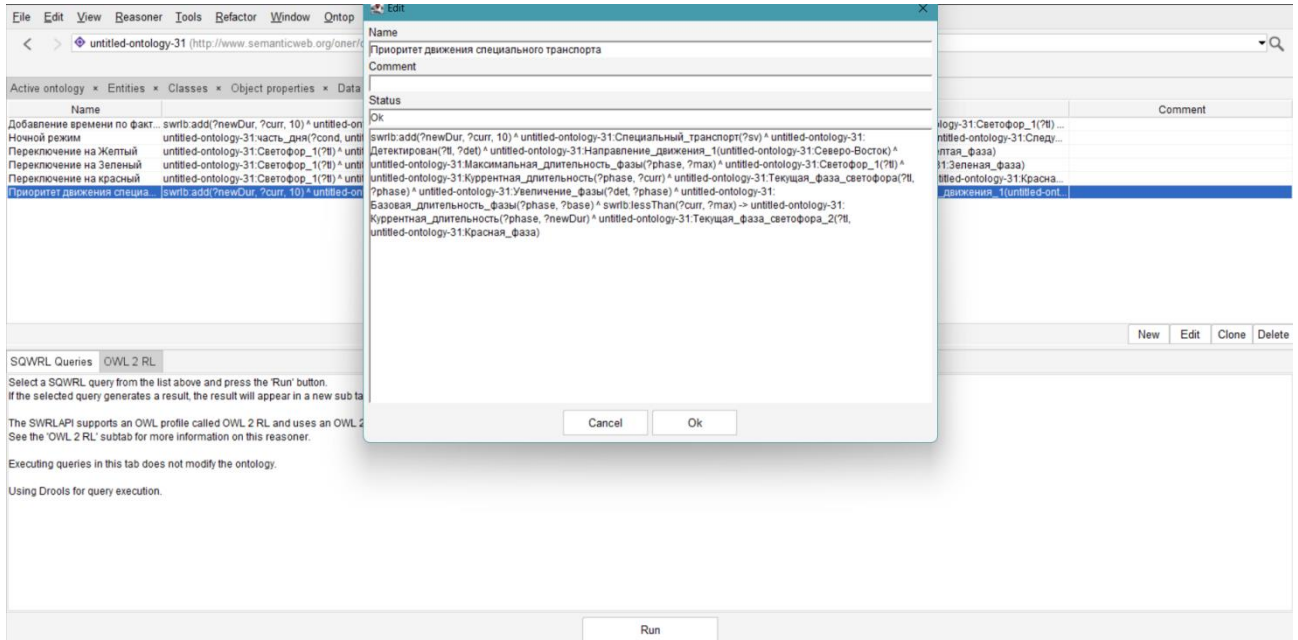


Рисунок 24 - Адаптивное правил SWRL для обеспечения приоритета проезда
Содержание правила:

```
swrlb:add(?newDur, ?curr, 10) ^ untitled-ontology-31:Специальный_транспорт(?sv) ^
untitled-ontology-31:Детектирован(?tl, ?det) ^ untitled-ontology-
31:Направление_движения_1(untitled-ontology-31:Северо-Восток) ^ untitled-
ontology-31:Максимальная_длительность_фазы(?phase, ?max) ^ untitled-ontology-
31:Светофор_1(?tl) ^ untitled-ontology-31:Куррентная_длительность(?phase, ?curr) ^
untitled-ontology-31:Текущая_фаза_светофора(?tl, ?phase) ^ untitled-ontology-
31:Увеличение_фазы(?det, ?phase) ^ untitled-ontology-
31:Базовая_длительность_фазы(?phase, ?base) ^ swrlb:lessThan(?curr, ?max) ->
untitled-ontology-31:Куррентная_длительность(?phase, ?newDur) ^ untitled-
ontology-31:Текущая_фаза_светофора_2(?tl, untitled-ontology-31:Красная_фаза)
```

Несмотря на то, что система, разработанная нами, имеет ряд особенностей, в частности, при интеграции с периферийным оборудованием, она является эффективной, а также обладает необходимыми характеристиками для масштабирования или переориентирования в рамках подсистем ИТС.

Применение онтологии не только как инструмента обработки и хранения, а как способа контроля и управления в ИТС является перспективным инструментом не только в части организации светофорного регулирования или изменения логики работы светофорных объектов.

4 ОЦЕНКА ПРАКТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ РАЗРАБОТКИ БАЗЫ ЗНАНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

4.1 Разработка методики проведения кластерной оценки результатов функционирования интеллектуальной транспортной системы на основе принципов онтологического моделирования

Интеграция онтологического подхода и кластерного анализа объединяет инструменты семантического моделирования и основы кластерной методики, что позволяет выявлять как структурные, так и функциональные уязвимости системы. [115]

Однако, аспект постоянно изменяющегося информационного и физического контекста функционирования интеллектуальной транспортной системы выступает в качестве катализатора потребности в постоянном обновлении и валидации разработанных онтологий, что позволит поддерживать актуальность информации и качество принимаемых решений. Применение методов тестирования и валидации для разработанных онтологий сделает их более устойчивыми и полезными в реальных условиях эксплуатации ИТС.

Необходимо отметить, что существует официальная система оценки эффективности ИТС, таким образом, согласно Приказа АК-95-р, критерии зрелости интеллектуальной транспортной системы (ИТС) разделены на 6 уровней (от базового до максимального) и включают 25 показателей, объединенных в группы [116]:

- Организационно-управленческие (наличие программ развития, паспортов проектов);
- Инфраструктурные (центры управления, адаптивные светофоры, датчики, видеонаблюдение);
- Технологические (интеграция подсистем, использование данных, автоматизация процессов);
- Функциональные (оптимизация трафика, безопасность, управление

парковками).

При этом, все вышеизложенные критерии оценки имеют ряд недостатков, которые выражаются в количественном уклоне оценки и формализме, примером является критерий достижения первого уровня зрелости, для достижения которого необходимо наличие 20% адаптивных светофоров, но при этом, не оценивается их реальное влияние на транспортные потоки. Кроме того, критерий оснащения магистралей датчиками (для уровня 2) игнорирует качество данных и эффективность применения этих данных при осуществлении управления.

Необходимо отметить, что подход к оценке эффективности ИТС, изложенный в АК-74-р не учитывает основные КРІ эффективности ИТС, например, снижение времени в пути, уменьшение числа ДТП, оптимизацию издержек эксплуатации автотранспорта и т.д, что приводит к формальному выполнению требований.

В большинстве случаев, в данной методике приведены не связанные с ИТС показатели, следовательно, утверждать то, что та или иная система обладает эффективностью выше или ниже – невозможно. Необходимо пересмотреть существующие подходы к оценке эффективности ИТС, как с точки зрения информационной системы, так и с точки зрения точности принимаемых или поддерживаемых решений.

Кластерная методика оценки архитектуры интеллектуальной транспортной системы (ИТС) на основе онтологической базы знаний подразумевает сегментированную оценку каждой составляющей процесса функционирования онтологии в рамках ИТС. С точки зрения справочной системы, базы знаний, онтология, применительно к ИТС представляет собой формализованную модель данных, описывающую сущности, связи и процессы в ИТС.

Кластерная методика оценки позволяет оценить архитектуру системы через призму семантической целостности, функциональности и адаптивности, что критично для управления умными городами и транспортными сетями. Схема проведения оценки приведена на рисунке 25.

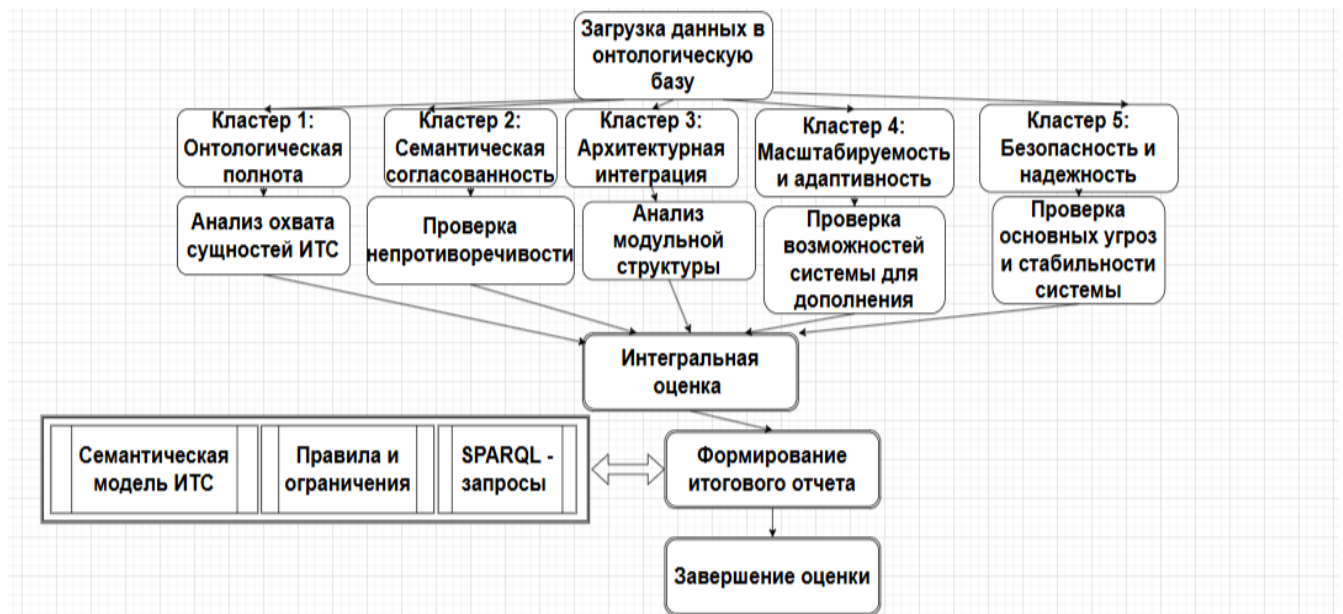


Рисунок 25 - Схема кластерной оценки ОМ ИТС

Функционально-методическое описание кластеров:

Кластер 1 - Онтологическая полнота. Имеет две метрики: Коэффициент покрытия сущностей (K_1) и Глубина связей (K_2). Оценка производится с точки зрения соотношения количества описанных условных единиц ОМ ИТС и связей между ними к фактически имеющимся в системе, то есть полноте описания в онтологической модели.

