

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPUTER ENGINEERING  
AND CONTROL

УДК 004.82

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36

## **Разработка и оценка онтологии социокиберфизической системы на основе анализа типовых сценариев использования мобильных роботов\***

Д.М. КАЛАЗИНА<sup>1,a</sup>, А.М. КАШЕВНИК<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> 197101, РФ, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

<sup>2</sup> 199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

<sup>a</sup> darya.kalyazina@mail.ru    <sup>b</sup> alexey@iias.spb.su

В статье рассмотрены типовые сценарии использования мобильных роботов, охватывающие основные процессы, возникающие при их взаимодействии: уборка помещения с помощью автономных роботов-пылесосов; взаимодействие двух роботов для сборки объекта из компонентов, а также взаимодействие робота-манипулятора и робота-измерителя с целью исследования местности, преодоления препятствий и проведения манипуляций. Среди основных процессов, возникающих в таких сценариях, можно выделить информационное взаимодействие роботов, совместное выполнение роботами задачи, привлечение человека к выполнению задачи. В работе представлено подробное описание онтологии социокиберфизической системы на основе анализа вышеперечисленных сценариев. В статье также рассмотрены правила оценки онтологий, представлено описание существующих методов оценки с разделением их на классы в зависимости от средств анализа онтологии, а также описаны задачи, которые необходимо выполнить при проведении оценки. Затем была выполнена оценка разработанной онтологии на основе метода исследования топологии графа. Полученные значения по ключевым показателям, таким как количество различных циклов в графе, количество вершин, имеющих несколько родителей, отнесенное к количеству вершин в графе, отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам, среднее квадратичное отклонение степени вершины графа, удовлетворяют заданным граничным значениям оценки. В связи с этим можно сделать вывод, что разработанная онтология не имеет критических проблем. Однако ряд значений основных показателей превышает ожидаемые (например, максимальное отношение ширины соседних уровней, среднее квадратичное отклонение детей листьев у предпоследних вершин в графе, среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину). Следовательно, предполагается дальнейшая работа по доработке онтологии.

---

\* Статья получена 26 октября 2018 г.

Исследование выполнено в СПИИРАН при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-29-04349 и 19-07-00670, а также бюджетной темы № 0073-2019-0005.

Планируется провести анализ критериев, которые не соответствуют предъявляемым требованиям, затем предложить возможные варианты улучшения онтологии. Также необходимо провести обзор редакторов и выбрать систему логического вывода для проведения дальнейшего исследования, направленного на внедрение онтологии в сценарии взаимодействия роботов.

**Ключевые слова:** социкиберфизическая система, мобильные роботы, онтология, онтограф, оценка онтологии, методы оценки онтологий, информационное взаимодействие, робототехника

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из возможных подходов к представлению знаний является онтологический подход. Подход применяется для формализации различных предметных областей и поддержки семантической интероперабельности между взаимодействующими сущностями. Онтологический подход широко используется в системах различного класса. Не являются исключением и социкиберфизические системы, которые в настоящее время получают всё большую и большую популярность. Такие системы используются для решения широкого круга задач с привлечением интеллектуальных агентов и людей [1]. При этом одной из важнейших задач в таких системах является организация информационного взаимодействия между роботизированной системой и человеком.

В последнее время исследования в области групповых робототехнических систем набирают всё большую популярность [2, 3]. Взаимодействие робот–человек необходимо для реализации задач, которые невозможно решить без участия роботов и людей одновременно. При этом онтологический подход позволяет автоматизировать такое взаимодействие путем обеспечения интероперабельности при информационном взаимодействии мобильных роботов со смартфоном человека.

Таким образом, основной задачей исследования является формализация основных сущностей и процессов, протекающих в социкиберфизической системе посредством разработки онтологической модели такой системы, а также оценка качества разработанной модели.

Для разработки онтологии были выделены типовые сценарии в системах такого класса. После разработки онтологии проведена ее оценка, которая показала, что разработанная онтология не имеет критических проблем и в целом удовлетворяет основным показателям оценки.

Статья состоит из следующих разделов: в первом разделе описаны рассмотренные типовые сценарии использования мобильных роботов. Во втором разделе рассмотрено понятие онтологии и онтологического подхода, а также представлена разработанная онтология социкиберфизической системы. Третий раздел посвящен описанию существующих методов анализа онтологий и выбору метода оценки разработанной онтологии. В четвертом разделе описана оценка разработанной онтологии и представлены предложения по ее улучшению. В заключении указаны общие результаты и выводы по изложенному в статье материалу.

## 1. ТИПОВЫЕ СЦЕНАРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Были выделены три типовых сценария, наилучшим образом характеризующие взаимодействие мобильных роботов в социокиберфизических системах.

1. Сценарий уборки помещения автономными роботами-пылесосами в умном доме (сценарий подробно описан авторами в работе [4]).

Роботы-пылесосы создают совместную карту помещения с помощью видеокамер и датчиков и совместно выполняют уборку, обмениваясь информацией о том, какая часть помещения уже обработана. При этом каждый робот организует взаимодействие с другими устройствами, которые принимают участие в сценарии, а именно:

- с мобильными пользовательскими устройствами (смартфонами), которые используются для указания целей и ограничений, а также общих требований, таких как режим энергосбережения, режим чистки и т. д.;

- с роботами-манипуляторами, выполняющими перемещение предметов интерьера (например, стульев) для эффективной уборки;

- с другими роботами-пылесосами для распределения задачи уборки помещения;

- с адаптивной системой управления светом, обеспечивающей возможность использования светочувствительных датчиков роботами-пылесосами.

