

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATICS

УДК 004.82; 621.391

DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.4.48>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ И ПРИДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СВЯЗИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИИ

А. Ю. Гребешков

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Российская Федерация, 443010, Самара, ул. Л. Толстого, 23

E-mail: grebeshkov-ay@psuti.ru

В настоящее время активно внедряются интеллектуальные транспортные системы, поэтому тяжесть последствий их отказов существенно увеличивается. Целью работы является повышение эффективности управления последствиями отказов интеллектуальных транспортных систем на основе онтологического подхода, который применяется для идентификации и классификации источников сообщений об отказах инструментальной подсистемы. Это необходимо для создания единого семантического пространства, позволяющего достаточно точно описать сведения о выходе из строя подсистем интеллектуальных транспортных систем. Методологически создаётся онтологическая модель предметной области отказов подсистем, чтобы впоследствии использовать полученную модель для оценок текущего состояния и прогнозов с помощью методов машинного обучения.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система; управление последствиями отказов; онтологический подход; машинное обучение.

Введение. При управлении интеллектуальными транспортными системами (ИТС) используются процессы целенаправленного информационного воздействия на параметры и характеристики элементов ИТС. Основной целью управления является обеспечение предоставления услуг и реализации функций ИТС с качеством, которое соответствует нормативному или минимально допустимому для данного вида сервисов с учётом типа подвижного средства

пользователя. Значительное влияние на управление ИТС оказывает развитие информационных технологий, средств и систем управления, методы маршрутизации, а также развитие собственно придорожного оборудования и периферии [1]. В рамках системного подхода к управлению ИТС согласно Рекомендации МСЭ-T X.700 выделяют несколько функциональных областей управления (Functional Area Management), причём одной из ключевых областей является

© Гребешков А. Ю., 2020.

Для цитирования: Гребешков А. Ю. Моделирование отказов инструментальной подсистемы и придорожной инфраструктуры связи интеллектуальных транспортных систем на основе онтологии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2020. № 4 (48). С. 48-63. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.4.48>

управление последствиями отказов (Fault Management) [2]. При управлении последствиями отказов в ИТС предполагается, что событие отказа сопровождается формированием сообщения(ий) об отказе. Сообщение формируется встроенными или внешними средствами контроля и мониторинга и далее считается, что отказ, в рамках информационной модели управления, существует как интерпретируемое сообщение об отказе. Информационная модель в единой и согласованной форме представляет важные с точки зрения бизнеса и эксплуатации сущности, их характеристики и отношения. Под сущностью здесь понимается обособленно существующий предмет, физический или виртуальный (нематериальный), который является участником информационного взаимодействия в процессе функционирования ИТС. Для обработки сообщений об отказах, формируемых разнородными (гетерогенными) элементами ИТС, требуется информационная модель управления, которая не зависит от специфики проектов ИТС конкретного производителя.

В разрабатываемой информационной модели, кроме сущностей, требуется определить глоссарий, который создаёт целостное представление о семантических связях между понятиями в рамках обработки сообщений об отказах. С помощью предлагаемого онтологического подхода разрабатывается фрагмент информационной модели управления ИТС, позволяющий семантически описать источники таких сообщений и связи между источниками. Это важно в рамках создания и поддержки единого управления разнородными элементами различных подсистем ИТС при оказании услуг пользователю.

Целью работы является повышение эффективности анализа последствий отказов, прежде всего путём идентификации источников сообщений об отказах и определения необходимости сбора и анализа дополнительных данных от других источников для повышения

достоверности идентификации источника отказа. Также необходимо, чтобы реакция ИТС, в данном случае – в виде сообщения об отказе, была описана в контексте единой семантики при решении задачи управления последствиями отказов с указанием связей между источниками сообщений об отказах, что позволит создать единое семантическое пространство управления ИТС.

Решаемые задачи. Требуется разработать модель для описания знаний об источниках сообщений об отказах, которая позволит:

- описать отдельные сущности в контексте управления последствиями отказов ИТС с учётом их взаимосвязей и сформировать семантическое описание отношений между ними;

- определить точное и объективное описание терминов, определяющих сущности;

- сформировать общий подход к описанию источников сообщений об отказах с учётом смыслового содержания элементов модели и связей между ними.

Если хотя бы одно понятие, с помощью которого описывается предметная область, не определено, то достоверно определить истинность или ложность источника (а также и содержания) полученного сообщения об отказе с точки зрения понятий модели управления не представляется возможным. К примеру, может быть получено сообщение об отказе компонента ИТС, который в рамках модели непосредственно не связан с объектом–источником сообщения. Возможно, здесь возникла помеха на уровне семантики, которая может полностью изменить процесс обработки сообщения об отказе либо речь идёт о нераспознанном отказе. В последнем случае требуется дополнительный мониторинг и техническая диагностика. Вспомогательной задачей является чёткое определение связей между объектами модели и логические правила формирования сообщений об отказах.

Особенности разработки онтологической модели для анализа отказов ИТС. Для решения рассматриваемой задачи целесообразно использовать онтологический подход и разработать онтологическую модель. Далее рассматриваются основные этапы моделирования отказов ИТС на примере инструментальной подсистемы ИТС и используемой этой подсистемой придорожной инфраструктуры связи ИТС.

Онтология – это модель представления знаний предметной области в виде набора понятий этой предметной области и существующих между ними отношений. В рамках онтологии формируются логические и семантические отношения, а общая последовательность процедур разработки онтологии предусматривает последовательность следующих действий [3, 4]:

1) сбор относящихся к предметной области сведений, в данном случае относящихся к описанию источников сообщений об отказе;

2) определение и идентификация базовых понятий данной предметной области;

3) определение семантических отношений и описание взаимодействий базовых понятий;

4) формирование описания атрибутов концептов модели;

5) формирование аксиом и правил логического вывода на основе отношений и взаимосвязей концептов.

При разработке модели концептам и связям присваиваются уникальные имена и определения. Определение концептов и связей может описываться с помощью формального или логического языка, что позволяет использовать логический вывод для получения новых фактов из существующих данных.

Предлагается разрабатывать предметную онтологию (онтологию предметной области), которая создаётся в рамках общего подхода к созданию онтологии, при этом используемые концепты и методический инструментарий в перспективе поз-

волят тиражировать разработанную онтологию для различных информационных систем в рамках гибридного подхода к созданию онтологии [5]. При разработке будут учитываться формализмы языка описания Веб-онтологий OWL (Web Ontology Language), позволяющие описать смысл утверждений и совместимые с дескрипционной логикой.

Примером разработки предметной онтологии в сфере ИТС является описание нарушений дорожного движения, которые оказывают негативное влияние на пассажиропотоки, не затрагивая при этом контекст отказов телекоммуникационной инфраструктуры ИТС [6]. В работе [7] в фокусе разработанной онтологии находится подвижное транспортное средство, а также придорожная инфраструктура и подсистемы ИТС, однако моделирование отказов каждого из этих элементов не производится. В работе [8] предпринимается попытка разработки предметной онтологии для описания структуры и видов взаимосвязей в транспортной сфере, для чего использована систематика транспорта и предложен подход для интеграции разнородных данных на основе семантики, но без учёта надёжности программных и аппаратных средств.

