

На правах рукописи



ПИЛИПЕЦ ОЛЕГ ОЛЕГОВИЧ

**ПРИМЕНЕНИЕ ОНТОЛОГИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность: 2.9.8 - Интеллектуальные транспортные системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО ДГТУ).

Научный руководитель - **Зырянов Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Организация перевозок и дорожного движения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Кущенко Лилия Евгеньевна**, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова), доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта»

Семкин Александр Николаевич, кандидат технических наук, Генеральный директор Группы компаний «Навигатор»

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Защита состоится «24» апреля 2026 года в 14.00 на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.138.02 на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орел, пл. Каменская, д. 1.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.gisnauka.ru/>).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, в двух экземплярах направлять в диссертационный совет 99.2.138.02 по адресу: 302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 77, тел. +79208120727, e-mail: maxim.ka@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Кулев М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 и 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, необходимости 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.

Целью исследования работы: совершенствование методов создания интеллектуальных транспортных систем посредством применения онтологического моделирования и принципов построения семантических сетей.

Задачи исследования:

- 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;

- 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;

- Структурировать совокупность знаний (базу знаний), включающую в себя понятийный аппарат ИТС, а также задающей взаимосвязи и соподчиненности между ними (единой структуры разработки);

- Разработать логико-математическую модель, которая позволит упростить интеграцию различных компонентов ИТС и ускорит развитие единого подхода к проектировке и разработке ИТС, а также произвести экспериментальную оценку практической эффективности модели.

- 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: Пункт 1: Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач управления транспортными системами, процессами и транспортными средствами. Пункт 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 страницы текста, 5 таблиц, 28 рисунков, литературный список включает 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи работы, раскрыта научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Обзор направлений научных исследований, а также этапов развития ИТС» выполнен анализ основных направлений исследований в части развития архитектуры ИТС. Выстроена историческая хронология возникновения ИТС, а также эволюция методов и подходов развития ИТС в различных странах. Особое внимание уделено особенностям методического и программного обеспечения разработки архитектуры ИТС как инструмента планирования и сопровождения на протяжении всего жизненного цикла ИТС.

Выявлены основные различия развития ИТС в России и других странах: реализация специализированных пилотных проектов различными командами для отработки методов, приложений, технологий перед их масштабной реализацией. В частности, в ЕС с 2010 года реализовано 66 пилотных проектов, на общую сумму примерно 700 миллионов евро; создание полноценной архитектуры ИТС до начала

массового внедрения ИТС. При этом архитектура ИТС реализуется не только в стандартах, а главным образом в базах данных и программах по их использованию при разработке архитектуры ИТС. Фактически это является вариантами онтологий.

Таким образом инструменты семантического программирования, а также онтологического моделирования являются наиболее перспективными для интеграции с существующими процессами разработки и эксплуатации интеллектуальных транспортных систем, исходя из следующих особенностей: - онтологическая модель является местом хранения данных, с возможностью создания иерархии (таксономии); онтологическая модель интегрируется с системами логического вывода, в этом случае является системой принятия решений и (или) системой поддержки принятия решения; онтологическая модель обладает достаточным ресурсом возможностей для полного описания всей сферы ИТС в виде базы знаний.

Таким образом, сфера интеллектуальных транспортных систем в Российской Федерации, в процессе технологического развития пришла к тому, что возникла конкретная потребность в систематизации, интеграции иерархичности в разработке и применении ИТС. Кроме того, обширность и большое количество подходов к созданию ИТС, в том числе, разработке архитектуры порождают противоречия между методическими требованиями при создании ИТС и практикой внедрения ИТС, которые усиливаются отсутствием единых метрик, позволяющих производить объективную оценку эффективности функционирования интеллектуальной транспортной системы.

Во второй главе «Основные методики разработки ИТС с применением инструментов онтологического моделирования» рассмотрены основные методы и подходы к онтологическому моделированию, в том числе, для разработки базы знаний с целью применения в разработке архитектуры ИТС. 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 (S1), 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).