2. Сценарий взаимодействия роботов для сборки объекта из компонентов (сценарий и реализация его прототипа подробно описана авторами в работе [5]).

В рамках данного сценария пользователь задает модель объекта в интеллектуальном пространстве, а роботы получают доступ к этой модели и возможности распределения задач между собой. Прделанная каждым роботом работа в режиме реального времени отображается в интеллектуальном пространстве, что позволяет остальным роботам оперировать в пространстве, имея целостную картину.

3. Взаимодействие робота-манипулятора и робота-измерителя для преодоления препятствий, исследования местности и проведения манипуляций (сценарий и его реализация подробно описана авторами в работе [6]);

Робот-манипулятор передвигается по пересеченной местности и может встретить препятствия на своем пути. Робот имеет шесть крутящихся колес и может поднимать передние и заднее шасси для преодоления препятствий, которые больше радиуса его колеса. Если на пути робота находится препятствие, то участвующий в сценарии робот-измеритель выполняет его сканирование. На основе измеренных характеристик препятствия робот-манипулятор преодолевает его в автоматическом режиме (если существует соответствующий алгоритм) или в ручном режиме благодаря помощи оператора-человека, который в этом случае осуществляет ручное управление роботом.

## 2. ОНТОЛОГИЯ СОЦИОКИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Онтология – это подробная спецификация модели предметной области, она включает в себя словарь (т. е. список логических констант и предикатных символов) для описания предметной области и набор логических высказыва-

ний, формулирующих существующие в данной проблемной области ограничения и определяющих интерпретацию словаря [7]. В ходе исследования была разработана онтология, состоящая из трех основных разделов: Physical Space, Information Space и Social Space. Разработанная онтология представлена на рис. 1. Рассмотрим онтологию более подробно. Класс Physical Space описывает материальные объекты физического пространства, класс Information Space – виртуальные объекты информационного пространства, а класс Social Space – людей, участвующих в человеко-машинном взаимодействии.

Рассмотрим более подробно часть онтологии, относящуюся к классу Physical Space. Класс содержит описание физических объектов, включает следующие подклассы: Collection, Device и Environment. Класс Collection характеризует совокупность устройств, которые представляют собой участников социкиберфизической системы (например, роботов). Класс Device представляет собой описание устройств, которые оперируют в физическом пространстве, и состоит из следующих подклассов: Connect\_Interface, Battery, Hull, Motor, Sensor, Switch, Wheel.

Класс Connect\_Interface характеризует виды подключений, которые могут применяться в системе для реализации взаимодействия между объектами. Подклассом класса Connect\_Interface является Wirelessinterface. Данный класс описывает варианты беспроводного интерфейса, он включает подклассы Bluetooth и WiFi. Класс Bluetooth определяет обмен информацией между устройствами, расположенными на близком расстоянии друг от друга, с помощью радиоволн. Класс WiFi также является стандартом радиосвязи и позволяет обеспечить обмен информацией, однако, по сравнению с Bluetooth, сеть покрывает большее расстояние.

Класс Motor описывает двигатели, используемые для работы устройств. Класс Sensor характеризует датчики устройств. Подклассы класса Sensor описывают датчики различных типов: класс DistanceSensor – датчики расстояния, класс HeatSensor – датчики температуры, класс LightSensor – датчики света, класс TouchSensor – датчики касания. Класс Wheel содержит данные о типах колес, используемых устройствами. Класс Battery определяет блоки питания, установленные в устройствах. Класс Switch описывает вид используемого в устройстве переключателя. Класс Environment определяет параметры среды, в которой исполняются сценарии.

Далее рассмотрим объекты информационного пространства. Класс Information Space описывает информационные объекты системы и состоит из следующих подклассов: CompetenceProfile, Configuration, Context, Policy, Interaction, Process, Agent, Human\_profile, Resource и Resource\_profile. Класс CompetenceProfile описывает компетенции людей и роботов. Класс состоит из подкласса History, содержащего параметры, которые можно задать при исполнении сценариев. Также класс включает описание результатов выполненных сценариев. Класс Agent описывает программное обеспечение, которое управляет Resource и Device. Класс Configuration содержит описание набора настроек и компонентов, которые должны быть учтены в информационном пространстве. Класс Context содержит разнообразную информацию, которая характеризует окружение, в котором находятся объекты социкиберфизической системы. Класс состоит из двух

подклассов: ResourceContext, определяющего специфику окружения устройства, и EnvironmentContext, включающего сведения о внешней среде. Класс EnvironmentContext разделяется на подклассы Spatial и Temporal.