Кластер 2 - Семантическая согласованность. Имеет три метрики: Конфликты типов (K_3), Индекс логической целостности запроса (K_4) и Семантические конфликты (K_5). Позволяет определить наличие семантических конфликтов, ошибок, логических ошибок в описанной онтологической модели (K_3 - на этапе обработки данных машиной логического вывода, K_4 - на этапе обмена данными с периферией и интеграционной платформой, K_5 - на этапе составления логических правил, которые управляют подсистемой, элементом ИТС).

Кластер 3 – Архитектурная интеграция. Имеет две метрики: Коэффициент интероперабельности (K_6), Задержка синхронизации (K_7). С практической точки зрения позволяет понять, насколько эффективно выстроена цепочка обмена данными между составными частями системы исходя из времени передачи и количество неудачных попыток связи с внешними системами.

Кластер 4 - Масштабируемость и адаптивность. Включает в себя две метрики:

Степень стандартизации интерфейсов (K_8). Ресурсоёмкость масштабирования (K_9). Позволяет оценить возможность и целесообразность увеличения количества подсистем, а также периферийного оборудования посредством расчета необходимого количества ресурсов и уровня стандартизации (формализации) используемых условных единиц ОМ ИТС, а также связей.

Кластер 5 – Надежность. Две метрики: Индекс уязвимостей (K_{10}) и (K_{11}), Время восстановления (K_{12}) и (K_{13}). На практике позволяет оценить количество угроз (незащищенных шифрованием условных единиц или связей).

Таким образом, разработанная методика кластерной оценки архитектуры ИТС на основе методов и отдельных показателей онтологического моделирования интеллектуальной транспортной системы, включающий в себя принципы:

1. Структурирования и формализации данных на основе онтологической модели, обеспечивающей отбор релевантных показателей и установление связей между ними.
2. Формирования интегрального вектора признаков для каждого оцениваемого объекта (перекресток, коридор, зона ИТС) с учетом весов, определяемых через онтологические отношения.
3. Проведения итеративной кластеризации для выявления типовых состояний и аномалий в работе системы.
4. Семантической интерпретации результатов, каждый кластер получает описание на языке предметной области благодаря онтологии. (Например, «кластер стабильно функционирующих перекрестков с высокой пропускной способностью»).

Главным преимуществом алгоритма является его способность не только количественно группировать объекты, но и обеспечивать глубокое содержательное объяснение выявленных кластеров. Такая особенность переводит оценку из плоскости констатации статических различий в плоскость управленческих решений, позволяя выявить не только «отстающие» элементы ИТС, но и идентифицировать конкретные причины низкой эффективности.

В результате разработанный алгоритм представляет собой не только

инструмент классификации, а целостный метод диагностики ИТС, который повышает обоснованность, прозрачность и практическую ценность оценки для целей адаптивного управления, и развития транспортных систем, в частности, при разработке интеллектуальной транспортной системы Ростовской агломерации. Данный подход создаёт основу для построения систем поддержки принятия решений нового поколения, оперирующих не только данными, но и знаниями о предметной области.

4.2 Разработка системы кластерной оценки интеллектуальной транспортной системы с применением принципов онтологического моделирования

В данной части нашего исследования рассмотрены вопросы оценки эффективности внедрения в ИТС методов и инструментов создания онтологии информационных систем. Эффективность применяемых инструментов, способных оптимизировать создание архитектуры интеллектуальной транспортной системы требует всесторонней и конкретизированной системы оценки, учитывающей проблемы: интеграции компонентов, отсутствие стандартизированных методов анализа, низкую адаптивность к динамически меняющимся условиям. Предлагаемая кластерная методика оценки на основе онтологической базы знаний решает вышеуказанный набор проблем, обеспечивая комплексный подход к оценке.

Кластер 1: Онтологическая полнота

1. Коэффициент покрытия сущностей:

$$K_1 = \frac{N_{\text{описанные}}}{N_{\text{общее}}}; \quad (5)$$

где $N_{\text{описанные}}$ - количество формализованных сущностей, $N_{\text{общее}}$ - общее число сущностей. Исходя из определения понятия сущность (формализованные потребности пользователей). Общий перечень потребностей пользователей ИТС включает около 790 позиций, поэтому $N_{\text{общее}}$ можно принимать равное этому значению. Градацию фактических состояний предлагается принимать из следующих допущений: обязательными сущностями, при реализации которых можно считать, что ИТС функционирует можно считать сущности для сервисных

доменов «управление данными ИТС» и «управление дорожным движением по отношению к его участникам». На втором этапе включаются сущности, соответствующие сервисным доменам «персональная безопасность, связанная с дорожным движением» и «информирование участников движения. При таких условиях

$$N_{\text{служ}} = \begin{cases} 0,3 & \text{при реализации первого этапа} \\ 0,5 & \text{при реализации двух этапов} \\ \text{более } 0,5 & \text{при дальнейшем развитии} \end{cases}$$

2. Глубина связей:

$$K_2 = \frac{L_{\text{реальное}}}{L_{\text{теоретическое}}}, \quad (6)$$

где $L_{\text{реальное}}$ -фактическое количество связей, $L_{\text{теоретическое}}$ - заложенное в систему число связей. $L_{\text{теоретическое}}$ – теоретическое количество потоков данных (связей) для архитектуры ИТС, включающей сервисные группы в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14813-1-2011. Это количество составляет 2140. Для объективного определения K_2 использовалось понятие энтропии как меры недостающей информации по Шеннону:

$$S = \frac{1}{\ln L_{\text{теор}}} * \ln(p * L_{\text{теор}}),$$

где p - вероятность пребывания системы в состоянии полной энтропии. График изменения параметра глубины связей выглядит следующим образом (рис. 7).

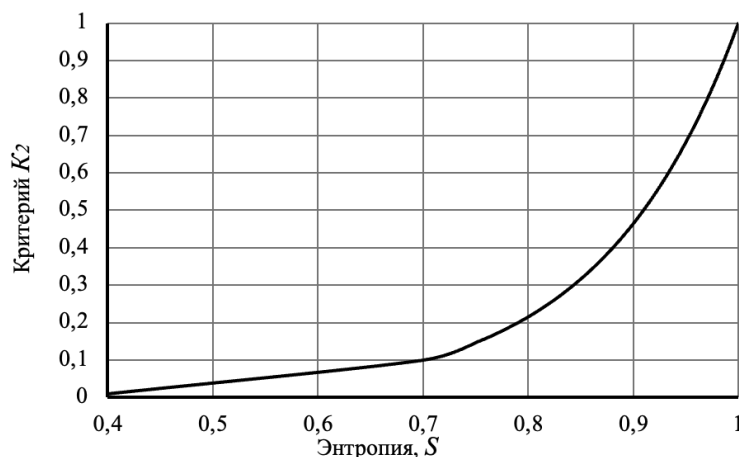


Рисунок 26 – График значений K_2

Кластер 2: Семантическая согласованность

Оценка логической непротиворечивости и соответствия стандартам при разработке онтологической модели является той областью оценки, которая определяет качество создания модели, а также детализацию ее проработки.

Семантическая полнота обеспечивает единообразное представление информации, корректную интерпретацию данных, понятность и однозначность предоставляемых сервисов ИТС, возможность интеграции данных из разных источников, снижение когнитивной нагрузки.

Данный кластер оценки включает в себя три метрики, которые направлены на выявление несогласованностей и ошибок.

Конфликты типов:

Позволяет оценить количество противоречий в назначении классов/сущностей (например, одна сущность принадлежит к взаимоисключающим категориям).

$$K_3 = \frac{C_{\text{конфликты}}}{N_{\text{общее}}}, \quad (7)$$

где $C_{\text{конфликты}}$ — число семантических противоречий при запуске Pellet или другой логической машины.

При увеличении количества сущностей увеличивается количество логических конфликтов в системе по линейной зависимости, таким образом, при учете $N_{\text{общее}} = 504$, предел значений K_3 выглядит следующим образом: $0 < K_3 < 1$, где 1 — значение при котором количество семантических конфликтов сравнялось с количеством сущностей, что снижает эффективность функционирования системы до 0%. График зависимости выглядит следующим образом:

Индекс логической целостности запроса:

Позволяет прямо и количественно связать время выполнения запроса с фактом наличия логических ошибок в онтологической модели.

$$K_4 = \frac{T_{\text{ЛВ}}}{T_{\text{Полное}}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{полное}}$ — общее время выполнения запроса, а $T_{\text{ЛВ}}$ - время обработки данных системой логического вывода (Reasoner).