Сформировано следующее выражение для онтологической модели интеллектуальной транспортной системы:

$$ITS_{OM} = \{(SubS_{ITS} \vee S_{SubS} \vee P_S)Lim_{ITS}DT_{ITS}\}, \quad (1)$$

где $SubS_{ITS}$ - подсистема ИТС как начальная условная единица ОМ ИТС, S_{SubS} - компонент, относящийся к конкретной подсистеме ИТС как начальная условная единица ИТС, P_S - периферийное оборудование конкретной системы ИТС как начальная условная единица ОМ ИТС; LIM_{ITS} - предел допустимых значений, описание конкретной подсистемы (системы, периферийного оборудования); DT_{ITS} - способ передачи, а также форма представления передаваемых данных и направление их передачи. Применительно к онтологической модели интеллектуальной транспортной системы, данное описание необходимо дополнить с учетом наличия механизмов управления и условий возникновения сценариев функционирования системы.

$$ITS_{OM} = \{(SubS_{ITS} \vee S_{SubS} \vee P_S)Lim_{ITS}DT_{ITS}LR_{ITS}\}, \quad (2)$$

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

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. Авторский алгоритм автоматизации разработки интеллектуальной транспортной системы, посредством онтологической модели, состоит из 5 основных фаз и 19 конкретных пунктов, которые определяют последовательность разработки, изображен на рисунке 1.

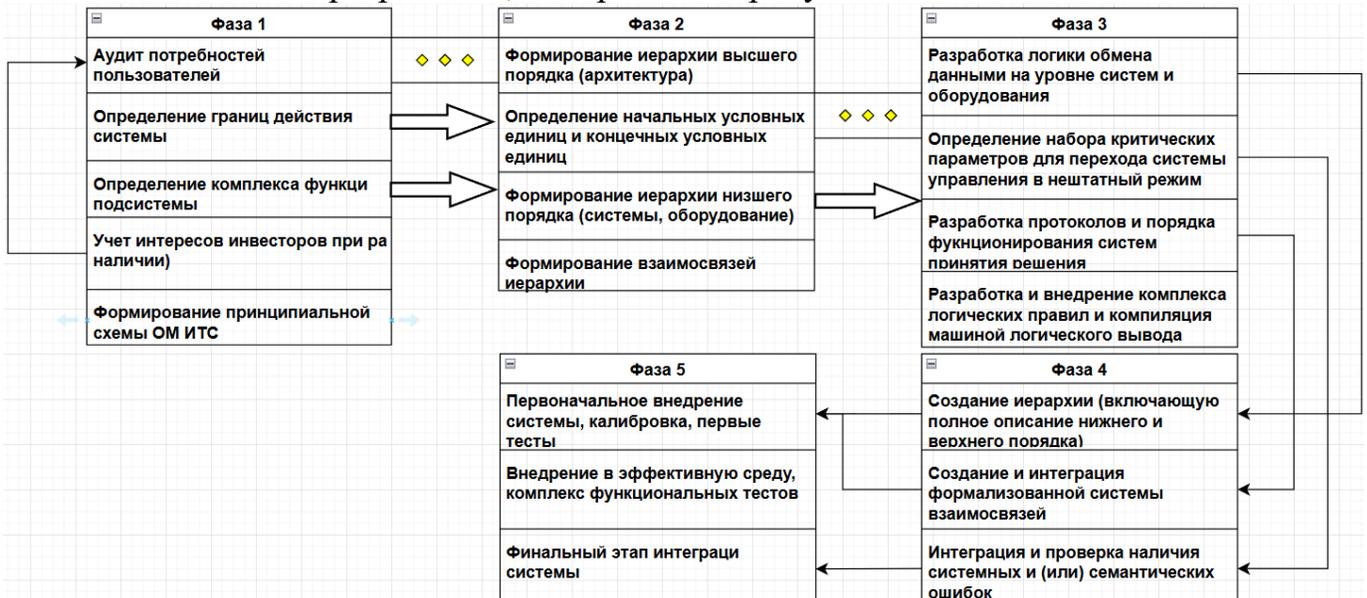


Рисунок 1 – Алгоритм разработки онтологической модели ИТС

С точки зрения процесса автоматизации разработки ИТС – ОМ ИТС обладает более широкими возможностями с точки зрения автоматизации процессов разработки и планирования интеллектуальных транспортных систем, так как позволяет упорядочить в иерархию составные части системы.

Семантическая модель авторской интеллектуальной транспортной системы структурирована в следующем виде: Прикладная инфраструктура ИТС, ИТС Мониторинга, Коммуникационная инфраструктура ИТС, Архитектура кооперативной ИТС и ВАТС, а также Приложения ИТС, изображена на рисунке 2.