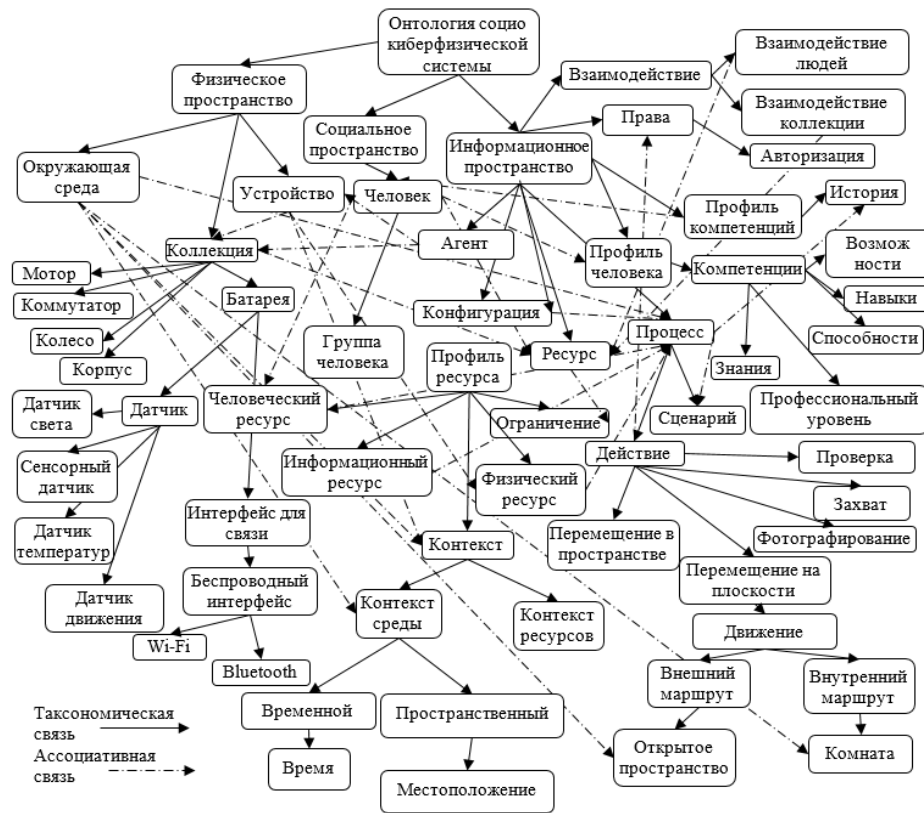
Класс Spatial дает описание пространства и включает подкласс Location, который описывает расположение объектов системы в пространстве. Класс Temporal определяет временные характеристики и включает подкласс Time, который определяет промежутки времени, связанные с исполнением сценариев.

Класс Human\_profile содержит описание компетенций человека как одного из объектов социокиберфизической системы. Human\_profile включает подкласс Competency. Класс Competency описывает основные свойства, которые могут характеризовать человека-эксперта: Opportunities, Proficiency\_level, Capabilities, Skills и Knowledge. Класс Opportunities определяет возможности эксперта. Класс Proficiency\_level содержит информацию о квалификации эксперта. Класс Capabilities определяет характеристики, которым должен соответствовать эксперт. Класс Skills – навыки, необходимые для реализации задач.

Класс Interaction описывает виды взаимодействий – HumanInteraction и CollectionInteraction. Объекты системы могут взаимодействовать для совместного решения задач. Класс CollectionInteraction описывает взаимодействие нескольких роботов, а HumanInteraction – взаимодействие робота и человека.

Класс Policy определяет права и возможности объектов системы. Класс содержит подкласс Autorization. Класс Autorization определяет правила авторизации объектов в системе.

Класс Process содержит описание процессов, которые могут быть исполнены системой. Process включает подкласс Scenario, содержащий сценарии, которые могут быть выполнены объектами системы. Класс Scenario содержит подкласс Action. Класс Action описывает функции, которые может выполнять Resource. Класс состоит из подклассов: Movement, Photo, Grip, Fly, Check. Класс Movement включает варианты маршрута – Route (IndoorRoute, OutdoorRoute). IndoorRoute описывает маршрут внутри помещения, включает подкласс Room. Класс OutdoorRoute характеризует маршрут вне помещения, на местности, включает подкласс OpenSpace. Класс Photo характеризуют функцию устройства, позволяющую делать снимки. Класс Grip определяет способы захвата предметов устройством во время исполнения сценариев. Класс Fly описывает функциональность полета мобильного робота. Класс Check – проверка, которая позволяет устройству отличать предметы с особыми характеристиками. Таким образом, Action представляет описание функций Resource. Класс Resource описывает коллекции физических объектов. Класс Resource\_profile содержит описание ресурсов системы, включает подклассы: Human\_resource, Information\_resource, Physical\_resource, а также Constraint. Класс Human\_resource содержит описание человеческих ресурсов, представленных в системе; класс Information\_resource – описание информационных ресурсов; класс Physical\_resource – описание физических ресурсов. Класс Constraint содержит ограничения, которые должны быть учтены в системе.



Онтология социокиберфизической системы

Cyber-physical-social system ontology

Классификация Social Space определяет социальную часть онтологии – третье пространство, включающее описание человека – одного из объектов социокиберфизической системы. Social Space состоит из класса Human, содержащего сведения о людях, которые могут участвовать в исполнении сценариев. Класс Human включает подкласс Human\_group. Класс Human\_group определяет группы экспертов, формируемые с учетом различных характеристик, таких как профессия, навыки, требования.

### 3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНКИ ОНТОЛОГИИ СОЦИОКИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В последнее время онтологический подход широко применяется в различных сферах (например, для выборки информации, объединения данных). В связи с этим появляется необходимость оценивать разрабатываемые онтологии. На данный момент данное направление является новым, существуют методы и шаблоны оценки онтологий. Например, в работах [8, 9] выделен ряд шагов, которые необходимо выполнить:

- выделить точку зрения, с которой следует формировать модель;
- выбрать параметры оценки;
- выбрать методику;

- выполнить оценку;
- подвести итоги, выводы по модели.