В монографии [9] рассматриваются только стратегии устойчивости ИТС к отказам на основе оперативного выявления неисправностей для архитектуры управления автономными транспортными средствами. Таким образом, в доступных источниках нет обобщённого подхода к управлению ИТС с точки зрения интеграции сведений об отказах из разнородных источников, что необходимо для проактивного или предиктивного управления последствиями отказов объектов физической архитектуры ИТС, включая объекты придорожной инфраструктуры связи ИТС.

В рамках онтологического подхода далее используется теоретико-множественный подход [10] к описанию предметной области для представления знаний об отказах инструментальной подсистемы ИТС и придорожной инфраструктуры свя-

зи с использованием элементов нотации [11] и подхода, использованного в [12, 13].

Анализ взаимосвязи между онтологической моделью и задачами машинного обучения. Совокупное применение онтологического подхода и методов машинного обучения позволит определить неочевидные, на первый взгляд, закономерности в функционировании ИТС и определить признаки проблемного и предотказного поведения [14]. Это предотвратит негативные последствия отказов оборудования ИТС, снизит вероятность сбоев в передаче телеметрии, сократит время технического обслуживания. На системном уровне с учётом результатов анализа, представленного ранее, взаимосвязь онтологической модели, задач машинного обучения и областей сетевого управления, декларируемых МСЭ-Т, и задач управления подсистемой придорожной инфраструктуры связи показаны на рис. 1 [15, 16].

В контролируемом машинном обучении (Machine Learning, ML) или при обу-

чении с учителем (обучение под надзором, контролируемое обучение) (Supervised machine learning) каждый тестовый пример имеет заранее известный оптимум или функцию распределения случайной величины. Идея таким образом состоит в том, чтобы «тренировать» модель машинного обучения на выборках данных с известными параметрами распределения и далее использовать полученную модель для распознавания оптимальных решений на новых образцах (выборках) данных.

Среди моделей обучения с учителем (контролируемого обучения) можно указать модели линейной регрессии, модель статистической логической регрессии (Statistical Logistic Regression), управляемый классификатор (Supervised Classifier), аппроксимация на базе нейронных сетей (Neural Network-based Approximation), вероятностное обучение (Probabilistic Learning), искусственные нейронные сети с многослойными перцептронами (Artificial Neural Networks and Multi-Layer Perceptrons) [17].



Рис. 1. Взаимосвязи между областями управления, задачами машинного обучения и онтологической моделью отказов ИТС

Fig. 1. The relationship between management areas, machine learning tasks and ontological failure model of the intelligent transport system (ITS)

Модель обучения с учителем включает входные данные (входы) и так называемые выходы (outputs), что, например, соответствует набору признаков отказа и оценки тяжести последствий такого отказа. Цель обучения состоит в том, чтобы определить правило или правила для отображения входных данных на выходы и применение этих правил для новых случаев выхода из строя. В целом результатом является построение функциональной зависимости выходов от описаний объектов.

Основная проблема в контролируемом обучении (обучение с учителем) заключается в том, что применяемые метод и алгоритм должны корректно работать не только на данных, используемых для обучения, но и на новых, ранее не наблюдаемых значениях входов. Такая характеристика называется обобщением. Как правило, при обучении под контролем можно вычислить ошибку на тестовой последовательности и такая ошибка называется ошибкой обучения. Уменьшение этой ошибки представляет собой известную проблему оптимизации. Однако при применении машинного обучения существует необходимость и минимизации ошибки обобщения, т. е. ошибки теста. Требуется определить ошибку обобщения как ожидаемое значение ошибки для новых входов и оценить её путём измерения точности модели на тестовом наборе. Соответственно, модели обучения могут выдавать различную точность с учётом корректности предположений о характере изучаемой последовательности данных. В рамках рассматриваемого подхода модель обучения с учителем можно применять для классификации ситуации «есть сообщение об отказе от идентифицированного источника» – «нет сообщения об отказе от идентифицированного источника» – «есть сообщение об отказе от неидентифицированного источника».

При неконтролируемом обучении или в обучении без учителя (supervised learning) нет заранее отмеченных выходов. Вместо этого, в рамках неконтролируемого

обучения, осуществляется поиск естественных шаблонов (паттернов) или группировок данных. Это, безусловно, более сложная задача, поэтому полученные классификационные группы в ходе неконтролируемого обучения далее могут подтверждаться с помощью контролируемого обучения или на тестовых задачах.

В рамках управления последствиями отказов метод машинного обучения без учителя может быть использован для кластеризации источников сообщений об отказах, например на кластер элементов подсистемы ИТС, на кластер придорожного оборудования, на кластер базовых станций. Предлагаемый подход позволяет формировать набор правил логического вывода в процессе совместного использования как экспертных знаний специалистов, так и результатов анализа данных с помощью методов машинного обучения. Результаты машинного обучения получают содержательное объяснение, а генерируемые правила могут быть подвергнуты экспертизе. С другой стороны, появление аномальных результатов обучения может стать причиной дальнейшего развития онтологии, потому что предоставление знаний на основе правил принятия решений легче воспринимается людьми. При программной реализации и внедрении предлагаемого подхода в рамках предиктивного управления можно ожидать, что количество эксплуатационных отказов уменьшится не менее чем на 10 % при условии оперативного проведения техобслуживания на прогнозируемом источнике сообщений об отказе [18].

Разработка дерева отказов и правил его анализа для инструментальной подсистемы и придорожной инфраструктуры связи ИТС. Учитывая важность для штатного функционирования и оперативного управления ИТС инструментальных подсистем, и с учётом существующих методов проблемной области надёжности, можно построить дерево отказов для инструментальной подсистемы ИТС, систем беспроводной связи (СБС) и проводной

системы связи в виде логической структуры с использованием булевой алгебры [19]. Дерево отказов¹ в общем имеет вид на рис. 2 и эта схема является базовой для определения источников сообщений об отказах. Дерево отказов на рис. 2 далее будет использоваться как для разработки онтологии, так и для определения и применения метода машинного обучения. Использование логического элемента «ИЛИ» предполагает анализ ситуации прежде всего для случая частичного отказа инструментальной подсистемы².

Дерево отказов на рис. 2 относится к элементам физической архитектуры ИТС, которые согласно³ представляют собой иерархически организованную совокупность морфологических описаний подсистем ИТС. Инструментальная подсистема

ИТС (ITS Instrumental Subsystem) есть система транспортной телематики, направленная на решение одной или нескольких задач комплексной подсистемы.