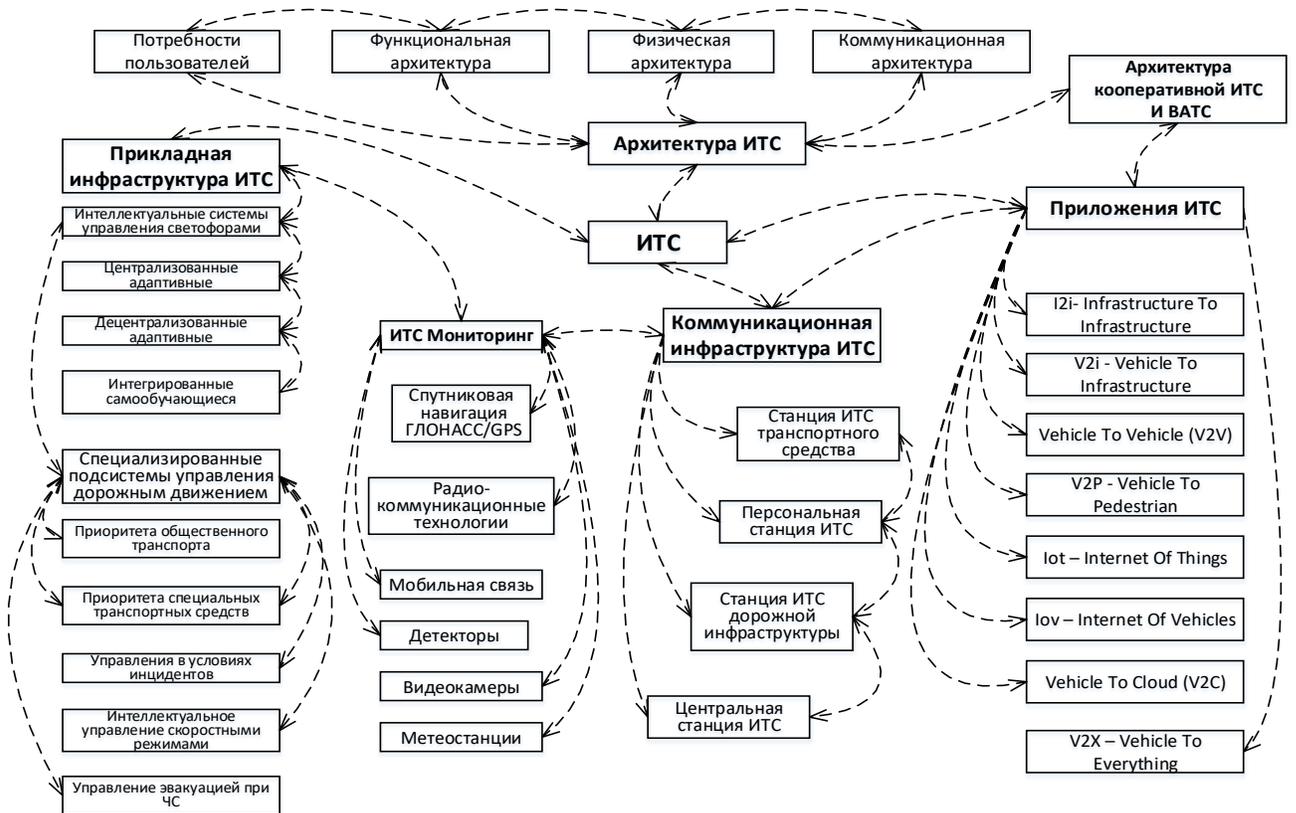


Рисунок 2 – Онтологическая модель ИТС

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).

Кроме того, нами были сформированы принципы построения онтологической модели интеллектуальной транспортной системы, а именно: - 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. - Принцип минимальных онтологических обязательств. Онтология должна быть сформирована таким образом, чтобы в процессе работы машина логического вывода 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. - 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. - Принцип 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». - Принцип диверсификации. Онтология должна иметь модульную структуру, с точки зрения эффективности одна монолитная, сложная онтология хуже, чем несколько связанных между собой. - 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.