Также выделяются классы методов оценки в зависимости от средств анализа онтологий:

- анализ данных;
- оценки специалистов;
- по профилю применения;
- сопоставление с «золотым стандартом»;
- рассмотрение онтографа.

Методы, основанные на анализе данных, связаны с экспертными системами. Наиболее значимый компонент в такой системе – это база знаний. Полнота и непротиворечивость представленных в ней знаний определяет качество экспертной системы. В свою очередь, онтология может формировать основу экспертной системы, содержать ключевые понятия. Также онтология может являться основой объединения фактических знаний из базы знаний, которые требуются для работы экспертной системы [10].

Оценки специалистов – это совокупность мнений людей, компетентных в какой-либо сфере. На первом этапе составляется список критериев, на втором – проводится опрос [11].

Метод исследования профиля применения заключается в конкретизации интересов пользователя; профиль пользователя – структура, определенная на множестве интересов-категорий онтологии [12].

Метод сопоставления с «золотым стандартом» подразумевает нахождение мер подобия между подготовленной онтологией и уже существующей, принятой за эталон. Сходство между онтологиями вычисляют с помощью функции подобия [13]:  $\text{sim}: O \times O \rightarrow [0, 1]$ .

Метод рассмотрения онтографа заключается в рассмотрении основных показателей, связанных со структурой разработанной онтологии [14].

После рассмотрения существующих методов оценки онтологий был выбран метод рассмотрения топологии онтографа. Данный метод соответствует поставленной авторами цели оценки онтологии – выявление «узких» мест исходя из измеряемых показателей и выработка идей улучшения онтологии.

#### 4. ОЦЕНКА ОНТОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

При подготовке оценки были выделены следующие метрики, определяющие оценку разработанной онтологии: в табл. 1 представлены метрики, связанные с размерами онтологии, в табл. 2 – метрики, выявляющие критические ошибки онтологии, в табл. 3 – значения метрик Ингве–Миллера, которые связаны с эргономикой и восприятием онтологий.

Отметим, что такие показатели, как полнота и достаточность онтологии, достаточно сложно интерпретировать. Одинаковый набор фактов может быть истолкован по-разному в зависимости от рассматриваемых в ходе исследования вопросов. В данной статье рассматривается только показатель точности словаря предметной области, так как подготовленную онтологию планируется дополнять в зависимости от полученных результатов оценки.

Рассмотрим показатели, представленные в табл. 1. Показатель «Количество вершин графа онтологии» представляет собой совокупность всех классов онтологии; показатель «Максимальное расстояние от корневого узла онтологии» – подсчет всех дуг, в данном случае от класса Thing до подкласса Room класса Information Space. Одной из метрик, рассчитанных в табл. 1, является «Количество листьев дерева онтологии». Лист дерева онтологии (терминальная вершина) – одна из вершин корневого дерева, из листьев которого не выходит ни одна дуга [15]. Таким образом, производится подсчет всех классов, у которых нет подклассов. Для расчета показателя «Количество вершин дерева онтологии, у которых есть листья в непосредственных потомках» производится подсчет от класса Thing всех классов, у которых есть подклассы с последующими отношениями. Показатель «Количество дуг графа онтологии» – это совокупность всех связей между классами и подклассами онтологии (is\_a, associated with).

Далее рассмотрим показатели табл. 2, содержащей значения метрик, выявляющих критические ошибки онтологии. Цикл графа – путь, в котором начальная и конечная вершины совпадают. Длиной цикла называется число ребер в данном цикле [16]. Отметим, что в разработанной онтологии граф не содержит циклов. Также в ней отсутствуют вершины с несколькими родителями. Показатель «Количество вершин онтологий, имеющих листья среди детей» совпадает с показателем «Количество вершин дерева онтологии, у которых есть листья в непосредственных потомках» предыдущей таблицы. Получить значение «Количество вершин онтологий, имеющих только детей-листья» возможно благодаря подсчету вершин с подклассами, не имеющими выходящих дуг. Значение последнего показателя табл. 2 рассчитывается как отношение вершин, у которых имеются листья и нелистовые вершины, к показателю «Количество вершин онтологий, имеющих листья среди детей».

Далее рассмотрим показатели табл. 3, включающей в себя значения метрик Ингве–Миллера. Закономерность Ингве–Миллера заключается в возможности запомнить не более семи-деяти элементов одновременно ( $7 \pm 2$ ) [9].

Степень вершины – это количество дуг, выходящих из этой вершины; при этом авторы работы [9] замечают, что вершины с нормальной степенью – это такие вершины, у которых общее значение входящих и исходящих ребер не более девяти. В подготовленной онтологии показатель «Отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам» равен 1, т. е. все вершины онтологии в данном случае с нормальной степенью.

Под средней степенью вершины графа понимают значение ребер графа, проходящих через вершину [17].

Медиана – это некоторое значение, характеризующее выборку или набор чисел [18]. Показатель «Медиана степени вершины графа» дает определение вершине графа онтологии и рассчитывается при помощи расположения элементов выборки от большего к меньшему (или наоборот) и расчету среднего элемента. Показатель «Среднее квадратичное отклонение степени вершины графа» – это значение распределения показателей случайной величины относительно ее математического ожидания [18].