Экспериментально установленное время работы полного цикла работы системы логического вывода Pellet ($T_{ЛВ}$) имеет следующий график:

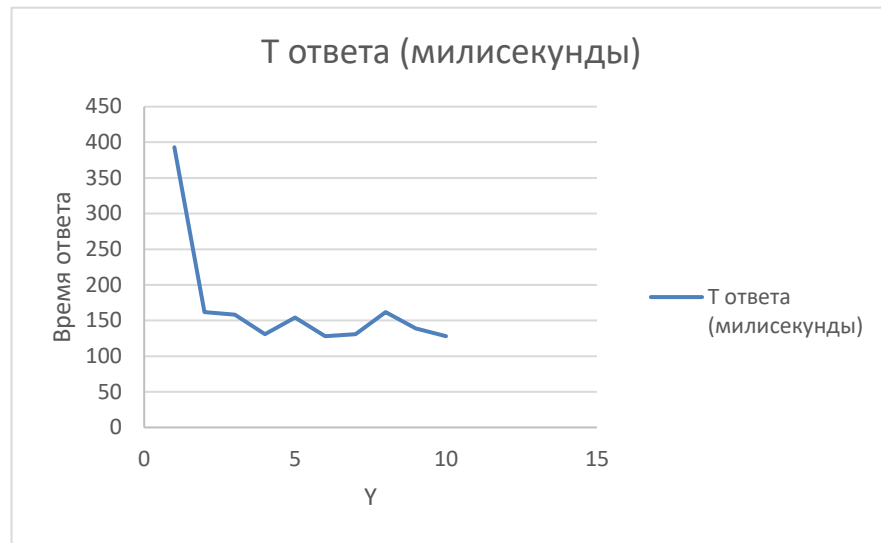


Рисунок 27 - График значений K_4

Соответственно, конкретная линейная зависимость между количеством обращений и временем ответа отсутствует, более того, обозначена тенденция снижения времени обработки запроса с каждым обращением к онтологии. Таким образом, в рамках эксперимента произведено 10 обращений к онтологии и построен график взаимоотношения между общим временем обработки ($T_{\text{полное}}$) и временем работы системы логического вывода ($T_{ЛВ}$).

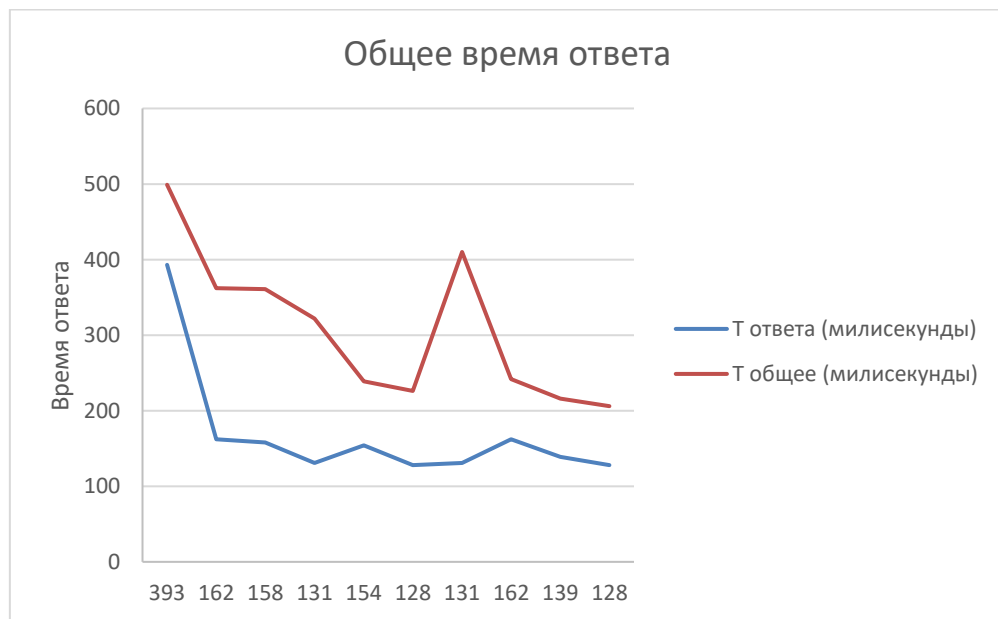


Рисунок 28 - График значений K_4

В рамках эксперимента определен следующий диапазон значений:

$$0,62 < K_4 < 0,78.$$

При значении K_4 равном 0 – ошибки отсутствуют, при значении между 0 и 1 присутствуют ошибки, но функциональность сохранена, при значении 1 – все время выполнения запроса потрачено на разрешение логических ошибок.

2. Семантические конфликты:

Противоположные или логически несовместимые утверждения.

$$K_5 = \frac{N_{\text{Семантик}}}{N_{\text{правил}}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{семантик}}$ – количество семантических конфликтов, N правил – количество правил.

Так как количество логических правил определено лишь масштабом онтологической, конкретного диапазона значений, данный параметр не имеет. Вместе с тем, пределы значений метрики в данном случае будут заданы следующим образом: $0 < K_5 < 1$, где 0 – полное отсутствие семантических конфликтов, а 1 – количество семантических конфликтов равно количеству правил, соответственно, применение каких-либо логических правил невозможно и система не жизнеспособна.

Кластер 3: Архитектурная интеграция

Проверка совместимости онтологической базы знаний с компонентами интеллектуальной транспортной системы позволяет обеспечить минимальное количество временных задержек, ошибок и потерь данных при работе онтологии в рамках функционирования интеллектуальной транспортной системы.

С точки зрения потребностей пользователей ИТС, архитектурная интеграция обеспечивает непрерывный доступ к сервисам, синхронизацию данных между различными устройствами, кроссплатформенную доступность сервисов, интеграцию с личными устройствами и приложениями, автоматическое обновление информации.

1. Коэффициент интероперабельности:

Позволяет определить способность онтологии обмениваться данными с внешними системами без потери смысла логических законов и иной информации.

Измеряет долю сущностей/связей, соответствующим стандартным моделям или онтологиям.

В частности, происходит оценка практической способности онтологии к интеграции с внешними системами. Рассчитывается доля успешных попыток взаимодействия (без ошибок конвертации/потерь данных) от общего числа попыток за определенный период.

$$K_6 = \frac{S_{\text{успешные}}}{S_{\text{Всё}}}, \quad (10)$$

где $S_{\text{успешные}}$ - количество успешных интеграций с внешними системами (API, IoT), $S_{\text{Всё}}$ - общее число попыток.

При этом, успешной итерацией считается взаимодействие, при котором: - данные переданы без потерь; - семантика сущностей и связей сохранена; - отсутствуют ошибки валидации.

Диапазон значения определен от 0 до 1, где: 0,95-1 – идеальная интероперабельность системы; 0,85-0,95 – считается допустимым (нормальным) значением, рекомендуется логировать ошибки произведенного анализа; 0,5-0,8 – считается зоной пороговой эффективности системы, требуется рефакторинг онтологии или адаптеров; Меньше 0,5 – системная проблема, необходимо проводить аудит онтологии и интеграционного слоя.

2. Задержка синхронизации:

Определяет время в секундах, за которое изменения в онтологии применяются во всех интегрированных системах, количество времени, затраченное на данный процесс определяет не только быстродействие системы, но и точность ее действий, а также, в определенной степени, точность действий и отсутствие ошибок.

$$K_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i^{\text{БЗ}} - t_i^{\text{СОЗД}}), \quad (11)$$

где N – количество успешно синхронизированных сообщений/пакетов данных за выбранный промежуток времени. $t^{\text{СОЗД}}$ - точка времени создания данных на периферийном устройстве, $t^{\text{БЗ}}$ - точка времени обработки этих же данных базой знаний, измеряется в миллисекундах. Диапазон разницы между $t^{\text{БЗ}}$ и $t^{\text{СОЗД}}$,

определен пределом от 5 до 15% общего времени обработки запроса онтологией. Соответственно, исходя из эксперимента с индексом логической целостности запроса K_4 , предел задан следующим образом $10,3 < (t^{\text{БЗ}} - t^{\text{СОЗД}}) < 74,85$. Количество успешно синхронизированных сообщений/пакетов данных, обработанных за выбранный промежуток времени (секунда) – N , исходя из результатов фактических расчетов имеет следующие пределы значений: $2,004 < N < 4,854$. Вместе с тем, если за 1 секунду будет передаваться 1 сообщение, то N не имеет никакого влияния на K_7 , если сообщений не будет передано (0), то $K_7=0$ и система не работоспособна.

Таким образом, предел значения K_7 , находится в пределах нормализации ($0 < K_7 < 1$).

Кластер 4: Масштабируемость и адаптивность

Оценка способности онтологии ИТС и её архитектуры к росту и адаптации под новые требования, без нарушения выполнения существующих функций. Обеспечивает следующие потребности пользователей: поддержка новых технологий и сервисов, адаптация к изменяющимся потребностям пользователей, расширение функциональности без потери качества услуг, поддержка растущего числа пользователей, возможность персонализации сервисов.

1. Степень стандартизации интерфейсов:

$$K_8 = \frac{N_{\text{стандарт}} + T_{\text{стандарт}}}{N_{\text{общее}} + T_{\text{общее}}}, \quad (12)$$

где $N_{\text{стандарт}}$ – количество стандартизированных сущностей в системе, $T_{\text{стандарт}}$ – количество стандартизированных связей внутри системы, $N_{\text{общее}}$ – общее количество сущностей в системе, $T_{\text{общее}}$ – общее количество связей внутри системы.