Подсистема ИТС (ITS Subsystem) есть часть интеллектуальной транспортной системы, обладающая целостностью и способная функционировать независимо от других частей. Элемент подсистемы ИТС (ITS Subsystem Element) есть неделимый с функциональной точки зрения блок аппаратного обеспечения подсистем ИТС, рассматриваемый как единое целое и обладающий системными свойствами. Подсистема придорожной инфраструктуры связи ИТС (ITS Roadside Telecommunication System) есть подсистема, включающая систему связи для функционирования подсистем ИТС на обочине дорог.

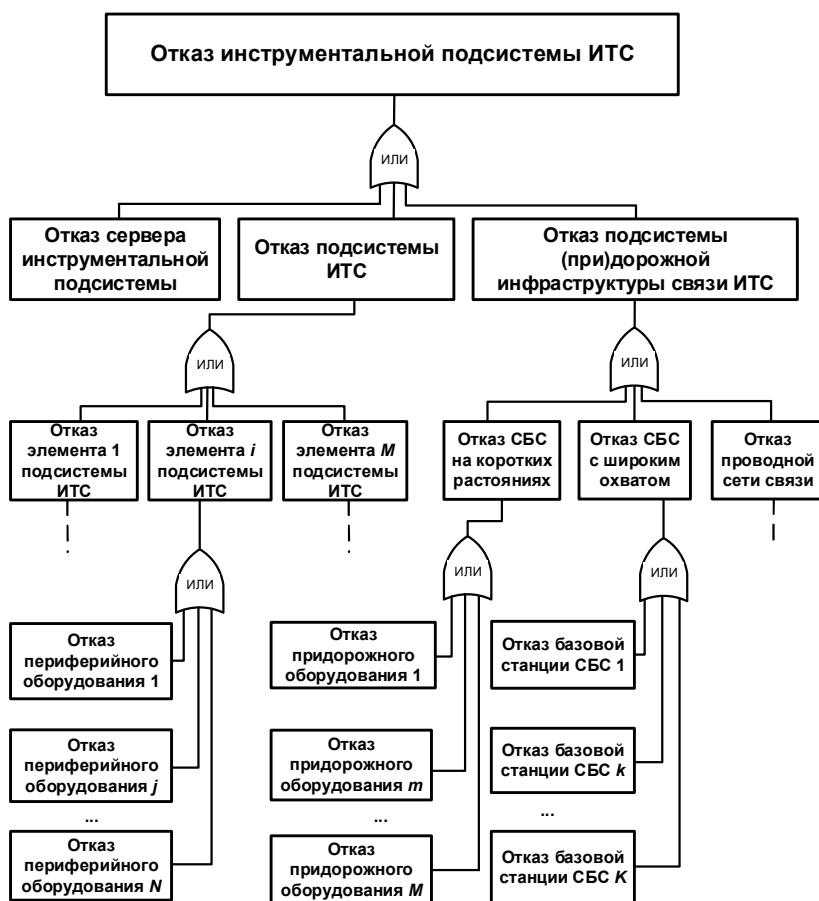


Рис. 2. Дерево отказов для инструментальной подсистемы ИТС
 Fig. 2. Fault tree for the ITS instrumental subsystem

¹ ГОСТ Р МЭК 62502-2014. Менеджмент риска. Анализ дерева событий.

² ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.

³ ГОСТ Р 56829–2015. Интеллектуальные транспортные системы. Термины и определения.

Периферийное оборудование (Peripheral Devices) есть элемент подсистемы ИТС, расположенный на автомобильной дороге, транспортном средстве или транспортном оборудовании. Сервер инструментальной подсистемы (ITS Instrumental Subsystem Server) есть процессор, предоставляющий услуги другому процессору. Элемент инструментальной подсистемы ИТС (ITS Instrumental Subsystem Element) есть объединённое в техническую систему оборудование⁴. Придорожное оборудование (Roadside Facilities) есть элементы подсистем ИТС, относящиеся к дорожной инфраструктуре, которое устанавливается над дорогой или вдоль неё и осуществляет связь с проезжающим бортовым оборудованием с помощью радиосигналов и соединено с придорожной системой для обмена данными.

Системы беспроводной связи с широким охватом (Wide Area Wireless Communications) подходят для услуг и применений, в которых информация передаётся пользователям, находящимся далеко от источника передачи и для которых требуется беспроводное покрытие. Беспроводная связь на короткие расстояния (Short Range Wireless Communications) относится к передаче информации, представляющей местную сеть. Базовая станция ИТС (ITS Base Communication Station) есть элементы, относящиеся к среде поддержания их коммуникативного взаимодействия. Отказ есть событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта или подсистемы; в рамках настоящей статьи отказ рассматривается как частичный. Проводная сеть связи (Wireline Communication) определяется как средства связи, выполняющие функции коммутации каналов и пакетов и подключённые к проводным сетям⁵.

⁴ ГОСТ Р 56294-2014. Интеллектуальные транспортные системы. Требования к функциональным и физическим архитектурам интеллектуальных транспортных систем.

⁵ ГОСТ Р 53801-2010. Связь федеральная. Термины и определения.

У рассмотренных сущностей в рамках модели выделяются атрибуты. Атрибут содержательно представляет собой объект данных, который описывает физическую величину или абстрактное состояние, которое может быть получено путём считывания датчика или регистра, связанного с ним, либо определено параметрами настройки или производства.

Пусть отказ описывается фактом события формирования сообщения о выходе из строя (неисправности), которое семантически обозначается *Fault* и может генерироваться программным обеспечением управления элемента ИТС или средством связи. Формальное описание сообщения об отказе (неисправности) можно записать в виде выражения–кортежа, имеющего вид согласно формуле:

$$Fault = \langle Obj, Attr(Obj), Rel(Obj) \rangle, \quad (1)$$

где *Fault* – общее обозначение сообщения об отказе (или неисправности) в рамках онтологии; *Obj* – множество объектов–источников сообщений об отказах (неисправностях); *Attr(Obj)* – множество существенных свойств (атрибутов) объектов; *Rel(Obj)* – множество семантических отношений между объектами вида «относится к...», «влияет на...» и аналогов.

С учётом ранее сделанных замечаний, можно утверждать, что множество объектов ИТС, как источников сообщений о выходе из строя (источников отказов), описывается формулой:

$$Obj = Obj_{InstrSubSystem} \cup Obj_{TeleSubSystem} \cup Obj_{Server} \cup Fault, \quad (2)$$

где *Obj_{InstrSubSystem}* – множество объектов инструментальной подсистемы ИТС; *Obj_{TeleSubSystem}* – множество объектов подсистемы придорожной инфраструктуры связи; *Obj_{Server}* – множество объектов серверов; *Fault* – множество сообщений об отказах.

По аналогии с (2), множество семантических отношений можно описать согласно формуле:

$$\begin{aligned}
 Rel(Obj) = & Rel(Obj_{InstrSubSystem}, Obj_{TeleSubSystem}, Obj_{Server}) \cup \\
 & \cup Rel(Fault, Obj_{InstrSubSystem}, Obj_{TeleSubSystem}, Obj_{Server}),
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где $Rel(Obj)$ – множество отношений между объектами онтологии; $Rel(Obj_{InstrSubSystem}, Obj_{TeleSubSystem}, Obj_{Server})$ – множество отношений для включения элементов ИТС в подсистемы; $Rel(Fault, Obj_{InstrSubSystem}, Obj_{TeleSubSystem}, Obj_{Server})$ – множество отношений для связывания аварийных сообщений и элементов ИТС.