В третьей главе «Применение инструментов разработки онтологии информационной системы при создании авторской интеллектуальной транспортной системы» рассмотрены вопросы применения инструментов онтологии информационных систем в части разработки авторской архитектуры интеллектуальной транспортной системы. Предлагаемый подход к разработке архитектуры данных онтологической модели состоит в структуре: первый уровень - онтология, включающая полное описание авторской архитектуры интеллектуально транспортной системы (полный набор необходимых подсистем, описание функциональной части и физической части системы, включая полный набор взаимосвязей). На втором уровне находится логическая машина, которая 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.

При разработке онтологической модели необходимо учитывать тот комплекс моделей, которые существуют в области знаний, связанных с интеллектуальной транспортной системой. Структура моделей выглядит следующим образом: - модели теории транспортных потоков, используемые на оперативном уровне при управлении дорожным движением, прогнозировании изменения условий движения; - модели тактического уровня для задач ситуационного управления; - модели стратегического уровня для разработки планов создания и развития ИТС. На рисунке 3 представлена онтология моделей теории транспортных потоков, применяемых при решении оперативных задач ИТС.

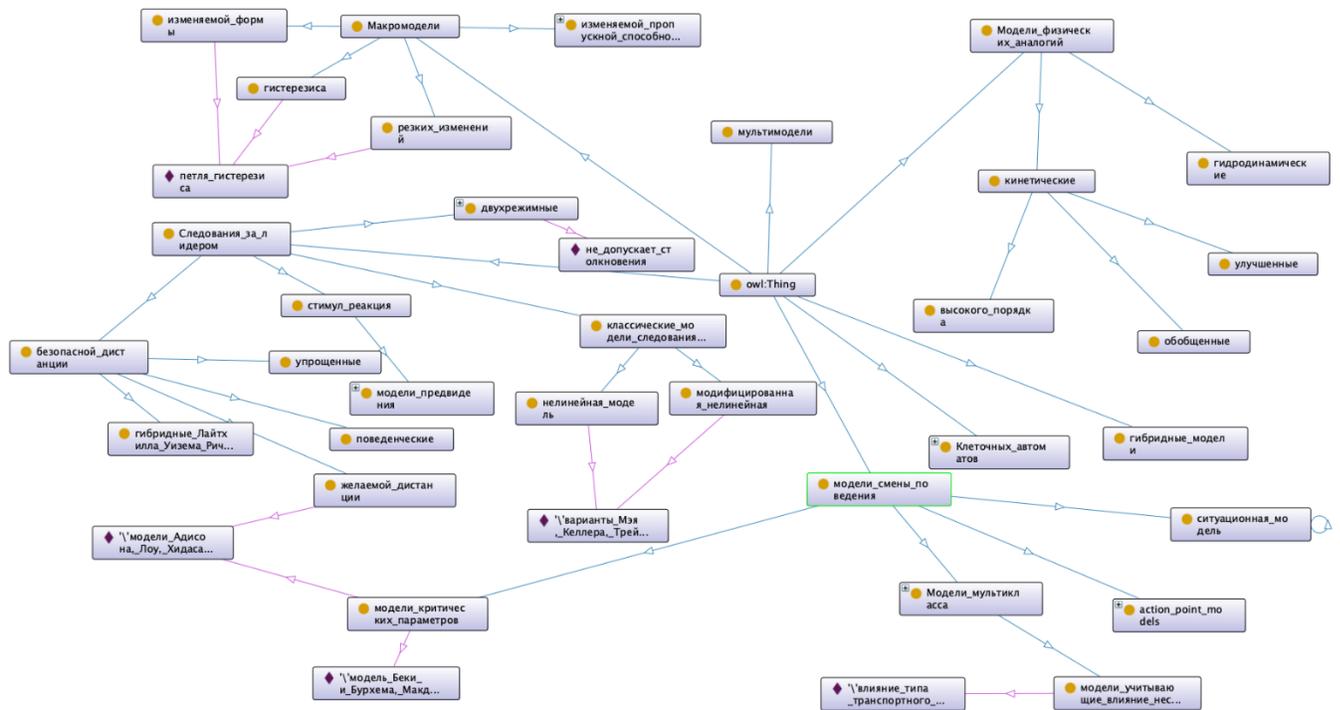


Рисунок 3 – Онтология моделей, применяемых в ИТС

Важно 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 4 приведен вид иерархической структуры первых классов системы, посредством модуля «Ontograf» редактора Protege.