В данном случае существует 2 набора критериев стандартизации:

1. Стандарты, применяемые при разработке и эксплуатации ИТС, в частности:

- количество стандартизированных сущностей в системе - ($N_{\text{стандарт}}$);
- количество стандартизированных связей внутри системы – ($T_{\text{стандарт}}$).

2. Документов и вокабуляров, которые регламентируют разработку

онтологических моделей:

- Применение общепринятых программных вокабуляров (Dublin core, Schema.org и т.д.);
- Наличие машиночитаемой документации (OWL-аннотации, SHACL-шаблонов).

Диапазон значений определен между 0 и 1, где: 0,9-1 – полная совместимость с экосистемой; 0,85 – 0,95 – считается нормальным значением для системы, но подразумевается необходимость обратить внимание на локальные отклонения (для интеграции не критичные); <0,85 – критичное значение, при котором возникает большой риск высоких затрат ресурсов на адаптацию;

2. Ресурсоёмкость масштабирования:

$$K_9 = \max\left(\frac{\Delta CPU}{CPU_{база}}, \frac{\Delta RAM}{RAM_{база}}, \frac{\Delta Storage}{Storage_{база}}\right), \quad (13)$$

где ΔCPU – прирост вычислительных ресурсов (ядер, виртуальных CPU), необходимый для функционирования онтологии после масштабирования и рассчитывается следующим образом:

$\Delta CPU = CPU_{нов} - CPU_{база}$, где $CPU_{нов}$ - число ядер (виртуальных CPU) после масштабирования, а $CPU_{база}$ - до масштабирования;

ΔRAM – прирост оперативной памяти (ГБ), необходимый для онтологии после масштабирования и рассчитывается следующим образом:

$\Delta RAM = RAM_{нов} - RAM_{база}$, где $RAM_{нов}$ - число гигабайт после масштабирования, а $RAM_{база}$ - до масштабирования;

$\Delta Storage$ – прирост общей памяти (ГБ), необходимый для онтологии после масштабирования и рассчитывается следующим образом:

$\Delta Storage = Storage_{нов} - Storage_{база}$, где $Storage_{нов}$ - число гигабайт после масштабирования, а $Storage_{база}$ - до масштабирования;

Пределы значения для данной метрики определен между 0 и 1 следующим образом: - 0-0,15, отличный уровень масштабируемости системы, ресурсы, необходимые для масштабирования растут линейно, либо оптимизация не требуется; - 0,15 – 0,25, считается умеренным показателем, допускается для

большого количества проектов, возможна необходимость в точечных улучшениях;
 - 0,24 – 0,4, подразумевает высокие затраты на масштабирование системы, требуется реструктуризация системы; - 0,4 и более, возможность масштабируемости системы находится за гранью рентабельности, ресурсы, необходимые для ее изменения кратно превосходят итоговый результат.

Кластер 5: Безопасность и надежность.

Оценка уровня устойчивости онтологии к угрозам, а также скорости восстановления после сбоев. С точки зрения обеспечения пользователей ИТС, данный кластер оценки позволяет контролировать: конфиденциальность персональных данных, защиту от несанкционированного доступа, надежность работы системы в критических ситуациях, предсказуемость поведения системы, резервирование критически важных функций.

1. Индекс уязвимостей:

Представляет собой долю сущностей/связей онтологии, имеющих потенциальные уязвимости (незащищенные данные, непроверенные источники, нарушение правила last privilege и т.д.).

$$K_{10} = \left(\frac{N_{\text{уязвимые сущности}}}{N} + \frac{L_{\text{уязвимые связи}}}{L} \right), \quad (14)$$

где $N_{\text{уязвимые сущности}}$ - количество уязвимых сущностей, $L_{\text{уязвимые связи}}$ - количество уязвимых связей, N – общее количество сущностей, L – общее количество сущностей, коэффициент 50% приводит метрику к диапазону между 0 и 1. К уязвимым сущностям и связям относятся те, которые могут содержать персональные данные граждан. Кроме того, вышеуказанная метрика соответствует Приказу ФСТЭК № 239 «Требования к сегментации и контролю сетевого трафика, в частности п.14. [118]

При этом, к уязвимым сущностям относят классы и экземпляры, которые либо содержат нешифрованные персональные данные, либо имеют публичный доступ на запись (открытое редактирование), а к уязвимым связям относят отношения, которые либо невозможно верифицировать на предмет корректности, либо ведут к ненадежным источникам.

$$K_{11} = \frac{C_{\text{мониторинг}}}{C_{\text{критично}}}, \quad (15)$$

где $C_{\text{мониторинг}}$ – количество критических компонентов, которые подключены к системе мониторинга и управления событиями информационной безопасности. В рамках онтологической модели это выражено атрибутом (подключен_к_ИБ), $C_{\text{критично}}$ – количество компонентов, отнесенных к критически важным (основное серверное оборудование, системы принятия решений). Данная метрика соответствует приказу ФСТЭК № 239, в частности 16 пункту.

2. Время восстановления:

$$K_{12} = \sum_I \frac{T_{\text{восстановления}}}{I}, \quad (16)$$

где $T_{\text{восстановления}}$ – время восстановления после каждой кибератаки (секунды); I – количество инцидентов.

При этом, инцидентом, в данном случае, будет считаться любое событие, которое привело либо к потере данных, либо недоступности онтологии, а временем восстановления является время, которое потратила система на диагностику, откат до стабильной версии, проверку целостности системы. Диапазон значений для данной метрики определен следующим образом: <15 минут – автоматическое восстановление; 15-60 минут – приемлемое значение, есть необходимость корректировки доступов и кодировок; Более 60 минут – отказоустойчивость отсутствует.

Для данного кластера, в отличии от остальных, необходима отдельная система итоговой оценки кластера, в силу определенных особенностей расчетов:

$$K_{13} = w_1 * (1 - K_{12}) + w_2 * (1 - \frac{K_{12}}{K_{12\max}}), \quad (17)$$

где $w_1 + w_2 = 1$

Диапазон значений: 1-0,85 – высокая надежность системы; 0,5 – 0,85 – средний уровень, требуется мониторинг; меньше 0,5 – недопустимое значение кластера.

Интегральная оценка архитектуры:

Таким образом, наша система кластерной оценки имеет 5 кластеров, которые имеют следующие коэффициенты:

Кластер 1: Онтологическая полнота: 7,5;

Кластер 2: Семантическая согласованность: 7,5;

Кластер 3: Архитектурная интеграция: 5;

Кластер 4: Масштабируемость и адаптивность: 5;

Кластер 5: Безопасность: 10.

Необходимо отметить, что вес каждого кластера определён методом парных сравнений или экспертной оценкой, все метрики, каждого кластера имеют нормализацию значений в пределах между 0 и 1. Таким образом, итоговая формула расчета интегрального индекса выглядит следующим образом:

$$K_{14(ИОА)} = \frac{7,5*(K_1+K_2)+7,5*(K_3+K_4+K_5)+5*(K_6+K_7)+5*(K_8+K_9)+10*(K_{10}+K_{11}+K_{13})}{87,5} \quad (18)$$

Таким образом, данная система кластерной оценки позволяет охватить полный спектр потребностей пользователей интеллектуальной транспортной системы в части контроля качества предоставления услуг. Исходя из нормализации значений всех метрик, диапазон изменения значений $K_{14(ИОА)}$ находится между 0 и 1. При этом, имеются следующие диапазоны значений $K_{14(ИОА)}$:

- 0,4 и ниже, система не обладает достаточным уровнем эффективности и безопасности для запуска;
- 0,4-0,7 при таких значениях система имеет достаточный уровень эффективности и безопасности, но имеется ряд архитектурных проблем, влияющих на ее работу;
- 1-0,7 система работает штатно, могут быть ошибки и сбои, которые не влияют на исполнение функций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках анализа развития ИТС получены результаты, которые являются теоретической и практической основой решения задач, связанных с разработкой архитектуры интеллектуальной транспортной системой. Исходя из результатов, применение онтологической модели, а также семантических сетей при разработке и эксплуатации ИТС открывает новые возможности с учетом развития технических средств и методов анализа данных в интеллектуальных транспортных системах.

2. Определена предметная область онтологии и семантических технологий в сфере интеллектуальных транспортных систем, разработан понятийный аппарат, определены логические выражения, характеризующие построение онтологической модели интеллектуальной транспортной системы и отдельных подсистем. Разработаны научно-методические принципы интеграции инструментов онтологии в процесс разработки и изменения архитектуры интеллектуальной транспортной системы. Определен ряд методических принципов применения инструментов разработки базы знаний онтологии информационных систем по отношению ИТС, а также алгоритмы формирования и пополнения базы знаний ИТС задающие взаимосвязь и соподчиненность между ними.

3. Структурирована база знаний интеллектуальных транспортных систем, включающая в себя полный понятийный аппарат ИТС, а также комплекс взаимосвязей между понятиями и уровня соподчиненности между ними. Определена иерархия, произведено полное описание моделей транспортного потока, а также потребностей пользователей интеллектуальной транспортной системы.

4. Разработана логико-математическая модель, на основе иерархической структуры для интеграции различных компонентов ИТС и методики кластерной оценки архитектуры ИТС на основе методов и отдельных показателей онтологического моделирования интеллектуальной транспортной системы. Произведена экспериментальная оценка практической эффективности модели в

рамках внедрения в деятельность Министерства транспорта Ростовской области. Получен спектр результатов, указывающих на высокую прикладную эффективность применения онтологического моделирования, а также инструментов семантического программирования в сфере ИТС.