Также множество свойств объектов согласно формуле (1) можно определить с помощью формулы:

$$\begin{aligned}
 Attr(Obj) = & \{att_i(Obj_j)\}, \\
 i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, n, m \in Z^+,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где $Attr(Obj)$ – множество атрибутов объекта; $att_i(Obj_j)$ – элемент множества $Attr(Obj)$ в виде i -го атрибута j -го объекта.

Создание онтологии включает процесс т. н. «сборки» онтологии, под которым понимается [17]:

1. Идентификация концептов и отношений между ними в предметной области разрабатываемой онтологии.

2. Формирование объективных, точных и однозначных текстовых определений концептов и отношений.

3. Определение терминов, соответствующих концептам и отношениям.

В качестве концептов рассматриваются физические сущности для моделирования ИТС. В рамках настоящей статьи названия концептов и терминов, их описывающие, совпадают. Идентификация концептов и отношений между ними показана на рис. 3, где отношения $Rel(Obj)$ описываются в виде семантических записей, которые характеризуют свойства соответствующих отношений. Далее преду-

сматривается, что концепт соответствует будущему классу программной модели системы, и следовательно, все объекты класса поддерживают описываемые далее связи в виде семантических отношений.

Отношение «является подклассом» $\{isSubClassOf\}$ показывает, что концепт связан с другим концептом отношением наследования свойств, что является важным с точки зрения поддержки функций и свойств ИТС; кроме того, данное отношение позволяет обеспечить целостность описания подсистемы. Например, система беспроводной связи наследует свойство подсистем придорожной инфраструктуры связи в части переноса сигнала электро-связи.

Отношение «является частью» $\{isPartOf\}$ показывает, что концепт связан с другим концептом отношением агрегирования, когда несколько объектов могут объединять свои свойства, не наследуя их целиком. Также отношение $\{isPartOf\}$ указывает, что множество объектов данного класса могут участвовать в различных подсистемах, а не только в указанных на рис. 3. Отношение $\{useNetworkElement\}$ показывает, что концепт использует элемент системы связи, например «Элемент подсистемы ИТС» использует для передачи информации «Базовую станцию». Отношение «имеет причину» $\{causedBy\}$ показывает связь между концептом «Отказ» и источниками сообщений об отказе, т. е. событие отказа увязано с физической архитектурой ИТС. Отношение $\{hasResult\}$ означает, что концепт «Отказ» может являться результатом некоторого процесса на концептах, соответствующих физическим сущностям.

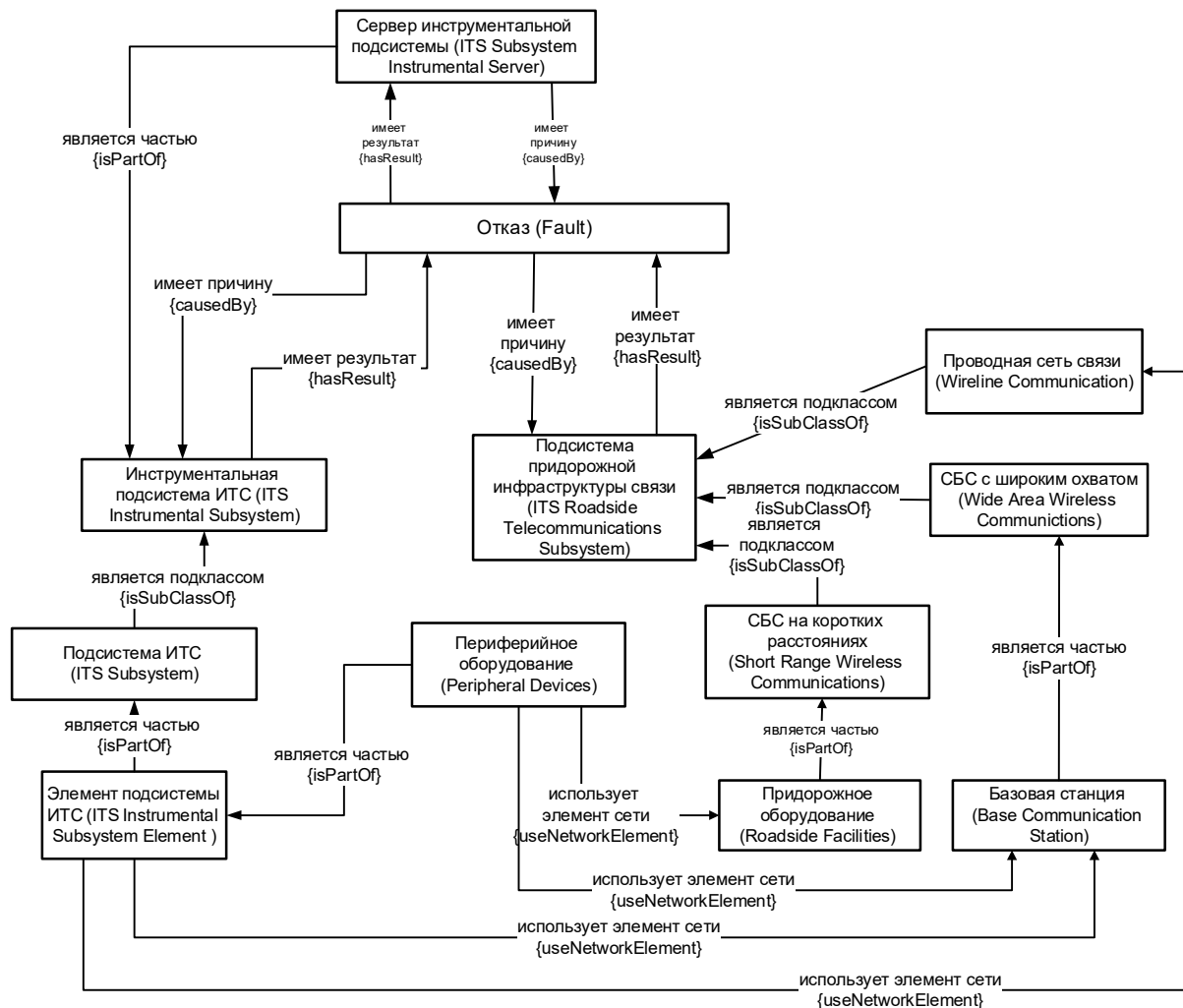


Рис. 3. Схема семантических связей для описания отказов инструментальной подсистемы и придорожной системы связи ИТС

Fig. 3. Scheme of semantic links for describing failures of the instrumental subsystem and the roadside communication system of the ITS

Далее рассмотрим разработку аксиом и правил логического вывода для определения источника сообщений об отказе с учётом введённых концептов и отношений между ними.