Таблица 1

Table 1

**Значения метрик размера онтологии****Value of ontology size metrics**

Метрика	Значение
Количество вершин графа онтологии	65
Максимальное расстояние от корневого узла онтологии	8
Количество листьев дерева онтологии	32
Количество вершин дерева онтологии, у которых есть листья в непосредственных потомках	14
Количество дуг графа онтологии	99

Таблица 2

Table 2

**Значения метрик, выявляющих критические ошибки онтологии****Values of metrics that show critical errors in ontologies**

Метрика	Значение
Количество различных циклов в графе	0
Количество вершин с несколькими родителями	0
Количество вершин онтологий, имеющих листья среди детей	14
Количество вершин онтологий, имеющих только детей-листья	12
Количество вершин, у которых есть и листья, и нелистовые вершины в качестве детей по отношению ко всему количеству вершин, у которых есть листья среди детей	1,9

Таблица 3

Table 3

**Значения метрик Ингве–Миллера****Values of Ingve–Miller metrics**

Метрика	Значение
Отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам	1
Средняя степень вершины графа	3,19
Медиана степени вершины графа	3,2
Среднее квадратичное отклонение степени вершины графа	0,99

Рассмотрим табл. 4 с описанием значений метрик глубины. Показатель «Минимальная глубина» измеряется с помощью подсчета кратчайшего пути от класса Thing до листа графа. Показатель «Максимальная глубина» – подсчет наиболее длинного пути от класса Thing до листа графа. Показатель «Средняя глубина» рассчитывается как отношение показателя «Абсолютная глубина» к количеству дуг онтологии вида «is-a». Показатель «Абсолютная глубина» – это сумма длин всех путей графа (где путь – это любая последова-

тельность соединенных между собой вершин, начинающаяся от корневой вершины и заканчивающаяся листом графа.

В данном случае показатель «Медиана глубины» определяет варианты глубины графа онтологии, т. е. показатель рассчитывается структурирование элементов выборки по возрастанию с взятием среднего. Последний показатель табл. 4 – это среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину.

В таблице 5 описываются значения метрик ширины. Рассмотрим следующие показатели. Показатель «Средняя ширина» – это отношение показателя «Абсолютная ширина» к количеству уровней иерархии. Показатель «Абсолютная ширина» – это сумма вершин для каждого уровня иерархии по всем уровням. Показатель «Максимальная ширина» равен количеству вершин на самом большом по количеству вершин уровне. Показатель «Среднее отношение ширины соседних уровней» является дополнительной метрикой оценки ширины онтологии. Показатель «Максимальное отношение ширины соседних уровней» – это метрика, включенная в анализ основных метрик, в рамках которой производится подсчет вершин по каждому уровню онтологии [9]. Показатель «Среднее квадратичное отклонение отношения ширины соседних уровней графа по отношению к среднему отношению ширины соседних уровней» характеризует рассеивание значений случайной величины относительно ее математического ожидания к среднему отношению ширины соседних уровней [18].

В таблице 6 представлены показатели значения метрик ветвистости. Рассмотрены показатели: «Среднее количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе», «Максимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе», «Минимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе» и «Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе». Показатель «Среднее количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе» вычисляется как среднее арифметическое количества подклассов у предпоследних вершин графа онтологии. Показатель «Максимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе» учитывает наибольшее количество подклассов у класса, являющегося предпоследним в графе.

Таблица 4

Table 4

### Значения метрик глубины

#### Values of depth metrics

Метрика	Значение
Минимальная глубина	3
Максимальная глубина	8
Средняя глубина	2,507
Медиана глубины	3
Среднее квадратичное отклонение глубины	4,3
Среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину	1,72

Таблица 5

Table 5

**Значения метрик ширины****Values of wideness metrics**

Метрика	Значение
Средняя ширина	8
Среднее отношение ширины соседних уровней	9,5
Максимальная ширина	19
Максимальное отношение ширины соседних уровней	16,5
Среднее квадратичное отклонение отношения ширины соседних уровней графа по отношению к среднему отношению ширины соседних уровней	0,511

Таблица 6

Table 6

**Значения метрик ветвистости****Values of branching metrics**

Метрика	Значение
Среднее количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе	2
Максимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе	5
Минимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе	1
Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе	10,6

Таблица 7

Table 7

**Оценки основных метрик для разработанной онтологии****Values of the main metrics for developed ontology**

Метрика	Значение
Количество различных циклов в графе	0
Количество вершин, имеющих несколько родителей, деленное на количество вершин в графе	0
Количество вершин, у которых есть и листья, и нелистовые вершины в качестве детей, по отношению ко всему количеству вершин, у которых есть листья среди детей	1,9
Отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам	1
Среднее квадратичное отклонение степени вершины графа	0,99
Среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину	1,72
Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе	10,6
Максимальное отношение ширины соседних уровней	16,5

Показатель «Минимальное количество детей-листьев у предпоследних вершин в графе» учитывает наименьшее количество подклассов у класса, являющегося предпоследним в графе. Показатель «Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе» определяет степень рассеивания значений случайной величины относительно ее математического ожидания.