5. Разработана методика кластерной оценки архитектуры ИТС на основе методов и отдельных показателей онтологического моделирования интеллектуальной транспортной системы.

Произведена интеграция методов и инструментов онтологического моделирования в процесс разработки Интеллектуальной транспортной системы для применения наиболее эффективных технических решений по отношению к приоритетным направлениям разработки, а также сформированы основные научные методические принципы, применимые для повышения эффективности разработки архитектуры интеллектуальной транспортной системы, создана новая область знания, на стыке ИТС и технологий семантического программирования.

Вместе с тем, предложены алгоритмы для формирования и пополнения Базы знаний ИТС (дополнение/изменение архитектуры ИТС), включающие в себя понятийный аппарат ИТС, а также задающей взаимосвязи и соподчиненности между ними и разработана логико-математическая модель, которая позволяет упростить интеграцию различных компонентов ИТС, а также ускоряет развитие единого подхода к проектированию и разработке ИТС.

Предложен новый инструмент приращения знаний на основе программного решения Protégé и Pellet, позволяющий повысить эффективность, систематизировать и оптимизировать процессы генерации знаний в области ИТС и создана система кластерной оценки эффективности интеграции онтологии в работу ИТС, позволяющая произвести комплексный мониторинг системы.

Практическое внедрение результатов исследования заключается в фактическом применении полученных технических решений на территории агломерации Ростова-на-Дону, в частности, реализована система управления светофорным объектом на базе онтологической модели. При практическом

применении ОМ ИТС в рамках создания Интеллектуальной транспортной системы Ростовской агломерации в части разработки следующих мероприятий:

- разработка архитектуры интеллектуальной транспортной системы Ростовской агломерации с выбором подсистем ИТС на основе принципов онтологии, описанием иерархии и потоков данных;
- применение кластерной оценки интеллектуальной транспортной системы по совокупности критериев, включающих онтологическую полноту, семантическую согласованность, архитектурную интеграцию, масштабируемость, надежность;
- алгоритм адаптивного управления светофорным объектом на основе онтологического моделирования, обеспечивающий снижение задержки до 24%.

Таким образом, в рамках разработки применен подход, подразумевающий интеграцию онтологической модели ИТС. При применении достигнуто повышение пропускной способности перекрестков на 15-25% и сокращение задержки транспортного средства на 24%. Кроме того, существенно возрастает предсказуемость поездок: отклонение от расчетного времени прибытия снижается на 7-15%, в то же время, точность прогноза времени прибытия общественного транспорта возрастает до 90-95%.

Кроме того, осуществлено внедрение принципов онтологического моделирования в деятельность филиала Федерального агентства автомобильного транспорта в Южном Федеральном округе в рамках работы над оптимизацией выпуска пассажирских транспортных средств на маршрут следования. (Акт о использовании результатов кандидатской диссертации от 10.07.2025).

Вместе с тем, применение онтологической модели интеллектуальной транспортной системы внедрено при осуществлении контрольной (надзорной) деятельности, связанной с весогабаритным контролем. Таким образом, входе применения данной модели время работы инспектора, связанное с фактическим выявлением нарушений, сокращено на 50%, что подтверждено актом о использовании результатов кандидатской диссертации МТУ Ространснадзора по ЮФО от 10.07.2025 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов И. С. Архитектура интеллектуальных транспортных систем: основные принципы/ И. С. Баранов // Автоматика и телемеханика. – 2019. – Т. 80, № 10. – С. 22–30.
2. Васильев П. Е. Онтология интеллектуальных транспортных систем: теоретические аспекты / П. Е. Васильев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2021. – № 4. – С. 58–65.
3. Жанказиев С. В. Интеллектуальные транспортные системы: учеб. пособие / С. В. Жанказиев. – М.: МАДИ, 2016. – 120 с.
4. Жанказиев С. В. Научные подходы к формированию государственной стратегии и построению интеллектуальных транспортных систем в России/ С. В. Жанказиев, В. М. Власов // Мир дорог. – 2011. – № 56. – С. 24–29.
5. Завьялов И. И. Нормативное обеспечение интеллектуальных транспортных систем/ И. И. Завьялов // Научный вестник логистики. – 2019. – Т. 3, № 6. – С. 17–22.
6. Зайцев К. Б. Архитектура систем управления в интеллектуальных транспортных системах/ К. Б. Зайцев // Инженерные системы. – 2019. – № 5. – С. 75–82.
7. Зырянов В. В. Intelligent Transport Systems. Интеллектуальные транспортные системы: учеб. пособие / В. В. Зырянов, В. Г. Кочерга, М. С. Володина. – 2014. – 93 с.
8. Орлов Т. А. Интеллектуальные транспортные системы: мировая практика и российские реалии/ Т. А. Орлов // Вестник транспортных технологий. – 2018. – № 1. – С. 17–24.
9. Румянцев А. Е. Архитектура информационных систем в ИТМ/ А. Е. Румянцев // Институт управления и информатики. – 2021. – Т. 5, № 1. – С. 68–76.
10. Смирнов А. С. Онтология управления движением в ИТМ/ А. С. Смирнов // Транспортное обозрение. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 11–15.
11. Федорова Е. И. Интеграция интеллектуальных транспортных систем с городским менеджментом/ Е. И. Федорова // Механика и управление. – 2018. – Т.

4, № 5. – С. 26–32.

12. Чуриков И. И. Использование облачных технологий в интеллектуальных транспортных системах/ И. И. Чуриков // Энергетические системы. – 2020. – Т. 3, № 2. – С. 44–50.

13. Шарова Т. В. Научные основы проектирования ИТ-систем/ Т. В. Шарова // Научные труды. – 2019. – № 8. – С. 128–134.

14. Белозеров В. В. Применение интеллектуальных транспортных систем для повышения безопасности/ В. В. Белозеров // Безопасность на транспорте. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. 37–43.

15. Демидов В. П. Практические аспекты внедрения ИТ-систем в транспорт/ В. П. Демидов // Технический вестник. – 2021. – № 3. – С. 89–96.

16. Зимин В. И. Модели и методы управления движением в условиях ИТ-систем / В. И. Зимин // Научный журнал. – 2019. – № 9. – С. 20–26.

17. Курбатов Д. А. Технологии и инструменты для разработки ИТ-систем/ Д. А. Курбатов // Успехи передовых технологий. – 2021. – Т. 2, № 1. – С. 100–106.

18. Ларина Н. В. Интеллектуальные транспортные технологии: проблемы и решения/ Н. В. Ларина // Инновационные достижения. – 2020. – Т. 11, № 7. – С. 82–89.

19. Мишин А. Г. Подходы к проектированию ИТ-систем/ А. Г. Мишин // Модернизация республики. – 2019. – № 6. – С. 94–100.

20. Ненашев С. Н. Транспорт и инновационные технологии / С. Н. Ненашев // Актуальные проблемы транспорта. – 2021. – Т. 9, № 10. – С. 11–17.

21. Орлов С. Д. Применение интеллектуальных транспортных систем в городах/ С. Д. Орлов // Проблемы транспорта. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 49–54.

22. Руденко А. Ю. Специфика архитектуры ИТ-систем/ А. Ю. Руденко // Вестник научного сообщества. – 2021. – Т. 6, № 3. – С. 55–63.

23. Сидоров В. В. Проектирование и внедрение ИТ-систем в мире и России/ В. В. Сидоров // Журнал транспортной науки. – 2020. – Т. 14, № 1. – С. 34–40.

24. Титова А. Я. Предпосылки и перспективы интеллектуальных

транспортных систем/ А. Я. Титова // Научное обозрение. – 2019. – № 5. – С. 22–30.

25. Ульянова Н. К. Системный подход к проектированию ИТ-систем/ Н. К. Ульянова // Трансформации в науке. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 76–82.

26. Филиппова Е. А. Интеллектуальные транспортные системы: основа безопасности/ Е. А. Филиппова // Журнал безопасности. – 2020. – Т. 5, № 6. – С. 49–54.

27. Шевченко Р. Г. Модели для анализа ИТ-систем/ Р. Г. Шевченко // Проблемы автоматизации. – 2021. – Т. 7, № 8. – С. 61–67.

28. Яковлев И. В. Проблемы и перспективы интеллектуального транспорта в России/ И. В. Яковлев // Научно-технические записки. – 2021. – Т. 4, № 2. – С. 102–110.

29. Ярошенко А. Л. Движение и управление транспортными средствами в условиях ИТМ/ А. Л. Ярошенко // Инновации и сеть. – 2021. – Т. 8, № 9. – С. 83–90.

30. Perallos A. Intelligent Transport Systems. Technologies and Applications/ A. Perallos, U. Hernandez-Jayo, E. Onieva, I. J. Garcia Zuazola. – 1st ed. – Wiley, 2015. – 376 p.

31. Bělinová, Z. Study of Standards and National ITS Architectures within the E-FRAME Project/ Z. Bělinová, P. Bureš // Archives of Transport System Telematics. – 2009. – February. – P. 23–28.

32. Bossom, R. Using the FRAME Architecture for Planning Integrated Intelligent Transport Systems/ R. Bossom, P. Jesty // ITS Prague 2009 : proceedings of the conference. – Prague, 2009.

33. Oskarbski J. Systematics of Intelligent Transport Systems Services/ J. Oskarbski, T. Marcinkowski, K. Mówiński. – Gdansk, Poland, 2017. – P. 15–21.