Разработка аксиом и правил логического вывода для определения источника сообщений об отказах. Онтология прежде всего содержит аксиомы, под которыми понимаются безусловные правила, справедливые в моделируемой проблемной области. Исходными положениями (аксиомами) в разрабатываемой предметной онтологии являются следующие, записываемые с учётом нотации, предложенной в [11] в форме псевдокода.

Аксиома 1 декларации классов объявляет (*Declaration*), что все объекты на рис. 3 являются классами и могут содержать индивидуальные объекты (*Individuals*), например класс «Базовых станций» содержит экземпляры класса, которые представляют описание типов конкретных базовых станций.

Аксиома 2 объявления подклассов (*SubClassOf*) может совокупно быть записана в виде выражений вида (5) – (8):

$$\text{SubClassOf} \\ (: \text{InstSubSystem} : \text{ITSSubSystem}); \quad (5)$$

$$\text{SubClassOf} \\ (: \text{TeleSubSystem} : \text{WirelinCommunication}); \quad (6)$$

SubClassOf(:TeleSubSystem :
WideAreaWirelessCommunication)); (7)

SubClassOf(:TeleSubSystem :
ShortRangeWirelessCommunication)). (8)

С учётом логической обратимости свойства «является частью» (*isPartOf*) целесообразно в виде аксиомы 3 утвердить эквивалентность отношения «является частью» в форме:

Declaration(*ObjectProperty*(:isPartOf));
TransitiveObjectProperty (:isPartOf). (9)

Далее рассмотрим аксиому принадлежности для описания отношений вида (*isPartOf*). Аксиома 4 о свойствах принадлежности объекта *ObjectPropertyAssertion* в совокупности может быть записана выражениями вида (10) – (14):

ObjectPropertyAssertion
(:isPartOf :ITSSubsystem
:ITSSubsystemElement); (10)

ObjectPropertyAssertion
(:isPartOf :PeripheralDevices
:ITSSubsystem); (11)

ObjectPropertyAssertion
(:isPartOf :RoadsideFacilities
:ShortRangeWirelessCommunication); (12)

ObjectPropertyAssertion
(:isPartOf
:BaseCommunicationStation
:WideAreaWirelessCommunication); (13)

ObjectPropertyAssertion
(:isPartOf
:ITSSubsystemInstrumentalServer
:ITSSubsystemInstrumentalServer); (14)

С учётом логической обратимости свойства «является частью» (*isPartOf*) целесообразно в виде аксиомы 5 утвердить эквивалентность отношения «является частью» и «имеет часть» (*hasPart*) в форме:

Declaration

(*ObjectProperty*(:hasPart)); (15)

InverseObjectProperty (:isPartOf).

По аналогии с учётом логической обратимости можно описать свойство (*causedBy*) и (*hasResult*) как аксиому 6 в форме (16) и (17) соответственно:

Declaration

(*ObjectProperty*(:causedBy)); (16)

InverseObjectProperty (:causedBy)

и

Declaration

(*ObjectProperty*(:hasResult)); (17)

InverseObjectProperty (:hasResult).

С учётом необходимости формирования логических выводов целесообразно далее задать логические правила для описания отношений между концептами (физическими сущностями), используя форму записи в виде отношений на множествах. Два и более концепта могут формировать полную композицию для описания инструментальной системы ИТС либо инфраструктуры придорожной связи. Это описывается логическим правилом вида:

$\forall a, c \text{ Composition}(a, c) \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow (\exists b_i \text{ useNetworkElement}(b_i, a) \wedge$
 $\wedge \text{isPartOf}(c_i, b_i)).$ (18)

Другими словами, если имеется два различных концепта *a* и *c*, то они могут быть связаны через концепт *b*. В результате получается, что логически «Периферийное оборудование» подключается к «СБС на коротких расстояниях» через концепт «Придорожное оборудование». Соответственно, каждый из транзитных концептов может быть причиной отказа и являться источником данных об отказе. Аналогично можно утверждать наличие композиции вида:

$\forall a, c \text{ Composition}(a, c) \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow (\exists b_i \text{ isPartOf}(d_i, a) \wedge \text{isPartOf}(c, d_i)).$ (19)

В системе для каждого объекта любого класса (*Object*) возможны два вида сообщений, а именно сообщение об отказе (любого типа) и отсутствие сообщения об отказе, как показано логическим правилом в форме:

$$\begin{aligned} & \forall Object \text{ FAULT}(Object) = \\ & = "ISFAULT" \vee \text{FAULT}(Object) = (20) \\ & = "NOFAULT". \end{aligned}$$

Следовательно, в системе возможно как наличие, так и отсутствие сообщений об отказах от любого объекта. Если два устройства соединены последовательно, то в случае выхода из строя одного устройства это воздействует на другое устройство в форме индуцированной генерации сообщения об отказе, причём второе устройство может быть технически исправным, но из-за отказа первого устройства не может штатно функционировать, как показано в выражении:

$$\begin{aligned} & \forall Object_i, Object_j, \\ & useNetworkElement(Object_i, Object_j) \Rightarrow (21) \\ & \text{FAULT}(Object_i) = \text{FAULT}(Object_j). \end{aligned}$$

Аналогично составляется выражение для трёх элементов:

$$\begin{aligned} & \forall Object_i, Object_j, Object_k \\ & isSubClassOf(Object_i, Object_j) \wedge \\ & \wedge isPartOf(Object_i, Object_k) \Rightarrow (22) \\ & \Rightarrow \text{FAULT}(Object_i) = \\ & = \text{FAULT}(Object_j) = \text{FAULT}(Object_k). \end{aligned}$$

В итоге, следуя логическим правилам в форме (21)–(22), при наличии последовательно соединённых элементов возможна ситуация наличия сообщений об отказах как от источника отказа, так и от элемента, к которому присоединён источник, что свидетельствует об эскалации сообщений об отказах. Например, отказ периферийного оборудования приводит к формированию сообщений об отказах всех соединённых элементов в направлении придорожного оборудования и в направлении элемента подсистемы ИТС. Здесь возникает ранее поставленная зада-

ча выделения исходного источника сообщений об отказах, которая также может решаться в рамках анализа связей на рис. 2 с помощью дополнительных правил логического вывода, а также дополняться байесовским подходом к анализу вероятностей отказов.

Рассмотрим правила логического вывода в примерной семантической Web-записи правил SWRL (Semantic Web Rule Language) для применения в рамках языка для описания онтологии в Web, OWL (Web Ontology Language), с помощью которых определяется источник получения информации о выходе из строя объекта ИТС. Здесь часть выражения слева от символа \Rightarrow соответствует начальному утверждению, т. е. наличию концептов в модели для получения вывода, а часть выражения справа от символа \Rightarrow соответствует собственно выводу с указанием концепта, который является источником сообщения об отказе(ах). В результате, получив сообщение об отказах и проведя его формальный анализ, можно идентифицировать первичный источник сообщения об отказах, независимо от того, какой тип имеет оборудование и какой протокол для сбора информации об отказе используется.