Таким образом, были даны оценки основным метрикам онтологии. Наиболее важные представлены в табл. 7. Отметим, что критических ошибок подготовленная онтология не содержит, так как показатели «Количество различных циклов в графе» и «Количество вершин, имеющих несколько родителей, деленное на количество вершин в графе» имеют нулевые значения. Также важными являются показатель «Количество вершин, у которых есть и листья, и нелистовые вершины в качестве детей, по отношению ко всему количеству вершин, у которых есть листья среди детей», равный 1,9, и показатель «Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе», равный 10,6. Оба показателя характеризуют равномерность распределения вершин графа. Исходя из полученных результатов вершины графа распределены в онтологии неравномерно, последний уровень онтологии недостаточно сбалансирован. Показатель «Отношение количества вершин с нормальной степенью по отношению ко всем вершинам» относится к метрикам когнитивной эргономичности и равен 1. Таким образом, все вершины онтологии являются вершинами с нормальной степенью, а суммарное число входящих и исходящих ребер для каждой не превышает 9, что соответствует числу Ингве–Миллера ( $7 \pm 2$ ). Остальные показатели, представленные в табл. 7, являются дополнительными статистическими метриками. Они не являются обязательными, однако эксперты отмечают их универсальность, рекомендуют использовать в расчетах. Показатель «Среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину» равен 1,72. Отметим, что максимальная глубина состоит из восьми концептов, т. е. показатель соответствует требованиям эргономичности. Однако полученное значение предполагает дополнительный анализ веток онтологии. Абсолютное значение показателя «Среднее квадратичное отклонение степени вершины графа» равно 0,99, что отвечает требованию меньшего количества концептов, не соответствующих структуре онтологии. Показатель «Максимальное отношение ширины соседних уровней» – это обязательный показатель при формировании оценки онтологии. Предпочтительнее, чтобы значения показателя были небольшими. Отметим, что в данном случае значение 16,5 предполагает дополнительную проверку уровней иерархии онтологии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты разработки и оценки онтологии социо-киберфизической системы для функционирования на ее основе сценариев, ориентированных на совместную работу мобильных роботов. При подготовке онтологии были рассмотрены понятия онтологии и онтологического подхода, представлены типовые сценарии использования мобильных роботов, затем дано описание концептов и отношений разработанной онтологии. Далее были рассмотрены методы оценки и выбран метод исследования топологии графа. Проведенная оценка подтверждает валидность онтологии и отсутствие в ней критических ошибок. Однако часть полученных показателей недостаточно соответствует ожидаемым результатам. Отметим, что три показателя из пере-

численных зависят от масштаба онтологии. Показатель «Максимальное отношение ширины соседних уровней» (значение равно 16,5) в совокупности с другими, перечисленными ранее показателями ширины позволяет оценить сбалансированность подготовленной онтологии. Чем меньше это значение, тем равномернее расширение онтологии от уровня к уровню. Ожидаемый результат меньше или равен 13, так как онтология предметной области достаточно масштабна. Показатель «Среднее квадратичное отклонение детей-листьев у предпоследних вершин в графе» (значение равно 10,6) – это один из показателей, определяющих равномерность распределения вершин графа. При расчете учитывается количество подклассов у классов предпоследних уровней. Таким образом, разработанная онтология неравномерна (значение меньше или равное 8 более предпочтительно с точки зрения эргономики). Значение показателя «Среднее квадратичное отклонение глубины, деленное на среднюю глубину» (значение равно 1,72) характеризует восприятие онтологии при прочтении. Ожидаемый результат – сбалансированность длин ветвей дерева онтологии, значение меньше 1.

В дальнейшем авторы планируют провести дополнительный анализ полученных значений каждого критерия и адаптировать онтологию для системы логического вывода RDFox.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов О.Ю., Осипов Ю.М., Мецераков Р.В. Активная карданная передача как элемент киберфизической системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 934–938.
2. Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения / А.В. Архипкин, В.И. Комченков, Д.Н. Корольков, В.Ф. Петров, С.Б. Симонов, А.И. Терентьев // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 45. – С. 116–129.
3. Исследование и разработка проектного облика мобильной робототехнической системы для проведения геологической разведки на поверхности Луны / А.В. Васильев, А.С. Кондратьев, А.А. Градовцев, И.Ю. Даляев // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 45. – С. 141–156.
4. Smirnov A., Kashevnik A., Ponomarev A. Multi-level self-organization in cyber-physical-social systems: smart home cleaning scenario // Procedia CIRP. – 2015. – Vol 30. – P. 329–334.
5. Context-based coalition creation in human-robot systems: approach and case study / A. Smirnov, A. Kashevnik, M. Petrov, V. Parfenov // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10459. – P. 229–238.
6. Petrov M., Kashevnik A. Ontology-based indirect interaction of mobile robots for joint task solving: a scenario for obstacle overcoming // 12th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". – 2017. – Vol. 113. – P. 1–6.
7. Калязина Д.М., Федорова А.Е. Обоснование выбора онтологического подхода для построения моделей СММ и COBIT // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 2. – С. 115.
8. Hloman H., Stacey D. Approaches, methods, metrics, measures, and subjectivity in ontology evaluation: a survey // Semantic Web Journal. – 2014. – P. 1–11. – URL: <http://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj657.pdf> (accessed: 14.06.2019).
9. Болотникова Е.С., Гаврилова Т.А., Горовой В.А. Об одном методе оценки онтологий // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 3. – С. 98–110.
10. Смехун Я.А. Онтологии в системах, основанных на знаниях: возможности их применения // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5 (47), ч. 3. – С. 173–175.
11. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. В 3 ч. Ч. 2: учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 487 с.
12. Городецкий В.И., Тушканова О.Н. Онтологии и персонификация профиля пользователя в рекомендующих системах третьего поколения // Онтология проектирования. – 2014. – № 3 (13). – С. 7–31.