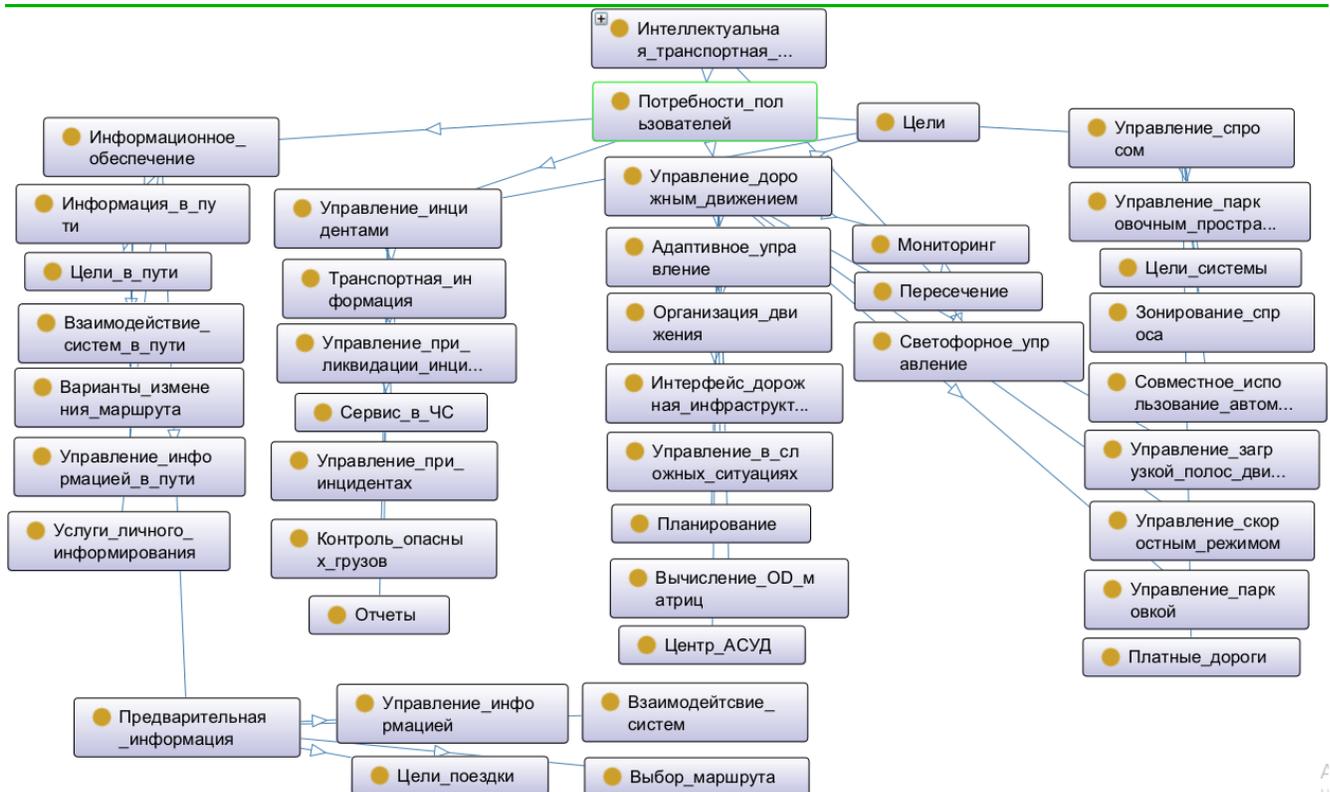


Рисунок 4 – Описание потребностей пользователей ИТС

При указании всех задействованных сущностей и необходимых SWRL-правил ИТС будет в состоянии управляться автономно на основе получаемых данных. Основные особенности и отличия модели заключаются в следующем: 1- формализации дорожной ситуации; 2- реализации динамического управления системой; 3- повсеместное применение процедурных правил.