С помощью определения источника первичного сообщения об отказе можно отделить такой элемент от тех элементов, которые подвержены влиянию отказа и выдают индуцированное или вторичное сообщение об отказе, но при этом сами по себе исправны. В результате разрешается неоднозначная ситуация, когда исправный элемент выдаёт сообщение о неисправности, поскольку на него воздействует связанный элемент; это позволяет создать единое семантическое пространство управления последствиями отказов ИТС с учётом наличия гетерогенных и взаимозависимых источников сообщений об отказах и позволит автоматизировать анализ дерева отказов на рис. 2. Рассмотрим несколько вариантов таких правил.

Логическое правило 1. Источником информации об отказе является элемент «Пе-

риферийное оборудование», если исправны «Элемент подсистемы ИТС» при наличии исправных «Придорожного оборудования», «Базовой станции»; правило имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & PeripheralDevices(? Device), \\
 & RoadsideFacilities(? Facility), \\
 & BaseCommunicationStation(? Station), \\
 & InstrumentalSubsystemElement(? Element), \\
 & isConnectedTo(? Device, ? Facility), \\
 & isConnectedTo(? Device, ? Station), \\
 & isConnectedTo(? Device, ? Element), \\
 & Fault(? Fault), \\
 & affectedUnit(? Fault, ? Device), \\
 & affectedUnit(? Fault, ? Facility), \\
 & affectedUnit(? Fault, ? Station), \\
 & affectedUnit(? Fault, ? Element), \\
 & hasStatus(? Facility, StatusNoFault), \\
 & hasStatus(? Station, StatusNoFault), \\
 & hasStatus(? Element, StatusNoFault) \Rightarrow \\
 & hasFaultSource(? Fault, ? Device),
 \end{aligned} \tag{23}$$

где знак «?» есть служебный символ для выделения свойства или имени переменной; *PeripheralDevices*, *RoadsideFacilities*, *BaseCommunicationStation*, *InstrumentalSubsystemElement* есть идентификаторы класса, которые соответствуют идентификатору унарного предиката; *(? Device)*, *(? Facility)*, *(? Station)*, *(? Element)* – имена переменных, которые обозначают индивидуальные объекты ИТС, относящиеся к классам и обозначающие переменную унарного предиката; *(? Fault)* – обозначает имя переменной, соответствующей отказу; выражение *isConnectedTo* есть идентификатор бинарного предиката, который обозначает связь между двумя объектами в скобках (...), например *isConnectedTo(? Device, ? Facility)* означает связь между *? Device* и *? Facility*;

affectedUnit есть идентификатор бинарного предиката, который обозначает подверженность одного объекта воздействию другого объекта, например *affectedUnit(? Fault, ? Facility)* означает, что *? Fault* воздействует на *? Facility*; *hasStatus* есть идентификатор бинарного предиката, который обозначает наличие определённого состояния у объекта ИТС, например *hasStatus(? Element, StatusNoFault)* обозначает отсутствие неисправностей на объекте; *hasFaultSource* есть идентификатор бинарного предиката, который обозначает наличие отказа на индивидуальном объекте ИТС, например *hasFaultSource(? Fault, ? Device)* есть отказ периферийного оборудования.

Логическое правило 2. Источником информации об отказе является «Придорожное оборудование» при наличии исправных «Периферийного оборудования», «Базовой станции», «Элемента подсистемы ИТС»; правило имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & PeripheralDevices(? Device), \\
 & RoadsideFacilities(? Facility), \\
 & BaseCommunicationStation(? Station), \\
 & InstrumentalSubsystemElement(? Element), \\
 & isConnectedTo(? Device, ? Facilities), \\
 & isConnectedTo(? Device, ? Station), \\
 & isConnectedTo(? Device, ? Element), \\
 & Fault(? Fault), \\
 & affectedUnit(? Fault, ? Device), \\
 & affectedUnit(? Fault, ? Facility), \\
 & affectedUnit(? Fault, ? Station), \\
 & affectedUnit(? Fault, ? Element), \\
 & hasStatus(? Device, StatusNoFault), \\
 & hasStatus(? Station, StatusNoFault), \\
 & hasStatus(? Element, StatusNoFault) \Rightarrow \\
 & hasFaultSource(? Fault, ? Facility).
 \end{aligned} \tag{24}$$

Логическое правило 3. Источником информации об отказе является «Базовая станция» при наличии исправных «Периферийного оборудования, «Придорожного оборудования», «Элемента подсистемы ИТС»; правило имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & PeripheralDevices(? Device), \\
 & RoadsideFacilities(? Facility), \\
 & BaseCommunicationStattion(? Station), \\
 & InstrumentalSubsystemElement(? Element), \\
 & isConnectedTo(? Device, ? Facilities), \\
 & isConnectedTo(? Device, ? Station), \\
 & isConnectedTo(? Device, ? Element), \\
 & Fault(? Fault), \\
 & affectedUnit (? Fault, ? Device), \\
 & affectedUnit (? Fault, ? Facility), \\
 & affectedUnit (? Fault, ? Station), \\
 & affectedUnit (? Fault, ? Element), \\
 & hasStatus(? Device, StatusNoFault), \\
 & hasStatus (? Facility, StatusNoFault), \\
 & hasStatus (? Element, StatusNoFault) \Rightarrow \\
 & hasFaultSource(? Fault, ? Station).
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

В зависимости от сценариев применения ИТС данный набор правил может быть расширен, в настоящей статье набор сформирован преимущественно для сбора и обработки сообщений о неисправностях средств связи. С помощью представленных аксиом и логических правил различные источники сообщений об отказах и их сведения могут быть сопоставлены

и взаимосвязаны в едином семантическом пространстве вне зависимости от конкретных типов оборудования гетерогенной ИТС.

Заключение. В рамках онтологического подхода выполнен анализ предметной области управления последствиями отказов на примере инструментальной подсистемы ИТС и придорожной инфраструктуры связи. Это позволяет создать общую информационную модель управления последствиями отказов для гетерогенных ИТС в рамках единого семантического пространства. Для решения задачи исследования выполнен анализ научных основ, методов и способов создания аналогичных онтологий предметной области с кратким описанием их достоинств и недостатков. Для предметной области построено дерево отказов инструментальной подсистемы ИТС и придорожной инфраструктуры связи. Выполнена разработка концептов онтологии предметной области для предоставления знаний об источниках сообщений об отказах объектов ИТС. Для автоматизации и интеллектуализации процессов управления выполнена разработка аксиом, схемы семантических связей между концептами, выполнено содержательное описание каждой семантической связи. Разработаны правила логического вывода для онтологии с целью интерпретации фактов предметной области, поиска и идентификации первичного источника сообщений об отказах. Определена системная взаимосвязь между онтологией и методами машинного обучения в предметной области управления последствиями отказов объектов ИТС.

