МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«Южно-Уральский государственный университет»**

**(национальный исследовательский университет)**

**Высшая школа электроники и компьютерных наук**

**Кафедра системного программирования**

|  |  |
| --- | --- |
| РАБОТА ПРОВЕРЕНА  Рецензент  Рецензент рецензент  ООО «Рецензент рецензент»  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ И.О. Фамилия  «\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2019 г. | ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  Заведующий кафедрой, д.ф.-м.н., профессор  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Л.Б. Соколинский  «\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2019 г. |

**РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НА ОСНОВЕ РЕСУРСОВ ОБЛАЧНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ – 02.03.02.2019.13-018-1382.ВКР

|  |  |
| --- | --- |
|  | Научный руководитель кандидат физ.-мат. наук, доцент  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Г.И. Радченко  Автор работы, студент группы КЭ-401  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Р.А. Бобин  Ученый секретарь  (нормоконтролер)  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ О.Н. Иванова  «\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2019 г. |

Челябинск-2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«Южно-Уральский государственный университет»**

**(национальный исследовательский университет)**

**Высшая школа электроники и компьютерных наук**

**Кафедра системного программирования**

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой СП

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Л.Б. Соколинский

09.02.2019

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра**

студенту группы КЭ-401

Бобину Ростиславу Алексеевичу,

обучающемуся по направлению

02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии»

1. **Тема работы** (утверждена приказом ректора от 28.04.2017 № 835)

Разработка прототипа цифрового двойника на основе ресурсов облачной вычислительной платформы.

1. **Срок сдачи студентом законченной работы:** 01.06.2019.
2. **Исходные данные к работе**
3. K. Borodulin, G. Radchenko, A. Shestakov, L. Sokolinsky, A. Tchernykh, R. Prodan, "Towards Digital Twins Cloud Platform: Microservices and Computational Workflows to Rule a Smart Factory", Proc. the10th Int. Conf. Util. Cloud Comput. - UCC '17, pp. 209-210, December 2017.
4. G. Radchenko, A. Alaasam, A. Tchernykh, “Micro-Workflows: Kafka and Kepler fusion to support Digital Twins of Industrial Processes”, IEEE/ACM Int. Conf. Util. Cloud Comput. – UCC '18, pp. 83-88, December 2018.
5. **Перечень подлежащих разработке вопросов**
6. Обзор научной литературы и существующих решений Интернета вещей для создания цифровых двойников.
7. Изучение технологий, предоставляемых облачными вычислительными платформами, для создания цифровых двойников.
8. Разработка и тестирование прототипа цифрового двойника.
9. **Дата выдачи задания:** 09.02.2019.

**Научный руководитель**

Доцент кафедры СП,

кандидат физико-математических наук Г.И. Радченко

**Задание принял к исполнению** Р.А. Бобин

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

[1. ГЛОССАРИЙ 5](#_Toc5361833)

[2. ВВЕДЕНИЕ 6](#_Toc5361834)

[3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ 9](#_Toc5361835)

[3.1 Концепция интернета вещей, облачных вычислений и цифровых двойников 9](#_Toc5361836)

[3.2 Технологии обработки данных Интернета вещей 11](#_Toc5361838)

[3.2.1 Microsoft Azure 12](#_Toc5361839)

[3.2.2 Amazon Web Services 13](#_Toc5361840)

[4. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ 15](#_Toc5361841)

[4.1 Данные устройств IoT 15](#_Toc5361842)

[5. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ 16](#_Toc5361843)

[6. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ 16](#_Toc5361844)

[7. ТЕСТИРОВАНИЕ 16](#_Toc5361845)

[8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ 16](#_Toc5361846)

[9. ЛИТЕРАТУРА 16](#_Toc5361847)

[10. ПРИЛОЖЕНИЯ 19](#_Toc5361848)

# ГЛОССАРИЙ

# ВВЕДЕНИЕ

Концепция Интернета вещей (IoT) не нова, однако особенную популярность она приобрела именно в последние годы. Данная концепция представляет собой вычислительную сеть физических предметов, оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой [1]. Общий мировой объем капиталовложений в IoT в 2018 году составил 646 миллиардов долларов США. Прогноз на 2019 год — 745 миллиардов долларов США, на 2022 — более 1 триллиона долларов [2].