Правилом предусмотрено добавление времени в работу «Зеленой фазы» светофора на экипажное время при детектировании транспортного средства в зоне перекрестка, при учете параметров длительности зеленой фазы. Правило: $swrlb:add(?newDur, ?curr, 10) \wedge \text{untitled-ontology-31:Детектирован}(?tl, ?det) \wedge \text{untitled-ontology-31:Максимальная_длительность_фазы}(?phase, ?max) \wedge \text{untitled-ontology-31:Светофор_1}(?tl) \wedge \text{untitled-ontology-31:текущая_длительность}(?phase, ?curr) \wedge \text{untitled-ontology-31:Текущая_фаза_светофора}(?tl, ?phase) \wedge \text{untitled-ontology-31:Увеличение_фазы}(?det, ?phase) \wedge \text{untitled-ontology-31:Базовая_длительность_фазы}(?phase, ?base) \wedge swrlb:lessThan(?curr, ?max) \rightarrow \text{untitled-ontology-31:текущая_длительность}(?phase, ?newDur)$

В четвертой главе «Оценка практической значимости разработки базы знаний при создании интеллектуальной транспортной системы» рассмотрены вопросы оценки эффективности внедрения в ИТС методов и инструментов создания онтологии информационных систем. Предлагаемая кластерная методика оценки, на основе онтологической базы знаний приведена на Рисунке 5.

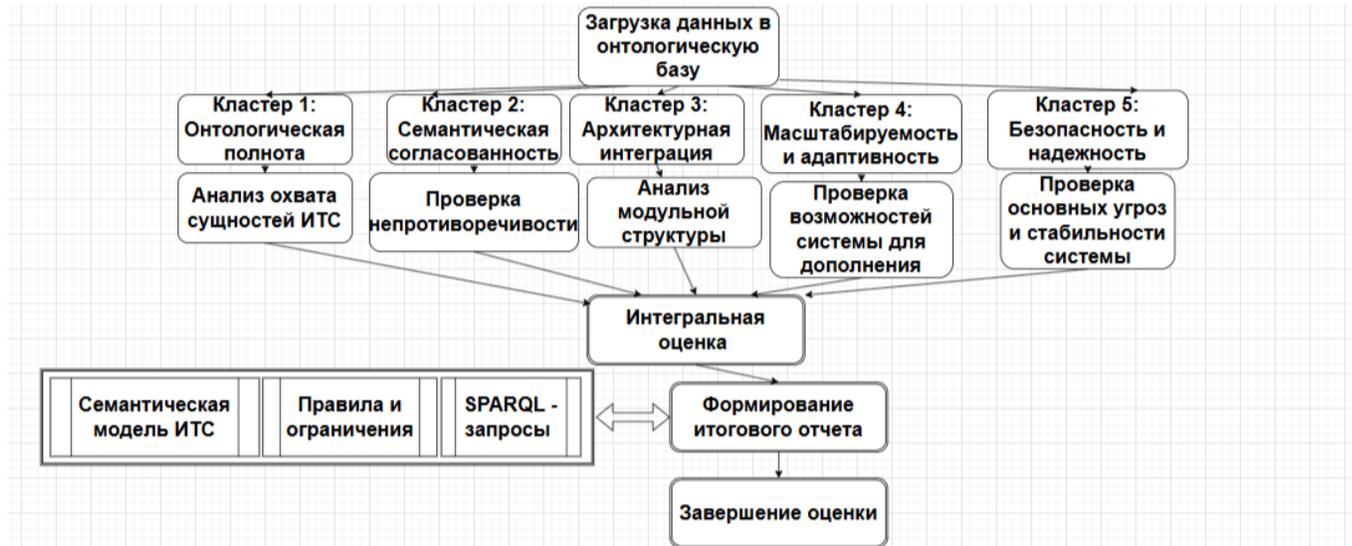


Рисунок 5 – Схема кластерной оценки ОМ ИТС

Функциональное 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).

Кластер 1: Онтологическая полнота

1. Коэффициент покрытия сущностей:

$$K_1 = \frac{N_{\text{Описанные}}}{N_{\text{Общее}}}, \quad (3)$$

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:

$$K_2 = \frac{L_{\text{реальное}}}{L_{\text{теоретическое}}}, \quad (4)$$

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).