Список литературы

1. Интеллектуальные транспортные системы. Справочник по сухопутной подвижной службе (включая беспроводный доступ). Женева: Сектор радиосвязи МСЭ, 2009. Т. 4. 124 с.
2. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями электросвязи: издание для специалистов. М.: Эко-Трендз, 2003. 288 с.

3. Онтологическое моделирование предприятий: методы и технологии: научная монография // С.В. Горшков, С.З. Гумеров, С.С. Кралин и др./ отв. ред. С. Е. Горшков; Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2019. 236 с.
4. Ontology-based information integration: A survey of existing approaches / H. Wache, T. Vögele,

U. Visser et al. // International joint Conferences on Artificial Intelligence organization. Workshop on Ontologies and Information Sharing (IJCAI-01): proceedings. USA: IJCAI. 2001. Vol. 47. P. 108–118.

5. Song Z., Cardenas A.A., Masuoka R. Semantic middleware for the Internet of Things // Proceedings of 2nd International Internet of Things Conference (IoT), Tokyo: IEEE, 2010. P.1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/IOT.2010.5678448>.

6. The transport disruption ontology / D. Corsar, M. Markovic, P. Edwards et al. // Proceedings of the 14th Semantic Web conference, Part II (ISWC 2015). Springer, 2015. LNCS 9367. P. 329–336. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25010-6_22.

7. Ontology-based architecture for Intelligent Transportation Systems using a traffic sensor network / S. Fernandez, R. Hadfi, T. Ito et al. // Sensors. 2016. Vol. 16 (8). № 1287. 7 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16081287>.

8. Казаков А.Л., Дудакова А. В. Применение онтологического подхода для создания интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2019. № 3 (43). С. 33–41.

9. Meneguetto R.I., De Grande R.E., Loureiro Antonio A.F. Intelligent transport system in Smart Cities. Aspects and challenges of vehicular networks and cloud. Springer International Publishing AG, 2018. 182 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93332-0>.

10. Смирнов С.В. Онтологический анализ предметных областей моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2001. Т. 3. № 1. С. 62-70.

11. Kuba M. OWL 2 and SWRL Tutorial, 2012 / dior.ics.muni.cz сайт. URL: <https://dior.ics.muni.cz/~makub/owl/#пропах> (дата обращения 01.09.2020).

12. Горшков С. В., Гребешков А. Ю. Разработка способа анализа сообщений о происшествиях в автоматизированной системе управления безопасностью жизнедеятельности // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16, № 2. С. 221-230.

13. Гурьянова М.А., Ефименко И.В., Хорошевский В.Ф. Онтологическое моделирование экономики предприятий и отраслей современной России. Часть 2. Мировые исследования и разработки: аналитический обзор. М.: НИУ ВШЭ, 2011. 88 с. URL: https://www.hse.ru/data/2011/12/05/1271846247/WP7_2_011_08_%D1%872.pdf (дата обращения 14.04.2020).

14. Некрасов И.В., Правдивец Н.А. Машинное обучение в задачах прогноза отказов оборудования // 19-я Всеросс. конф. с межд. участием «Математические методы распознавания образов» (ММРО–2019)»: тез. докл. М.: ИСП РАН, 2019. С. 371.

15. Гребешков А.Ю., Кузнецов Я.М. Машинное обучение при прогнозе неисправностей беспроводных сетей // Сб. материалов XXVII Рос-сийск. научн. конф. проф.-препод. состава, научн. сотрудников и аспирантов ПГУТИ. Самара: ПГУТИ, 2020. С. 26-27.

16. Grebeshkov A.Y. Optical transport network management via machine learning and ontology-based technique // Proceedings XVII International Scientific and Technical Conference “Optical Technologies for Telecommunications” (OTT 2019). Kazan: SPIE, 2020. Proc. SPIE 11516.; 11516: 1151602-1 – 1151602-6. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2556375>.

17. Morocho-Cayamcela M.E., Lee H., Lim W. Machine learning for 5G/B5G mobile and wireless communications: potential, limitations, and future directions // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 137184-137206. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942390>.

18. Fayad C. Using integrated control and asset management to optimize maintenance and reliability, 2014 / flowcontrolnetwork.com, сайт. URL: <https://www.flowcontrolnetwork.com/process-control-automation/article/15561784/using-integrated-control-and-asset-management-to-optimize-maintenance-and-reliability> (дата обращения 06.06.2020).

19. Никитенко Ю.В. Особенности применения метода построения деревьев отказов для оценки техногенного риска предприятий оборонно-промышленного комплекса // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21831> (дата обращения 05.08.2020).

Статья поступила в редакцию 22.10.2020

Принята к публикации 01.12.2020

Информация об авторе

ГРЕБЕШКОВ Александр Юрьевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей и систем связи, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. Область научных интересов – когнитивные сети связи, гетерогенные сети, сенсорные сети, онтологии, принятие решений. Автор 64 научных публикаций.

UDC 004.82; 621.391

DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.4.48>**MODELING OF FAILURES OF THE INSTRUMENTAL SUBSYSTEM AND ROADSIDE COMMUNICATION INFRASTRUCTURE OF INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEM BASED ON ONTOLOGY****A. Yu. Grebeshkov**Volga State University of Telecommunications and Informatics,
23, st. L. Tolstoy, Samara, 443010, Russian Federation
E-mail: grebeshkov-ay@psuti.ru**Keywords:** intelligent transport system; managing the consequences of failures; ontological approach; machine learning.**ABSTRACT**

Introduction. Currently, intelligent transport systems (ITS) are being actively employed, so the damage from their failures increases significantly. To improve the efficiency of management of intelligent transport systems, taking into account their failures, it is crucial to evolve from management systems based on rules to management systems based on knowledge. This allows one to use state-of-the-art methods of proactive or predictive management. At the same time, various sources of data on the state of ITS elements are used. Thus, introducing proactive management technologies requires creation of an information architecture that allows structuring, linking and integrating data on the state of heterogeneous elements of the ITS at a content-related level. The **aim** of the work was to increase the efficiency of management based on ontological modeling, by solving the problem of identification and classification of sources of information on failures of the instrumental subsystem of the ITS. This will support the creation of a unified semantic space that allows one to accurately describe information about the failure of ITS subsystems by formalizing the definition of all used concepts and links between these concepts. In terms of methodology, an ontological **model of the domain of failures** of ITS subsystems was created in order to subsequently use the model for estimating the current state and anticipating with the use of machine learning methods. The ontological model allows one to describe the relationship between the elements and subsystems of ITS, regardless of the types of network elements and other devices. As a result, it allows to form a single semantic space of information sources of messages about failures, where each source can be uniquely identified and described. Furthermore, axioms and rules that can be used to describe a fault tree and determine the source of a fault message were proposed. In **conclusion**, there is proposed a generalized scheme for the combined application of machine learning methods and the proposed failure model to move to predictive management of the consequences of failures. This will allow to carry out preventive maintenance and repairing of equipment until its failure, which will increase the total reliability of the ITS.