34. Smith B. L. Realizing the promise of intelligent transportation systems (ITS) data archives/ B. L. Smith, R. Venkatanarayana // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2005. – Vol. 9, No. 4. – P. 175–185.

35. Sladkowski A. Intelligent transport systems - problems and perspectives/ A. Sladkowski, W. Pamula. – Switzerland : Springer, 2016. – Vol. 32. – (Advances in

Intelligent Systems and Computing).

36. Qi G. Analysis and prediction of regional mobility patterns of bus Travellers using smart card data and points of interest data/ G. Qi, A. Huang, W. Guan, L. Fan // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2018. – Vol. 20, No. 4. – P. 1197–1214.
37. Jesty P. Using the European ITS Framework Architecture/ P. Jesty, R. Bossom // ITS World Congress 2006: proceedings of the congress. – London, 2006.
38. Mounica, B. Architecture for Intelligent Transport Systems/ B. Mounica, K. Lavanya // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2019. – July. – P. 1281–1286.
39. Lu M. Cooperative and Connected Intelligent Transport Systems for Sustainable European Road Transport/ M. Lu, O. Turetken, E. Mitsakis. – P. 145–155.
40. Vetrova E. A. Intelligent Transport Systems In The Russian Federation: Features Of Organization And Management/ E. A. Vetrova, E. F. Kabanova. – CRC-Press, 2000. – 400 p.
41. Rashad M. F. Advancements in Intelligent Transportation Systems (ITS) and Roadside Unit (RSU) Design: A Comprehensive Review/ M. F. Rashad, Q. I. Ali // International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches. – 2023. – Vol. 7, No. 9. – P. 209–221. – URL: <https://doi.org/10.59287/ijanser.1534> (дата обращения: 30.04.2025).
42. Nasim, R. Architectural Evolution of Intelligent Transport Systems (ITS)/ R. Nasim. – 2017. – URL: <https://www.dissertations.se> (дата обращения: 30.04.2025). – P. 46–60.
43. Ghosh S. Intelligent Transportation Systems: New Principles and Architectures/ S. Ghosh, T. S. Lee. – CRC-Press, 2000. – 192 p.
44. Yokota T. ITS System Architectures for Developing Countries/ T. Yokota, R. J. Weiland. – The World Bank, 2004. – (Technical Note; 5).
45. Газанова, Н. III. Актуальность кластерного анализа данных при обработке информации/ Н. III. Газанова, Д. Е. Климов // Исследования молодых ученых: материалы LXI Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2023 г.). – Казань:

Молодой ученый, 2023. – С. 1–5. – URL: <https://moluch.ru/conf/stud/archive/492/18004/> (дата обращения: 10.05.2025).

46. Водяхо А. И. Онтологические модели для систем реального времени / А. И. Водяхо, В. В. Никифоров // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, № 2 (28). – С. 240–252. – URL: [https://www.ontology-of-designing.ru/article/2018_2\(28\)/6_Vodyaho.pdf](https://www.ontology-of-designing.ru/article/2018_2(28)/6_Vodyaho.pdf) (дата обращения: 30.04.2025).

47. Жанказиев С. В. Научные основы и методология формирования интеллектуальных транспортных систем в автомобильно-дорожных комплексах городов и регионов. URL: <https://www.dissercat.com/content/nauchnye-osnovy-i-metodologiya-formirovaniya-intelektualnykh-transportnykh-sistem-v-avtomobi> (дата обращения: 30.04.2025).

48. ГОСТ Р 56829-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Интеллектуальные транспортные системы. Термины и определения: утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 10.12.2015 № 2150-ст // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 30.04.2025).

49. Сырцова, Е. А. Эффекты внедрения интеллектуальных транспортных систем в регионах России/ Е. А. Сырцова // Государственное управление. Электронный вестник. – 2023. – № 101. – С. 159–169. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effekty-vnedreniya-intellektualnyh-transportnyh-sistem-v-regionah-rossii> (дата обращения: 14.12.2025).

50. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы»: постановление Правительства Рос. Федерации от 20 дек. 2017 г. № 1596 // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 30.04.2025).

51. Об утверждении паспорта национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги»: протокол президиума Совета при Президенте Рос. Федерации по стратегическому развитию и нац. проектам от 24 дек. 2018 г. № 15 // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 30.04.2025).

52. Марат Хуснуллин: Интеллектуальные транспортные системы по

нацпроекту «Безопасные качественные дороги» внедряют в 56 регионах// Правительство России : офиц. сайт. – 2023. – URL: <http://government.ru/news/51213> (дата обращения: 30.04.2025).

53. Об утверждении Концепции создания и функционирования национальной сети интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования: распоряжение М-ва транспорта Рос. Федерации от 30 сент. 2022 г. № АК-247-р // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 30.05.2025).

54. Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий: указ Президента Рос. Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 30.04.2025).

55. Цифровая трансформация транспортной отрасли: федеральный проект // Национальный проект «Эффективная транспортная система». – URL: <http://government.ru/rugovclassifier/925/about/> (дата обращения: 30.05.2025).

56. Авдеев В. В. Интеллектуальные транспортные системы в структуре государственного управления/ В. В. Авдеев // Современная наука. – 2025. – № 2. – С. 8–11. – URL: <file:///C:/Users/mfinko/Downloads/intellektualnye-transportnye-sistemy-v-strukture-gosudarstvennogo-upravleniya.pdf> (дата обращения: 30.04.2025).

57. Ефимов А. А. Интеллектуальные транспортные системы: перспективы, эффективность и проблемы/ А. А. Ефимов, К. С. Медведева // International Journal of Advanced Studies. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 132–150. – URL: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2025-15-1-349> (дата обращения: 30.04.2025).

58. Управление транспортными потоками в городах: монография / Е. А. Андреева, К. Бёттгер, Е. В. Белкова ; под общ. ред. А. Н. Бурмистрова, А. И. Солодкого. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 205 с. – ISBN 978-5-16-14845-8.

59. Жанказиев С. В. Технические средства для организации и безопасности дорожного движения: учебник / С. В. Жанказиев, В. Я. Буйленко, Ю. А. Короткова. – М. : Техполиграфцентр, 2022. – 208 с. – ISBN 978-5-94385-198-8.

60. Солодкий А. И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в

России: проблемы и пути их решения. Новый этап/ А. И. Солодкий // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 6. – С. 10–19.

61. Жанказиев С. В. Сервисная полоса ИТС/ С. В. Жанказиев, Ю. А. Короткова // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 2 (36).

62. The 2018 Revision of World Urbanization Prospects // United Nations, Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). – 2018. – URL: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (дата обращения: 26.03.2025).

63. Pandey A. D. A Machine Learning-Based Overlay Technique for Improving the Mechanism of Road Traffic Prediction Using Global Positioning System / A. D. Pandey [et al.] // SSRN Electronic Journal. – 2023. – URL: <https://ssrn.com/abstract=4426225> (дата обращения: 30.04.2025).

64. Князькина О. В. «Умные светофоры» в концепции «умного транспорта»/ О. В. Князькина, Р. М. Хамитов, К. С. Зайленко // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2024. – № 4 (42). – EDN BCSCFX.

65. Glide into Smoother Traffic: The Green Wave You Want to Ride// Land Transport Authority (LTA), Singapore. – 2024. – 28 March. – URL: https://www.lta.gov.sg/content/ltagov/en/who_we_are/statistics_and_publications/Connect/GLIDE.html (дата обращения: 26.03.2025).

66. Лыткина, А. А. Применение адаптивных систем управления движением при обеспечении приоритета городского пассажирского транспорта общего пользования на регулируемых пересечениях/ А. А. Лыткина // Интеллектуальный капитал и инновационное развитие общества, науки и образования: Всерос. науч.-практ. конф. (Пенза, 23 нояб. 2019 г.). – Пенза : Наука и Просвещение, 2019. – С. 71–73.

67. Emergency Response in Latin America and Spain [Электронный ресурс] // Intertraffic. – 2024. – 3 Oct. – URL: <https://www.intertraffic.com/news/traffic-management/intelligent-traffic-management-public-safety-latin-america-spain> (дата обращения: 24.03.2025).

68. Zhichen, E. G. The Evolution of Traffic Lights: A Comprehensive Analysis

of Traffic Management Systems in Shanghai [Электронный ресурс] / Eden Guo Zhichen // Journal of Electronic Research and Application. – 2025. – Vol. 9, No. 1. – P. 330–336. – URL: <https://doi.org/10.26689/jera.v9i1.9636> (дата обращения: 30.04.2025).

69. Муленко М. Д. Интернет вещей (IoT) и его влияние на умные города/ М. Д. Муленко, Д. О. Лескова, Т. В. Сафонова, А. В. Мокряк // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2024. – № 3 (51). – С. 73–78.

70. Николаева Р. В. Управление транспортной инфраструктурой на основе цифровых двойников/ Р. В. Николаева, Р. Ф. Валиев // Вестник НЦБЖД. – 2024. – № 3 (61). – С. 75–80.

71. Интеллектуальная транспортная инфраструктура (ИТС) в России// TADVISER:. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Интеллектуальная_транспортная_инфраструктура_\(ИТС\)_Россия](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Интеллектуальная_транспортная_инфраструктура_(ИТС)_Россия) (дата обращения: 30.04.2025).

72. Розенберг И. Н. Применение онтологий в управлении транспортом / И. Н. Розенберг, В. Я. Цветков // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 12. – С. 12–14. – URL: <https://asi-journal-rzd.ru/application-of-ontologies-in-transport-management> (дата обращения: 30.04.2025). – DOI: 10.62994/AT.2024.12.12.002.