13. Vrandeć D. Ontology evaluation: PhD theses [Electronic resource]. – Karlsruhe, 2010. – 235 p. – URL: [http://simia.net/download/ontology\\_evaluation.pdf](http://simia.net/download/ontology_evaluation.pdf), (accessed: 14.06.2019).
14. Субъективные метрики оценки онтологий [Электронный ресурс] / Т.А. Гаврилова, В.А. Горовой, Е.С. Болотникова, В.В. Горелов // Знания–Онтологии–Теории (ЗОНТ-09): материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Новосибирск, 2009. – С. 178–186. – URL: [math.nsc.ru/conference/zont09/reports/39Gavrilova-Gorovoi-Bolotnikov-Gorelov.pdf](http://math.nsc.ru/conference/zont09/reports/39Gavrilova-Gorovoi-Bolotnikov-Gorelov.pdf) (accessed: 14.06.2019).
15. Графы и деревья [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/41/41/lecture/1237?page=3> (дата обращения: 14.06.2019).
16. Путь и цикл в графе [Электронный ресурс]. – URL: [https://lms2.sseu.ru/courses/eresmat/course2/razd5\\_2/par5\\_3k2.htm](https://lms2.sseu.ru/courses/eresmat/course2/razd5_2/par5_3k2.htm) (дата обращения: 14.06.2019).
17. Дискретная математика. Алгоритмы [Электронный ресурс]. – URL: <http://rain.ifmo.ru/cat/view.php/theory/graph-general/random-2005> (дата обращения: 14.06.2019).
18. Боровиков В. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.

*Калязина Дарья Михайловна*, аспирант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Основное направление научных исследований – онтологическое моделирование. Имеет 24 публикации. E-mail: [darya.kalyazina@mail.ru](mailto:darya.kalyazina@mail.ru)

*Кашевник Алексей Михайлович*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. Основное направление научных исследований – управление знаниями, облачные среды, человеко-машинное взаимодействие, робототехника, профилирование, онтологии, интеллектуальные пространства. Имеет более 150 научных публикаций. E-mail: [alexey@iias.spb.su](mailto:alexey@iias.spb.su)

*Darya Kalyazina*, PhD student of ITMO University. The main research topic is ontology 34odeling. She is the author of 24 research papers. E-mail: [darya.kalyazina@mail.ru](mailto:darya.kalyazina@mail.ru)

*Alexey Kashevnik*, PhD, senior researcher of SPIIRAS. The main research topics are knowledge management, cloud systems, human-computer interaction, robotics, user profiling, ontologies, and smart spaces. He is the author of more than 150 research papers. E-mail: [alexey@iias.spb.su](mailto:alexey@iias.spb.su)

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36

### ***Development and evaluation of cyber-physical-social system ontology based on the analysis of typical scenarios for mobile robots interaction \****

*D.M. KALYAZINA<sup>1,a</sup>, A.M. KASHEVNIK<sup>2,b</sup>*

<sup>1</sup> *ITMO University, 49, Kronverksky Prospekt, St. Petersburg, 197101, Russian Federation*

<sup>2</sup> *St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, 39, 14 Line, Russian Federation*

<sup>a</sup> *[darya.kalyazina@mail.ru](mailto:darya.kalyazina@mail.ru)*    <sup>b</sup> *[alexey@iias.spb.su](mailto:alexey@iias.spb.su)*

#### **Abstract**

The paper describes typical scenarios for mobile robots utilization. Scenarios cover the main processes of robot interaction such as interaction of vacuum cleaners and robots while cleaning premises, interaction of two robots to collect an object from components, and finally interaction between the manipulating robot and the measuring robot aimed at region studying, overcoming obstacles, and carrying out manipulations. The main processes that occur in these

---

\* *Received 26 October 2018.*

*Research is carried out in SPIIRAS with financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grants ## 16-29-04349 and 19-07-00670) and the Russian State Research # 0073-2019-0005.*

scenarios are interaction between robots and humans for joint tasks performing. The paper presents a detailed description of the ontology of socio-cyberphysical system based on the analysis of the above scenarios. The paper also discusses the rules of ontological evaluation. The existing methods of evaluation are described, with their division into classes depending on the means of ontological analysis. Evaluation of the developed ontology has been conducted on the basis of the graph topology study. The evaluation has confirmed that the developed ontology does not contain critical problems and generally satisfies the main evaluation indicators such as the number of different cycles in the graph, the number of vertices with multiple parents, the number of vertices in the graph, the ratio of the number of vertices with normal degree in relation to all vertices, and the average quadratic deviation of the degree of the top of the graph. However, a number of values of the main indicators exceed the expected values, for example, the maximum ratio of the width of the adjacent levels, the mean square deviation of the leaf children at the penultimate vertices in the graph, and the mean square deviation of the depth divided by the average depth. Therefore, further work on the ontology revision is expected. It is planned to analyze the criteria that do not meet the requirements and then to offer possible options for the improvement of the ontology. It is also necessary to review the editors and select a logical inference system for further research.