REFERENCES

1. Intellektual'nye transportnye sistemy [Intelligent transport systems]. *Spravochnik po suhoputnoj podvizhnoj sluzhbe (vkljuchaja besprovodnyj dostup)* [Handbook of the Land Mobile Service (Including Wireless Access)]. Geneva: ITU Radiocommunication Sector, 2009. Vol. 4. 124 p. (In Russ.).
2. Grebeshkov A. Yu. *Standarty i tehnologii upravlenija setjami jelektrosvyazi: izdanie dlja specialistov* [Telecommunication Network Management Standards and Technologies: A Professional Edition]. Moscow: Eko-Trendz, 2003. 288 p. (In Russ.).
3. Gorshkov S. V., Gumerov S. Z., Kralin S. S. et al. *Ontologicheskoe modelirovanie predpriyatij: metody i tehnologii* [Ontological modeling of enterprises: methods and technologies]. Yekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2019. 236 p. (In Russ.).
4. Wache H., Vögele T., Visser U. et al. Ontology-based information integration: A survey of existing approaches. *International joint Conferences on Artificial Intelligence organization. Workshop on Ontologies and Information Sharing (IJCAI-01): proceedings*. USA: IJCAI. 2001. Vol. 47. P. 108–118.
5. Song Z., Cardenas A.A., Masuoka R. Semantic middleware for the Internet of Things. *Proceedings of 2nd International Internet of Things Conference (IoT)*, Tokyo: IEEE, 2010. P.1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/IOT.2010.5678448>.
6. Corsar D., Markovic M., Edwards P. et al. The transport disruption ontology. *Proceedings of the 14th Semantic Web conference, Part II (ISWC 2015)*. Springer, 2015. LNCS 9367. P. 329–336. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25010-6_22.

7. Fernandez S., Hadfi R., Ito T. et al. Ontology-based architecture for Intelligent Transportation Systems using a traffic sensor network. *Sensors*. 2016. Vol. 16 (8). № 1287. 7 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16081287>.
8. Kazakov A. L., Dudakova A. V. Primenenie ontologicheskogo podhoda dlja sozdaniya intellektual'noj sistemy upravlenija na zheleznodorozhnom transporte [Application of ontological approach for creation of intellectual management system by railway transport]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija* [Herald of the Ural State University of Railway Transport]. 2019. No 3 (43). P. 33–41. (In Russ.).
9. Meneguette R.I., De Grande R.E., Loureiro Antonio A.F. Intelligent transport system in Smart Cities. Aspects and challenges of vehicular networks and cloud. Springer International Publishing AG, 2018. 182 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93332-0>.
10. Smirnov S. V. Ontologicheskij analiz predmetnyh oblastej modelirovaniya [Ontological analysis of modeling domains]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAS* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2001. Vol. 3. No 1. P. 62-70. (In Russ.).
11. Kuba M. OWL 2 and SWRL Tutorial, 2012 / dior.ics.muni.cz сайт. URL: <https://dior.ics.muni.cz/~makub/owl/#propax> (reference date: 01.09.2020).
12. Gorshkov S. V., Grebeshkov A. Yu. Razrabotka sposoba analiza soobshhenij o proisshestvijah v avtomatizirovannoj sisteme upravlenija bezopasnost'ju zhiznedejatel'nosti [Design of incident message analysis methods for a life safety automated control system]. *Infokommunikacionnye tehnologii* [Infocommunication Technologies]. 2018. Vol. 16. No 2. P. 221-230. (In Russ.).
13. Guryanova M. A., Efimenko I. V., Khoroshevsky V. F. Ontologicheskoe modelirovanie jekonomiki predpriyatij i otraslej sovremennoj Rossii. Chast' 2. Mirovye issledovanija i razrabotki: analiticheskij obzor [Ontological modeling of the economy of enterprises and industries in modern Russia. Part 2. World research and development: an analytical review]. Moscow: NRU HSE, 2011. 88 p. (In Russ.).
14. Nekrasov I. V., Pravdivets N. A. Mashinnoe obuchenie v zadachah prognoza otkazov oborudovanija [Machine learning in problems of forecasting equipment failures]. *19-ja Vseross. konf. s mezhd. uchastiem «Matematicheskie metody raspoznavanija obrazov» (MMRO–2019)»: tez. dokl.* [19th All-Russian conf. with int. participation "Mathematical methods of pattern recognition" (MMRO-2019)": abstracts reports]. Moscow: ISP RAS, 2019. P. 371. (In Russ.).
15. Grebeshkov A. Yu., Kuznetsov Ya. M. Mashinnoe obuchenie pri prognoze neispravnostej besprovodnyh setej [Machine learning in predicting failures in wireless networks]. *Sb. materialov XXVII Rossijsk. nauchn. konf. prof.-prepod. sostava, nauchn. sotrudnikov i aspirantov PGUTI* [Proceedings XXVII Russian scientific conf. of prof.-lecturer staff, scientific employees and graduate students of Volga State University of Telecommunications and Informatics]. Samara: VSUTI, 2020. P. 26-27. (In Russ.).
16. Grebeshkov A.Y. Optical transport network management via machine learning and ontology-based technique. *Proceedings XVII International Scientific and Technical Conference "Optical Technologies for Telecommunications" (OTT 2019)*. Kazan: SPIE, 2020. Proc. SPIE 11516; 11516: 1151602-1 – 1151602-6. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2556375>.
17. Morocho-Cayamcela M.E., Lee H., Lim W. Machine learning for 5G/B5G mobile and wireless communications: potential, limitations, and future directions. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 137184-137206. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942390>.
18. Fayad C. Using integrated control and asset management to optimize maintenance and reliability, 2014 / flowcontrolnetwork.com, сайт. URL: <https://www.flowcontrolnetwork.com/process-control-automation/article/15561784/using-integrated-control-and-asset-management-to-optimize-maintenance-and-reliability> (reference date: 06.06.2020).
19. Nikitenko Yu. V. Osobennosti primeneniya metoda postroeniya derev'ev otkazov dlja ocenki tehnogenogo riska predpriyatij oboronno-promyshlennogo kompleksa [Features of the application of the method of constructing fault trees for assessing the technogenic risk of enterprises of the military-industrial complex]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija* [Modern Problems of Science and Education]. 2015. No 2-2. Available at: www.science-education.ru/ru (In Russ.).

The article was received 21.10.2020
Accepted for publication 01.12.2020

For citation: Grebeshkov A. Yu. Modeling of Failures of the Instrumental Subsystem and Roadside Communication Infrastructure of Intelligent Transport System Based on Ontology. *Vestnik of Volga State University of Technology*. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems. 2020. No 4 (48). Pp. 48-63. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.4.48>

Information about the authors

Alexander Yu. Grebeshkov – Doctor of Technical Sciences degree, Associate Professor, Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Volga State University of Telecommunications and Informatics. Research interests – cognitive communication networks, heterogeneous networks, sensor networks, ontologies, decision making. The author of 64 scientific publications.