73. Курдюков Н. С. Транспортные онтологии [Электронный ресурс] / Н. С. Курдюков, С. А. Кудж // Мир транспорта. – 2024. – Т. 22, № 3 (112). – URL: <https://scinetwork.ru/articles/34119> (дата обращения: 30.04.2025).

74. Душкин Р. В. Интеллектуальные транспортные системы/ Р. В. Душкин. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 406 с. – ISBN 978-5-97060-835-9.

75. Лапшин В. А. Онтологии в компьютерных системах/ В. А. Лапшин. – М.: Научный мир, 2020. – 228 с. – ISBN 978-5-91522-473-7.

76. Yang W.-D. The Fusion Model of Intelligent Transportation Systems Based on the Urban Traffic Ontology / W.-D. Yang, T. Wang // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 25. – P. 917–923. – DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.178.

77. Avcı İ. Intelligent Transportation System Technologies, Challenges and Security/ İ. Avcı, M. Koca // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, Iss. 11. – URL:

<https://doi.org/10.3390/app14114646> (дата обращения: 30.04.2025).

78. Mfenjou M. L. Detection of Disturbances in a Monitoring System on ITS and Usage of Ontologies Approaches: A Critical Review and Challenges in Developing Countries/ M. L. Mfenjou, M. N. Justin, G. G. Kaladzavi // *Procedia Computer Science*. – 2023. – Vol. 224. – P. 250–257. – DOI: 10.1016/j.procs.2023.09.034.

79. Mfenjou M. L. Methodology and trends for an intelligent transport system in developing countries/ M. L. Mfenjou, A. Ari, W. Abdou F. Spies, Kolyang // *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. – 2018. – Vol. 19. – P. 96–111. – DOI: 10.1016/j.suscom.2018.08.002.

80. Sobral T. An Ontology-based approach to Knowledge-assisted Integration and Visualization of Urban Mobility Data/ T. Sobral, T. Galvão, J. Borges // *Expert Systems with Applications*. – 2020. – Vol. 150. – DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113260.

81. Fernández S. Ontology-Based Architecture for Intelligent Transportation Systems Using a Traffic Sensor Network/ S. Fernández, R. Hadfi, T. Ito, I. Marsa-Maestre, J. R. Velasco // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16, No. 8. – P. 1287. – URL: <https://doi.org/10.3390/s16081287> (дата обращения: 30.04.2025).

82. Zhang R. A comprehensive review of semantic web technologies supported life cycle management for road infrastructures/ R. Zhang, J. Wang, H. Li, X. Mao // *Alexandria Engineering Journal*. – 2025. – Vol. 128. – P. 796–815. – DOI: 10.1016/j.aej.2025.01.062.

83. Knowledge graph based trajectory outlier detection in sustainable smart cities// *Sustainable Cities and Society*. – 2021. – Vol. 73. – DOI: 10.1016/j.scs.2021.103580.

84. Маслов В. А. Обработка семантических запросов в среде Protégé на примере построения онтологии дорожных знаков/ В. А. Маслов, С. М. Соколов // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. – 2018. – № 260. – 15 с. – URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-260> (дата обращения: 30.04.2025). – DOI: 10.20948/prepr-2018-260.

85. Лаврищева, Е. М. Семантические ресурсы для разработки онтологии научной и инженерной предметных областей/ Е. М. Лаврищева, Л. Е. Карпов, А. Н.

Томилин // Труды XVIII Всероссийской научной конференции (г. Новороссийск, 19-24 сент. 2016 г.). – М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. – С. 223–239. – DOI: 10.20948/abrau-2016-16.

86. Анализ языка Веб онтологии (owl) и семантическая веб-технология// CyberLeninka: науч. электрон. б-ка. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-yazyka-veb-ontologii-owl-i-semanticheskaya-veb-tehnologiya> (дата обращения: 30.04.2025).

87. Ефимов А. А. Интеллектуальные транспортные системы: перспективы, эффективность и проблемы/ А. А. Ефимов, К. С. Медведева // CyberLeninka– 2025. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnye-transportnye-sistemy-perspektivy-effektivnost-i-problemy> (дата обращения: 30.04.2025). – DOI: 10.12731/2227-930X-2025-15-1-349.

88. Кузнецов С. А. Организационно-технические аспекты внедрения интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях/ С. А. Кузнецов, В. А. Николаев // Журнал «Системный администратор». – 2025. – Т. 31, № 6. – С. 728–737. – URL: <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-6-728-737> (дата обращения: 30.04.2025).

89. Зарипов Е. А. Моделирование и оптимизация характеристик интеллектуальной транспортной системы «умного города» с использованием гибридных эволюционных алгоритмов/ Е. А. Зарипов, А. С. Акопов // Искусственные общества. – 2025. – Т. 20, № 1. – С. 34–49. – DOI: 10.17323/2587-814X.2025.1.34.49.

90. Проказин Д. Л. Интеллектуальные транспортные системы (ITS): исследование возможностей применения ITS для управления потоками, мониторинга дорожной ситуации и повышения безопасности дорожного движения/ Д. Л. Проказин // Безопасность дорожного движения. – 2025. – № 2. – С. 6–10. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnye-transportnye-sistemy-its-issledovanie-vozmozhnostey-primeneniya-its-dlya-upravleniya-potokami-monitoringa-dorozhnoy/viewer> (дата обращения: 30.04.2025).

91. Федюкин Ю. В. Построение и применение модели эффективности

интеллектуальной транспортной системы/ Ю. В. Федюкин, Е. И. Минаков, И. Е. Агуреев, Н. И. Хазов, В. М. Чайковский // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 4. – С. 77–87. – URL: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2023-4-7> (дата обращения: 30.04.2025).

92. Голоскоков К. П. Проблема обнаружения и исправления ошибок в интеллектуальных транспортных системах/ К. П. Голоскоков, А. А. Астапкович // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сб. науч. тр. – 2023. – № 8. – С. 347–348. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-347-348.

93. Хусаинов Р. М. Интеллектуальная система анализа транспортных потоков в автоматизированных системах управления дорожным движением / Р. М. Хусаинов, Н. Г. Талипов, А. С. Катасёв, Д. В. Шалаева // Программные продукты и системы. – 2024. – Т. 37, № 1. – С. 69–76. – URL: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.142.069-076> (дата обращения: 30.04.2025).

94. Стрижко М. А. Система интеллектуального управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием/ М. А. Стрижко, В. В. Червинский // Наука и образование: проблемы, идеи, инновации: сб. ст. по материалам XXVI Всерос. науч.-практ. конф. – 2024. – Ч. 2. – С. 8–12. – DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.2.008.

95. Алексахин А. Н. Цифровая трансформация как инновационная тенденция транспортной отрасли [Электронный ресурс] / А. Н. Алексахин, П. Н. Машегов, Е. Н. Нохтуева // CyberLeninka: науч. электрон. б-ка. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-kak-innovatsionnaya-tendentsiya-transportnoy-otrasli> (дата обращения: 30.04.2025).

96. ГОСТ Р 57144-2016. Интеллектуальные транспортные системы. Кооперативные системы. Общие технические требования. – Введ. 2017–07–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.

97. Fernández S. Ontology-Based Architecture for Intelligent Transportation Systems Using a Traffic Sensor Network/ S. Fernández, R. Hadfi, T. Ito, I. Marsa-Maestre, J. R. Velasco // Sensors. – 2016. – Vol. 16, No. 8. – Art. 1287. – DOI: 10.3390/s16081287.

98. Sobral T. An Ontology-based approach to Knowledge-assisted Integration and Visualization of Urban Mobility Data/ T. Sobral, T. Galvão, J. Borges // Expert Systems with Applications. – 2020. – Vol. 150. – Art. 113260. – DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113260.

99. ГОСТ Р 52398–2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. – Введ. 2006–01–01. – М. : Стандартинформ, 2005. – 12 с.

100. ГОСТ Р 52766–2007. Дороги автомобильные общего пользования. Элементы обустройства. Общие требования. – Введ. 2008–07–01. – М. : Стандартинформ, 2007. – 29 с.

101. ГОСТ Р 33466–2015 (ИСО 18320-2015). Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС). Система экстренного реагирования при авариях. Методы испытаний устройства (системы) вызова экстренных оперативных служб (ЭОС): утв. и введен Приказом Росстандарта от 30.11.2015 № 1986-ст // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200137557> (дата обращения: 15.05.2023).

102. Дороги автомобильные общего пользования. Методы измерения скорости движения транспортных средств: утв. и введен Приказом Росстандарта от 23.10.2015 № 1581-ст // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200143000> (дата обращения: 23.05.2024).

103. ГОСТ Р 57144-2016. Средства организации дорожного движения. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения: утв. и введен Приказом Росстандарта от 23.11.2016 № 1741-ст // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140208> (дата обращения: 23.05.2024).

104. Katsumi, M. Transportation System Ontology [Электронный ресурс] / M. Katsumi // GitHub Pages. – 2021. – URL: <https://enterpriseintegrationlab.github.io/icity/TransportationSystem/doc/index-en.html> (дата обращения: 30.04.2025).

105. Urbieto, I. Design and Implementation of an Ontology for Semantic Labeling and Testing: Automotive Global Ontology (AGO)/ I. Urbieto, M. Nieto, M. García, O.

Otaegui // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, Iss. 17. – Art. 7782. – URL: <https://doi.org/10.3390/app11177782> (дата обращения: 30.04.2025).