**Keywords:** socio-cyberphysical system, mobile robots, ontology, ontograph, ontology evaluation, ontology evaluation methods

## REFERENCES

1. Osipov O.Yu., Osipov Yu.M., Mescheryakov R.V. Aktivnaya kardannaya peredacha kak element kiberfizicheskoi sistemy [Active driveline as an element of cyber-physical system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroyeniye – Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 11, pp. 934–938.
2. Arkhipkin A.V., Komchenkov V.I., Korolkov D.N., Petrov V.F., Simonov S.B., Terentev A.I. Zadachi gruppovogo upravleniya robotami v robototekhnicheskoy komplekse pozharotusheniya [Problems of group control of robots in the robotic complex of fire extinguishing]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2016, iss. 45, pp. 116–129.
3. Vasiliev A.V., Kondratyev A.S., Gradovtsev A.A., Dalyaev I.Yu. Issledovanie i razrabotka proektnogo oblika mobil'noi robototekhnicheskoi sistemy dlya provedeniya geologicheskoi razvedki na poverkhnosti Luny [Research and development of design shape of a mobile robotic system for geological exploration on the Moon's surface]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2016, iss. 45, pp. 141–156.
4. Smirnov A., Kashevnik A., Ponomarev A. Multi-level self-organization in cyber-physical-social systems: smart home cleaning scenario. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 30, pp. 329–334.
5. Smirnov A., Kashevnik A., Petrov M., Parfenov V. Context-based coalition creation in human-robot systems: approach and case study. *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 10459, pp. 229–238.
6. Petrov M., Kashevnik A. Ontology-based indirect interaction of mobile robots for joint task solving: a scenario for obstacle overcoming. *12th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*, 2017, vol. 113, pp. 1–6.
7. Kalyazina D.M., Fedorova A.E. Obosnovanie vybora ontologicheskogo podkhoda dlya postroyeniya modelei CMMI i COBIT [The substantiation of choice ontological approach for engineering models CMMI and COBIT]. *Mezhdunarodnyi studentcheskii nauchnyi vestnik – International Student Science Journal*, 2016, no. 2, p. 115.
8. Hloman H., Stacey D. Approaches, methods, metrics, measures, and subjectivity in ontology evaluation: a survey. *Semantic Web Journal*, 2014, pp. 1–11. Available at: <http://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj657.pdf> (accessed 14.06.2019).
9. Bolotnikova E.S., Gavrilova T.A., Gorovoy V.A. To a method of evaluating ontologies. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 3, pp. 448–461. Translated from *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2011, no. 3, pp. 98–110.
10. Smekhun Ya.A. Ontologii v sistemakh, osnovannykh na znaniyakh: vozmozhnosti ikh primeneniya [Ontologies in the knowledge based systems: possibilities of their application]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal – International Research Journal*, 2016, no 5 (47), pt. 3, pp. 173–175.

11. Orlov A.I. *Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie*. V 3 ch. Ch. 2 [Organizational and economic modeling. In 3 pt. Pt. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 487 p.
12. Gorodetsky V.I., Tushkanova O.N. Ontologii i personifikatsiya profilya pol'zovatelya v rekomenduyushchikh sistemakh tret'ego pokoleniya [Ontology-based user profile personification in 3G recommender systems]. *Ontologiya proektirovaniya – Ontology of Designing*, 2014, no. 3 (13), pp. 7–31.
13. Vrandečić D. *Ontology evaluation*: PhD theses. Karlsruhe, 2010. 235 p. Available at: [http://simia.net/download/ontology\\_evaluation.pdf](http://simia.net/download/ontology_evaluation.pdf) (accessed 14.06.2019).
14. Gavrilova T.A., Gorovoy V.A., Bolotnikova E.S., Gorelov V.V. [Subjective metrics of ontology assessment]. *Znaniya-Ontologii-Teorii (ZONT-09): materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Knowledge-Ontology-Theory: materials of the All-Russian conference with international participation], Novosibirsk, 2009, pp. 178–186. (In Russian). Available at: <http://math.nsc.ru/conference/zont09/reports/39Gavrilova-Gorovoi-Bolotnikov-Gorelov.pdf> (accessed 14.06.2019).
15. *Grafy i derev'ya* [Graphs and trees]. Available at: <http://www.intuit.ru/studies/courses/41/41/lecture/1237?page=3> (accessed 14.06.2019).
16. *Put' i tsikl v grafe* [Path and cycle in the graph]. Available at: [https://lms2.sseu.ru/courses/eresmat/course2/razd5\\_2/par5\\_3k2.htm](https://lms2.sseu.ru/courses/eresmat/course2/razd5_2/par5_3k2.htm) (accessed 14.06.2019).
17. *Diskretnaya matematika. Algoritmy* [Discrete mathematics. Algorithms]. Available at: <http://rain.ifmo.ru/cat/view.php/theory/graph-general/random-2005> (accessed 14.06.2019).
18. Borovikov V. *Statistika. Iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere* [Statistica. The art of analyzing data on a computer]. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnaya-model-nepreryvno-professionalno-orientirovannoy-podgotovki-spetsialistov-sotsialnoy-sfery-dlya-ugolovno.pdf> (accessed 14.06.2019).

Для цитирования:

Разработка и оценка онтологии социокберфизической системы на основе анализа типовых сценариев использования мобильных роботов / Д.М. Калязина, А.М. Кашевник // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 21–36. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36.

For citation:

Kalyazina D.M., Kashevnik A.M. Razrabotka i otsenka ontologii sotsiokiberfizicheskoi sistemy na osnove analiza tipovykh stsenariy ispol'zovaniya mobil'nykh robotov [Cyber-physical-social system ontology development and evaluation based on the analysis of typical scenarios for mobile robots interaction]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 21–36. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-21-36.