Развитие распределенной сетевой инфраструктуры в автоматизированных системах управления технологическим процессом привело к появлению Промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things ‑ IIoT) — концепции взаимосвязи датчиков, приборов и других устройств, объединенных в сеть с промышленными приложениями компьютеров, включая, помимо прочего, управление производством и энергопотреблением. Такая связь позволяет собирать данные и анализировать их, что потенциально способствует повышению производительности и эффективности, а также другим экономическим преимуществам [3]. Одним из преимуществ внедрения этого подхода является возможность создания цифрового двойника (Digital Twin) разрабатываемой системы. Цифровой двойник — это иерархическая система математических моделей, вычислительных методов и программного обеспечения, которая обеспечивает синхронизацию между состоянием реально существующего процесса или системы и сопутствующей виртуальной копией [4,7].

Благодаря развитию облачных технологий появилась возможность создать инфраструктуру хранения данных, способную поддерживать Интернет вещей. Публичные облачные платформы предоставляют множество решений для цифрового преобразования бизнеса. Гибкость и автоматизированность полученной среды достигается за счет использования прикладных программных интерфейсов (API). Это позволяет различным устройствам и системам взаимодействовать между собой, даже если они работают на основе разных стандартов и протоколов [5].

Применение облачных технологий может упростить обработку сверхбольших баз данных, генерируемых устройствами Интернета вещей. Это показывает необходимость изучения инструментов облачных платформ для разработки приложений, обрабатывающих данные с устройств IoT. Одними из возможных решений являются облачные платформы Microsoft Azure [18] и Amazon Web Services [19]. Ключевым преимуществом данных платформ является широкий набор инструментов, в частности, для создания решений Интернета вещей и цифровых двойников.

*Целью данной работы* является реализация и тестирование прототипа цифрового двойника на основе ресурсов облачной вычислительной платформы.

Для достижения цели работы, необходимо решить следующие задачи:

* провести обзор научной литературы и существующих решений Интернета вещей для создания цифровых двойников;
* изучить технологии, предоставляемые облачными вычислительными платформами, для создания цифровых двойников;
* разработать и протестировать прототип цифрового двойника.

**Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, X разделов, заключения, библиографии и X приложений. Объем работы составляет XX страницы, объем библиографии – XX источников, объем приложений – XX страниц.

Первая глава содержит описание концепции Интернета вещей, облачных вычислений и цифровых двойников.

Во второй главе проводится анализ предметной области, обзор существующих работ по теме создания цифровых двойников на основе облачных вычислительных ресурсов.

В третьей главе описана модель прототипа цифрового двойника, определены требования к системе и варианты использования.

В четвертой главе приведены архитектура системы и используемые в работе алгоритмы.

Пятая глава описывает детали реализации прототипа.

В шестой главе приводятся результаты тестирования разработанного прототипа.

В заключении сделаны выводы о проделанной работе.

Приложение 1 содержит ….

Приложение 2 содержит …..

Приложение 3 …..

# ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

## Концепция интернета вещей, облачных вычислений и цифровых двойников

Интернет вещей представляет собой сеть физических объектов, которые содержат встроенные технологии для связи, восприятия или взаимодействия со своими внутренними состояниями или внешней средой [1]. Появление этой концепции представляет новую эру в области вычислительной техники и технологий [10]. Лидерами по объему инвестиций в Интернет вещей в России к 2020 году, по прогнозу IDC, будут производственный сектор и транспортные компании [8].

Благодаря применимости подхода интернета вещей к различным производственным процессам, появилось множество наполненных новым содержанием и возможностями терминов, описывающих существовавшие ранее подходы [9]. Так, в дополнение к автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУ ТП) появляется концепция промышленного Интернета вещей. Данная концепция предлагает использование взаимосвязанных датчиков, приборов и других устройств, объединенных в сеть с промышленными приложениями компьютеров, включая, помимо прочего, управление производством и энергопотреблением [22]. Это обеспечивает сбор, обмен и анализ данных, что потенциально способствует повышению производительности и эффективности, а также другим экономическим преимуществам [3].

Одним из подходов к применению IIoT является концепции «Индустрия 4.0» (Industry 4.0) [11]. Согласно концепции Индустрии 4.0, экономика находится на пороге четвертой промышленной революции. Ее ключевые моменты — внедрение киберфизических систем в промышленные процессы и переход к персонализированному производству [11]. Киберфизические системы характеризуются наличием двусторонней связи между физическими процессами и управляющими программами [9]. Элементы такой системы могут находиться как рядом, например, в одной производственной зоне, так и далеко друг от друга, а взаимодействие между ними — осуществляться на всех стадиях «жизненного цикла» (планирование, производство, эксплуатация, ремонт, утилизация).