106. Dorofeev A. Development of transportation management system with the use of ontological and architectural approaches to ensure trucking reliability/ A. Dorofeev, N. Altukhova, N. Filippova, T. Pashkova, M. Ponomarev // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, Iss. 20. – Art. 8504. – URL: <https://doi.org/10.3390/su12208504> (дата обращения: 30.04.2025).

107. Lorenz B. Ontology of Transportation Networks / B. Lorenz, H. Ohlbach, L. Yang. – 2005. – (REWERSE Project Publications). – URL: <https://www.macs.hw.ac.uk/bisel/reverse/deliverables/m18/a1-d4.pdf> (дата обращения: 30.04.2025).

108. Corsar D. The Transport Disruption Ontology/ D. Corsar, M. Markovic, P. Edwards, J. D. Nelson // The Semantic Web - ISWC 2015 : proceedings of the International Semantic Web Conference (Bethlehem, PA, USA, October 11-15, 2015). – Cham : Springer, 2015. – P. 329-336. – (Lecture Notes in Computer Science; Vol. 9367). – DOI: 10.1007/978-3-319-25010-6_22.

109. Suárez-Figueroa M. C. Ontology Engineering in a Networked World/ M. C. Suárez-Figueroa (Eds.). – Springer, 2012. – DOI: 10.1007/978-3-642-24794-1.

110. Lin K. Relationships are Complicated! An Analysis of Relationships Between Datasets on the Web / K. Lin, T. Alrashed, N. Noy // arXiv. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2408.14636> (дата обращения: 30.04.2025). – DOI: 10.48550/arXiv.2408.14636.

111. Mann, G. Spatial Link Prediction with Spatial and Semantic Embeddings / G. Mann, A. Dsouza, R. Yu, E. Demidova // The Semantic Web – ISWC 2023 : proceedings of the International Semantic Web Conference (Athens, Greece, November 6–10, 2023). – Cham : Springer, 2023. – P. 148–165. – (Lecture Notes in Computer Science; Vol. 14266). – DOI: 10.1007/978-3-031-47240-4_10.

112. Сырцова Е. А. Эффекты внедрения интеллектуальных транспортных систем в регионах России/ Е. А. Сырцова // CyberLeninka : науч. электрон. б-ка. – 2023. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effekty-vnedreniya-intellektualnyh->

transportnyh-sistem-v-regionah-rossii (дата обращения: 14.12.2025).

113. Сафиуллин Р. Н. Результаты исследований по внедрению интеллектуальных технологий ICV в транспортную систему городской агломераций/ Р. Н. Сафиуллин, Хаотянь Тянь, Р. Р. Сафиуллин // Транспорт: наука, техника, управление. – 2023. – № 2 (64). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-issledovaniy-po-vnedreniyu-intellektualnyh-tehnologiy-icv-v-transportnuyu-sistemu-gorodskoy-aglomeratsiy> (дата обращения: 14.12.2025).

114. Сафиуллин Р. Р. Научные основы повышения эффективности внедрения интегрированных интеллектуальных технологий в транспортно-технологический процесс доставки грузов/ Р. Р. Сафиуллин, Л. А. Симонова // Горная промышленность. – 2025. – № S1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnye-osnovy-povysheniya-effektivnosti-vnedreniya-integrirovannyh-intellektualnyh-tehnologiy-v-transportno-tehnologicheskiiy> (дата обращения: 14.12.2025).

115. ГОСТ Р ИСО 14813-1-2011. Интеллектуальные транспортные системы. Эталонная архитектура и таксономия услуг. Часть 1. Эталонная архитектура ITS: утв. и введен Приказом Росстандарта от 29.11.2011 № 609-ст // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200086739> (дата обращения: 23.05.2024).

116. Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации: приказ ФСТЭК России от 25 дек. 2017 г. № 239 // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2018. – 16 янв. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201801160039> (дата обращения: 23.05.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Акты внедрения

Директор филиала
Федерального бюджетного учреждения
«Агентство автомобильного транспорта»
в Южном Федеральном округе
_____/Высоцкий И.Ю./

АКТ (СПРАВКА)
о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертации
Пилипец Олег Олегович
2.9.8. «Интеллектуальные транспортные системы»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертации Пилипец Олега Олеговича на тему «Применение онтологии при разработке интеллектуальной транспортной системы», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в рамках деятельности филиала Федерального бюджетного учреждения «Агентство автомобильного транспорта» в Южном Федеральном округе.

Практическое внедрение результатов исследования основано на требованиях, изложенных в: Федеральном законе "Об организации регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 13.07.2015 N 220-ФЗ, а также Федеральном законе от 20.03.2025 №33-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в единой системе публичной власти» и заключается в:

- фактическом применении полученных технических решений на автомобильном транспорте (подвижном составе), в частности, разработана система оценки потребности населения в мобильности, в отдельном транспортном районе на основе онтологической модели, содержащей основные параметры, а также комплекс логических правил.

- создании концепции оценки необходимого количества подвижного состава на отдельном маршруте при помощи логических правил SWRL, реализованных на основе массива данных, содержащихся в онтологической модели данных маршрута следования, что позволяет оптимизировать выпуск пассажирских транспортных средств на маршрут следования, а также избежать возникновения проблем с мобильностью у населения, проживающего в зоне охвата.



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО НАДЗОРУ В СФЕРЕ ТРАНСПОРТА

(РОСТРАНСНАДЗОР)

**МЕЖРЕГИОНАЛЬНОЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО НАДЗОРУ В СФЕРЕ ТРАНСПОРТА
ПО ЮЖНОМУ ФЕДЕРАЛЬНОМУ ОКРУГУ
(МТУ РОСТРАНСНАДЗОРА ПО ЮФО)**

Заместитель начальника

МТУ Ространснадзора по ЮФО



АКТ

о использовании результатов кандидатской диссертации

Пилипец Олега Олеговича

2.9.8. «Интеллектуальные транспортные системы»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертации на тему «Применение онтологии при разработке интеллектуальной транспортной системы», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в рамках деятельности МТУ Ространснадзора по ЮФО (г. Ростов-на-Дону).

Предметом внедрения является апробирование разработанной автором комплексной методики построения архитектуры интеллектуальной транспортной системы, а также отдельных подсистем на основе принципов семантических сетей, в частности, онтологической модели информационно-управляющей системы, отличающаяся тем, что включает в себя: формализованное описание объектов дорожной инфраструктуры, технических средств организации дорожного движения, светофорных объектов, позволяющее осуществить рациональное управление дорожной обстановкой, а также отдельными дорожными объектами исходя из условий и специфики применения на дороге общего пользования, с учетом экспериментально установленных обобщенных критериев кластерной оценки функционирования ИТС: степени идентификации; методика оценки эффективности функционирования системы, позволяет оценить эффективность функционирования альтернативных вариантов систем управления контролем движения на дороге и рационального их выбора.

Разработанные методики и рекомендация по аппаратно-техническому, методическому, информационному и программному обеспечению, с учетом фактических ограничений их использования в конкретных условиях на автомобильной дороге общего пользования, при их внедрении время выполнения семантического запроса к ИТС снизилось с 20 минут, до 2-5 секунд, процент использования данных системой увеличился с 40% до 85%.

Продолжение приложения А

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
международной деятельности

А.Н. Бескопыльный

_____ 2025 г.

**СПРАВКА**

О внедрении (использовании) результатов
диссертационной работы Пилипца Олега Олеговича на соискание
ученой степени кандидата технических наук
на тему: **«Применение онтологии при разработке интеллектуальной
транспортной системы»**
в учебном процессе.

Результаты диссертационной работы Пилипца Олега Олеговича на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Применение онтологии при разработке интеллектуальной транспортной системы» внедрены в учебный процесс, осуществляемый на кафедре «Организация перевозок и дорожного движения» ФГБОУ ВО «Донского государственного технического университета» в рамках следующих дисциплин: «Автоматизированные системы управления дорожным хозяйством», а также «Архитектура интеллектуальных транспортных систем» для обучающихся по направлению 23.03.01 «Технология транспортных процессов», профили «Интеллектуальные транспортные системы», «Организация перевозок на автомобильном транспорте».

Предложенный автором подход в применении онтологии при разработке интеллектуальной транспортной системы и основные научные положения диссертационного исследования нашли отражение в содержании лекций и практических занятий для студентов бакалавриата кафедры «Организация перевозок и дорожного движения» Донского государственного технического университета.

Декан факультета
«Дорожно-транспортный»
к.т.н., доцент

И.В. Топилин



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы аспиранта
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
О.О. Пилипца на тему: «Применение онтологии при разработке
интеллектуальной транспортной системы»

Результаты диссертационной работы Пилипца Олега Олеговича на тему «Применение онтологии при разработке интеллектуальной транспортной системы» на соискание ученой степени кандидата технических наук использованы Министерством транспорта Ростовской области при создании Интеллектуальной транспортной системы Ростовской агломерации в части разработки следующих мероприятий:

- разработка архитектуры интеллектуальной транспортной системы Ростовской агломерации с выбором подсистем ИТС на основе принципов онтологии, описанием иерархии и потоков данных;
- применение кластерной оценки интеллектуальной транспортной системы по совокупности критериев, включающих онтологическую полноту, семантическую согласованность, архитектурную интеграцию, масштабируемость, надежность;
- алгоритм адаптивного управления светофорным объектом на основе онтологического моделирования, обеспечивающий снижение задержки до 24%.

Заместитель министра транспорта
Ростовской области



Х.Ю. Ермашов