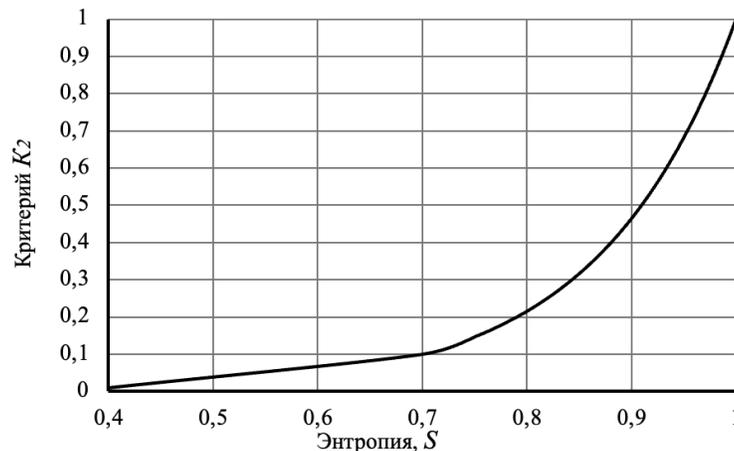


Рисунок 7 – График значений K_2

Кластер 2: Семантическая согласованность. 1. Конфликты типов:

$$K_3 = \frac{C_{\text{конфликты}}}{N_{\text{общее}}}, \quad (5)$$

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%.

2. Индекс логической целостности запроса:

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

$$K_4 = \frac{T_{\text{ЛВ}}}{T_{\text{полное}}}, \quad (6)$$

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

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.

3. Семантические конфликты:

Противоположные или логически несовместимые утверждения.

$$K_5 = \frac{N_{\text{Семантик}}}{N_{\text{правил}}}, \quad (7)$$

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

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. 1. Коэффициент интероперабельности:

Рассчитывается доля успешных попыток взаимодействия (без ошибок конвертации/потерь данных) от общего числа попыток за определенный период.

$$K_6 = \frac{S_{\text{успешные}}}{S_{\text{Все}}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{успешные}}$ – количество успешных интеграций с внешними системами (API, IoT), $S_{\text{Все}}$ – общее число попыток. 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 не только быстродействие системы, но и точность ее действий, а также, в определенной степени, точность действий и отсутствие ошибок.

$$K_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i^{\text{БЗ}} - t_i^{\text{СОЗД}}), \quad (9)$$

где N – количество успешно синхронизированных сообщений/пакетов данных за выбранный промежуток времени. $t_i^{\text{СОЗД}}$ – точка времени создания данных на периферийном устройстве, $t_i^{\text{БЗ}}$ – точка времени обработки этих же данных базой знаний, измеряется в миллисекундах. Диапазон разницы между $t_i^{\text{БЗ}}$ и $t_i^{\text{СОЗД}}$, определен пределом от 5 до 15% общего времени обработки запроса онтологии. Исходя из эксперимента с индексом логической целостности запроса K_4 , предел задан следующим образом $10,3 < (t_i^{\text{БЗ}} - t_i^{\text{СОЗД}}) < 74,85$. Количество успешно синхронизированных сообщений/пакетов данных, обработанных за выбранный промежуток времени (секунда) – $2,004 < N < 4,854$. Вместе с тем, если за 1 секунду будет передаваться 1 сообщение, то N не имеет никакого влияния на K_7 , если $N=0$, 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. 1. Степень стандартизации интерфейсов:

$$K_8 = \frac{N_{\text{стандарт}} + T_{\text{стандарт}}}{N_{\text{общее}} + T_{\text{общее}}}, \quad (10)$$

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. 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;

2. Ресурсоёмкость масштабирования:

$$K_9 = \max\left(\frac{\Delta CPU}{CPU_{\text{база}}}, \frac{\Delta RAM}{RAM_{\text{база}}}, \frac{\Delta Storage}{Storage_{\text{база}}}\right), \quad (11)$$

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; - 0,15 – 0,25, считается умеренным показателем, возможна необходимость в точечных улучшениях; - 0,24 – 0,4, подразумевает высокие затраты на масштабирование системы, требуется реструктуризация системы; - 0,4 и более, ресурсы, необходимые для масштабирования кратно превосходят итоговый результат.