Сбор и анализ собираемой информации могут служить множеству целей: диагностика состояния, прогнозирование необходимости тех или иных изменений, автоматическая настройка, адаптация и пр. Одним из подходов реализации киберфизических систем является концепция цифровых двойников (Digital Twin – DT), которая поддерживает виртуальные модели реального оборудования, производственных процессов и конечных продуктов. В данной концепции используются методы анализа данных с различных типов датчиков, установленных на объектах, для настройки и актуализации их виртуального состояния. Также в DT используются различные математические модели для моделирования интересующих процессов с использованием статистических методов, интеллектуального анализа данных, метода конечных элементов и т. д. [12].

При переходе к модели Индустрии 4.0 акцент будет смещаться на аналитику. Все шире станут использоваться преимущества облачной модели, средства машинного обучения и когнитивные вычисления. Облачные вычисления (англ. cloud computing) — это модель обеспечения удобного сетевого доступа по требованию к некоторому общему фонду конфигурируемых вычислительных ресурсов (например, сетям передачи данных, серверам, устройствам хранения данных, приложениям и сервисам — как вместе, так и по отдельности), которые могут быть оперативно предоставлены и освобождены с минимальными эксплуатационными затратами или обращениями к провайдеру [13]. При этом в платформах IoT активнее будут применяться открытые программные интерфейсы API для обмена данными с другими системами, а также различные приложения с открытым программным кодом. Увеличение обратных связей существенно расширит возможности систем. Облачные вычисления способны справиться с обработкой большого количества данных, которые поставляют устройства IoT, однако разные модели обработки требуют разных вычислительных ресурсов, а разные данные требуют разных подходов к их обработке и защите [10].

Следовательно, важной тенденцией станут перенос интеллекта ближе к конечным устройствам и наделение их все большими возможностями. Несмотря на эффективность облачной модели, ситуация, когда анализ данных и выработка управляющих воздействий происходят где-то далеко в крупном ЦОДе, для многих задач является нежелательной [24]. Передача трафика до ЦОДа и обратно может привести к недопустимым задержкам там, где требуется быстрая реакция (производственные процессы, системы безопасности, взаимодействие автомобиля с дорожной инфраструктурой и пр.).

Как следствие, наряду с переносом интеллекта в крупные центры обработки данных формируется обратный процесс, получивший название «туманные вычисления» (Fog computing), когда анализ собираемых данных и выработка управляющих воздействий происходят в узлах, максимально приближенных к конечным устройствам [14]. В будущем все в большей степени анализ будет производиться самими устройствами, что позволит минимизировать задержку на принятие решений и повысит автономность устройств. Только технологии гибридных облачных сред могут решить поставленные перед концепцией цифровых двойников задачи.

## Технологии обработки данных Интернета вещей

Применение облачных технологий может упростить обработку данных, генерируемых устройствами Интернета вещей. В этом разделе мы рассмотрим концепцию пространственного интеллектуального графа, как один из самых распространенных методов проектирования систем обработки данных IoT на сегодняшний день, а также рассмотрим возможности по реализации приложений обработки данных IoT на базе наиболее применяемых на сегодняшний день публичных облачных платформ: Microsoft Azure и Amazon Web Services. Ключевым преимуществом данных платформ является широкий набор инструментов, в частности, для создания решений Интернета вещей и цифровых двойников.

### Концепция пространственного интеллектуального графа

Данная концепция представляет физические среды и связанные устройства, датчики и пользователей в виде моделей, хранящихся в виде пространственного интеллектуального графа. Это помогает эффективно моделировать взаимосвязи и взаимодействия между людьми, пространствами и устройствами [23]. Модели создают пользователи, которые хотят адаптировать решение к своим конкретным потребностям. Вместе эти предварительно определенные объектные модели Digital Twins составляют онтологию. В онтологии могут быть описаны регионы, площадки, этажи, офисы, зоны, конференц-залы и фокус-комнаты, разные электростанции, подстанции, энергетические ресурсы и потребители. Объектные модели и онтологии Digital Twins позволяют персонализировать разные сценарии и потребности. Можно выделить следующие основные категории объектов Digital Twins:

* *Пространства* являются виртуальными или физическими расположениями;
* *Устройства* являются виртуальными или физическими единицами оборудования, например, Raspberry Pi 3
* *Датчики* являются объектами, которые позволяют обнаруживать события;
* *Пользователи* представляют собой жильцов и их характеристики;
* *Ресурсы* присоединены к пространству и обычно представляют ресурсы Azure для использования объектами в пространственном графе, например, IoTHub [26];
* *Онтологии* представляют наборы расширенных типов;
* *Роли* — это наборы разрешений, которые назначаются пользователям и устройствам в пространственном графе, например, администратор здания;
* *Определяемые пользователем функции* позволяют настраивать обработку телеметрии датчика в пространственном графе, например, задать значение датчика или отправлять уведомления, когда выполняются предварительно определенные условия;
* *Конечные точки* — это расположения, в которые направляются сообщения телеметрии и события Digital Twins, например, Event Hub [27];
* *Сопоставители* являются объектами, которые определяют, какие определяемые пользователем функции выполняются для заданного сообщения телеметрии.

Пространственный граф — это иерархический граф пространств, устройств и людей, определенных в объектной модели Digital Twins. Пространственный граф поддерживает наследование, фильтрацию, обход, масштабируемость и расширяемость. Взаимодействие с пространственным графом и управление им осуществляется с помощью коллекции REST API [28].

Описываешь (списком) из чего состоит такой граф.

Добавить схему графа + добавить пример конкретного графа и рассмотреть, что он собой представляет.

### Microsoft Azure

Azure Digital Twins от Microsoft представляет собой службу Интернета вещей, с помощью которой можно создать комплексные модели физического окружения в виде пространственных интеллектуальных графов для моделирования связей и взаимодействий между людьми, пространствами и устройствами [19]. Azure Digital Twins имеет следующие ключевые возможности:

* *пространственный интеллектуальный граф* является виртуальным представлением физического окружения. С его помощью можно воспроизводить зависимости из реального мира путем моделирования связей между пользователями, расположениями и устройствами. Кроме того, Digital Twins требует, чтобы каждая часть получаемых данных телеметрии была связана с датчиком в пространственном графе. Это позволяет объединять данные из многих разрозненных источников в некое единое физическое пространство [15];
* *цифровые модели объектов двойников* — это предопределенные протоколы устройств и схема данных. Они представляют потребности определенной предметной области решения, чтобы ускорить и упростить разработку;
* *расширенные вычислительные ресурсы* благодаря возможности определять и запускать пользовательские функции в отношении входящих данных устройства для отправки сигналов в заранее определенные конечные точки;
* *встроенное управление доступом* с помощью функций управления доступом и идентификацией, такие как управление доступом на основе ролей и Azure Active Directory.

Технология Azure Digital Twins использует Azure IoT Hub для связи устройств и сенсоров IoT с физической средой. На рис.1 изображена схема взаимодействия Azure Digital Twins с другими инструментами Azure IoT.

|  |
| --- |
|  |
| Рис.1. Схема взаимодействия сервисов Azure IoT между собой |

### Amazon Web Services

AWS IoT Things Graph — продукт в инфраструктуре облака от Amazon [20]. Этот сервис позволяет создавать автоматизированные системы Интернета вещей, позволяющие осуществлять связь между веб-сервисами и физическими устройствами, использующими различные протоколы, форматы данных и синтаксис сообщений [16]. Данное решение предоставляет мощное средство визуализации построенного графа с возможностью редактирования связей между устройствами и приложениями прямо в редакторе потоков данных. Продукт представлен следующими тремя ключевыми концепциями:

* *модель.* Это абстракция, представляющее устройство как набор действий (входов), событий (выходов) и состояний (атрибутов). Модель отделяет интерфейс устройства от его базовой реализации;
* *отображение*. Отображение представляет информацию, которая позволяет AWS IoT Things Graph преобразовать вывод сообщения одного объекта в ожидаемый ввод другого. Это устраняет различия объектов и позволяет создавать приложения IoT, в которых используется множество объектов;
* *поток*. Поток состоит из последовательности взаимодействий между устройствами и web-сервисами, которые необходимы для выполнения задачи. Потоки позволяют определять связанные действия, необходимые для автоматизации задач.

# МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

## Данные устройств IoT

В качестве источника данных было принято решение использовать проект Low Carbon Project [21] обеспечивающий систему смс-оповещения клиентов о текущей динамической тарифной стоимости электроэнергии. В рамках проекта, потребителям отправлялись сигналы о высокой цене энергопотребления для снижения нагрузки на локальные распределительные сети в течение периодов высокой загруженности. Проект был реализован Британскими электросетями (UK Power Networks) в Лондоне в период с ноября 2011 года по февраль 2014 года. Выбранный набор данных представляет собой показатели энергопотребления для выборки из 5567 лондонских домов, оснащенных датчиками потребления энергии. Чтение данных проводилось с получасовыми интервалами. Набор данных содержит потребление энергии, в кВт/ч (за полчаса), уникальный идентификатор домохозяйства, дату и время, а также тарифную группу. Можно выделить несколько задач, образующихся при анализе этих данных:

* сегментация дневного потребления энергии;
* разбивка кривой электрической нагрузки;
* прогнозирование потребления электроэнергии домами;
* исследование различий последствий использования; электрической и аккумуляторной систем отопления;
* прогнозирование потребления электроэнергии в масштабе города;

Для разработки цифрового двойника был использован выше описанный набор данных [25], представляющий собой файл формата CSV, описанный в табл. 1.

Табл. 1. Схема исходного набора данных

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| LCLid | stdorToU | DateTime | KWH/hh | Acorn | Acorn\_grouped |
| MAC000002 | Std | 2012-10-12 00:30:00.0000000 | 0.143 | ACORN-A | Affluent |
| MAC000006 | ToU | 2012-10-28 16:30:00.0000000 | 0.013 | ACORN-Q | Adversity |
| MAC000027 | Std | 2013-08-13 15:00:00.0000000 | 0.41 | ACORN-H | Comfortable |
| MAC000032 | Std | 2013-09-11 12:00:00.0000000 | 0.112 | ACORN-J | Comfortable |

Рассмотрим подробнее поля представленной таблицы:

* *LCLid* — уникальный идентификатор квартиры;
* *stdorToU —* тарифный план квартиры;
* *DateTime* — время очередного сбора данных с iot-устройства;
* *KWH/hh* — показания iot-устройства, отображающие количество потребленных киловатт электроэнергии за 30 минут;
* *Acorn* — текущая категория квартиры по шкале Acorn;
* *Acorn\_grouped* — статус текущего энергопотребления по шкале Acorn.

## Требования к системе Цифровой двойник «Энергопотребление»

На основании анализа предметной области и описания модели системы были определены следующие функциональные требования к проектируемой системе:

* система должна предоставлять информацию по запросу пользователей о количестве потребленной ими электроэнергии в текущий момент и в заданный промежуток времени;
* система должна предоставлять интерфейс добавления новых пользователей, районов, устройств и удаления старых;
* система должна оповещать пользователей при выполнении заранее определенных условий;

## Варианты использования системы

В ходе анализа проектируемой системы были выявлены основные варианты использования, которые представлены на рисунке 2.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 2.** Диаграмма вариантов использования системы Цифровой двойник |

Были выделены следующие основные актеры, взаимодействующие с системой:

* «Администратор системы» – это актор, отвечающий за добавление пользователей и устройств;
* «Пользователь» – это актор, имеющий доступ к результату обработки данных, полученных с его устройства.

Для данных актеров были определены следующие основные варианты использования системы:

* «Добавить пользователя» – добавить в систему нового пользователя;
* «Добавить район» – добавить в систему новую группу пользователей, составляющую район;
* «Добавить источник данных» – добавить в систему новое устройство или сенсор;
* «Посмотреть среднее энергопотребление за промежуток» – предоставить пользователю расширенную информацию о потребляемой им энергии за определенный промежуток времени;
* «Оповестить пользователя о неэффективном энергопотреблении» – отправить уведомление пользователю по электронной почте при выполнении заранее определенного условия, например, превышения потребления заданного количества энергии;
* «Посмотреть текущее энергопотребление» – предоставить пользователю расширенную информацию о текущей потребляемой им энергии.

TodoСпецификация вариантов использования приведена в приложении 1.

Берем конкретные данные

Берем конкретную задачу (визуализация этих данных, прогнозирование, анализ)

Варианты использования, акторы.