Кластер 5: Надежность. 1. Индекс уязвимостей:

Представляет собой долю сущностей/связей онтологии, имеющих потенциальные уязвимости.

$$K_{10} = \left(\frac{N_{\text{уязвимые сущности}}}{N} + \frac{L_{\text{уязвимые связи}}}{L} \right), \quad (12)$$

где $N_{\text{уязвимые сущности}}$ - количество уязвимых сущностей, $L_{\text{уязвимые связи}}$ - количество уязвимых связей, N – общее количество сущностей, L – общее количество связей, 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 (п.14).

$$K_{11} = \frac{C_{\text{мониторинг}}}{C_{\text{критично}}}, \quad (13)$$

где $C_{\text{мониторинг}}$ – количество критических компонентов, которые подключены к системе мониторинга и управления событиями информационной безопасности. $C_{\text{критично}}$ – 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:

$$K_{12} = \sum \frac{T_{\text{восстановления}}}{I}, \quad (14)$$

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

$$K_{13} = w_1 * (1 - K_{12}) + w_2 * \left(1 - \frac{K_{12}}{K_{12max}}\right), \quad (15)$$

где $w_1 + w_2 = 1$, а 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 нормализации: Кластер 1: 7,5; Кластер 2: 7,5; Кластер 3: 5; Кластер 4: 5; Кластер 5: 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:

$$K_{14(\text{ИОА})} = \frac{7,5*(K_1+K_2)+7,5*(K_3+K_4+K_5)+5*(K_6+K_7)+5*(K_8+K_9)+10*(K_{10}+K_{11}+K_{13})}{87,5} \quad (16)$$

Исходя из нормализации значений всех метрик, диапазон изменения значений $K_{14(\text{ИОА})}$ находится между 0 и 1. диапазоны значений $K_{14(\text{ИОА})}$: - 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций (ВАК):

1. Зырянов В.В., Пилипец О.О. Онтология функций и сервисов интеллектуальной транспортной системы. // Мир транспорта и технологических машин. -2025-№2-4(89). С. 118-126
2. Пилипец О.О. Анализ применения интеллектуальных транспортных систем в современных условиях: этапы реализации и проблемные вопросы // Мир транспорта и технологических машин. -2024-№3-1(86). С. 91-100
3. Пилипец О.О. Перспективы применения онтологического подхода в контексте формирования единой интеллектуальной транспортной системы. // Мир транспорта и технологических машин. -2024-№3-3(86). С.112-120

Публикации в журналах, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus

4. Pilipec O.O. "Features of Ontology Formation of Intelligent Transportation System within Traffic Monitoring" 6th international scientific and practical conference "sustainable development of territories" (sdt-2024), DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0264357> AIP Conf. Proc. 3276, 040008 (2025) URL:<https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/3276/1/040008/3350169/Features-of-ontology-formation-of-intelligent?redirectedFrom=fulltext>
5. Pilipec O.O. The main features of the creation and operation of the service band of the ITS integration platform/ BIO Web of Conferences 113, 04022 (2024) <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411304022> Interagromash 2024 / URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2024/32/bioconf_interagromash2024_04022/bioconf_interagromash2024_04022.html

Публикации в других изданиях:

6. Пилипец, О.О. Структурные особенности развития интеллектуальных транспортных систем в Российской Федерации // Молодой исследователь Дона. 2023. - №2 (41). С.55-61 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/structural-peculiarities-of-intelligent-transport-systems-development-in-the-russian-federation>
7. Пилипец О.О., Особенности применения матриц корреспонденции при мониторинге транспорта в агломерациях в рамках функционирования ИТС // Сборник трудов Международной конференции “Kazan Digital Week” 20-22 сентября 2023 г. С.59-62. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54677541>; (eLIBRARY ID: 54763157);
8. Пилипец О.О. Перспективы применения технологий распознавания изображений при осуществлении контрольно-надзорных мероприятий на транспорте

и в дорожном хозяйстве. Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2023» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. [Электронный ресурс]–М.:МАКСПресс, 2023. ISBN 978-5-317-06952-0

URL:https://lomonosovmsu.ru/archive/Lomonosov_2023/data/28728/161143_uid811296_report.pdf;

9. Пилипец О.О. Роль автоматизированного мониторинга транспорта при осуществлении управления городскими транспортными системами // Сборник научных трудов VII международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: развитие в условиях глобальных изменений потоков», РГУПС. Ростов н/Д, 2023. С.269-273.URL:

https://www.rgups.ru/site/assets/files/38698/vykhodnye_dannye_sbornika_til2023.pdf