Разработка и тестирование прототипа цифрового двойника

# АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

# РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

## Импорт данных

# ТЕСТИРОВАНИЕ

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

# ЛИТЕРАТУРА

1. Internet Of Things. Gartner IT glossary. Gartner (5 May 2012). [Электронный ресурс] URL: https://www.gartner.com/it-glossary/internet-of-things/ (дата обращения: 04.02.2019).
2. IDC Forecasts Worldwide Spending on the Internet of Things in 2019. [Электронный ресурс] URL: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS44596319/> (дата обращения: 04.02.2019).
3. Boyes, Hugh; Hallaq, Bil; Cunningham, Joe; Watson, Tim. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. Computers in Industry, October, 2018. Vol. 101. – P. 1–12.
4. K. Borodulin, G. Radchenko, A. Shestakov, L. Sokolinsky, A. Tchernykh, R. Prodan, "Towards Digital Twins Cloud Platform: Microservices and Computational Workflows to Rule a Smart Factory", Proc. the10th Int. Conf. Util. Cloud Comput. - UCC '17, pp. 209–210, December 2017.
5. Интернет вещей: Будущее уже здесь. С. Грингард. М.: Альпина Паблишер, 2016. – 188 с.
6. Документация по Microsoft Azure. Micrisift Docs. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/> (дата обращения: 04.02.2019).
7. G. Radchenko, A. Alaasam, A. Tchernykh, “Micro-Workflows: Kafka and Kepler fusion to support Digital Twins of Industrial Processes”, IEEE/ACM Int. Conf. Util. Cloud Comput. – UCC '18, pp. 83-88, December 2018.
8. Е. Семеновская. Индустриальный интернет вещей. Перспективы российского рынка. [Электронный ресурс] URL: <https://www.company.rt.ru/projects/IIoT/study_IDC.pdf/> (дата обращения 27.02.2019).
9. А. Барсков. Промышленный интернет вещей. Готовы ли сети? Журнал сетевых решений/LAN. [Электронный ресурс] URL: https://www.osp.ru/lan/2016/09/13050308/ (дата обращения 26.02.2019).
10. А. Барсков. IoT как инструмент цифровой экономики. Журнал сетевых решений/LAN. [Электронный ресурс] URL: https://www.osp.ru/lan/2017/05/13052169/ (дата обращения 26.02.2019).
11. J. Lee, B. Bagheri, and H. Kao, “A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems,” Manufacturing Letters, vol. 3. pp. 18–23, 2015.
12. P. Korambath, J. Wang, A. Kumar, J. Davis, R. Graybill, B. Schott, and M. Baldea, “A smart manufacturing use case: Furnace temperature balancing in steam methane reforming process via kepler workflows,” Procedia Comput. Sci., vol. 80, pp. 680–689, 2016.
13. Mell, Peter and Grance, Timothy. The NIST Definition of Cloud Computing (англ.). Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. NIST (20 October 2011).
14. Bar-Magen Numhauser, Jonathan (2012). Fog Computing introduction to a New Cloud Evolution. Escrituras silenciadas: paisaje como historiografía. Escrituras Silenciadas: Paisaje Como Historiografía / José Francisco Forniés Casals (Ed. Lit.), Paulina Numhauser (Ed. Lit.), Proceedings from the Cies Iii Congress, January 2012. Spain: University of Alcala. pp. 111–126.
15. Azure Digital Twins Documentation. [Электронный ресурс] URL: https://docs.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/ (дата обращения 11.02.2019).
16. AWS IoT Things Graph Documentation. [Электронный ресурс] URL: https://docs.aws.amazon.com/en\_us/thingsgraph/latest/ug/iot-tg-whatis.html/ (дата обращения 13.02.2019).
17. Microsoft Azure Portal. [Электронный ресурс] URL: <https://portal.azure.com/> (дата обращения 10.02.2019).
18. Amazon Web Services Management Console. [Электронный ресурс] URL: <https://aws.amazon.com/console/> (дата обращения 10.02.2019).
19. Azure Digital Twins Overview. [Электронный ресурс] URL: https://azure.microsoft.com/en-us/services/digital-twins/ (дата обращения 10.02.2019).
20. AWS IoT Things Graph Overview. [Электронный ресурс] URL: https://aws.amazon.com/ru/iot-things-graph/ (дата обращения 10.02.2019).
21. SmartMeter Energy Consumption Data in London Households. [Электронный ресурс] URL: https://data.london.gov.uk/dataset/smartmeter-energy-use-data-in-london-households/ (дата обращения 27.03.2019).
22. K. Rose, S. Eldridge, L. Chapin The internet of things: an overview Internet Soc. (2015), p. 7.
23. Основные сведения об объектных моделях и пространственном интеллектуальном графе в Digital Twins. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/digital-twins/concepts-objectmodel-spatialgraph/> (дата обращения 28.03.2019).
24. F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli, “Fog Computing and Its Role in the Internet of Things,” in Proceedings of ACM MCC, 2012, pp. 13–16.
25. Low Carbon London webpage. [Электронный ресурс] URL: <http://innovation.ukpowernetworks.co.uk/innovation/en/Projects/tier-2-projects/Low-Carbon-London-(LCL)/> (дата обращения 16.04.2019).
26. Azure IoT Hub Documentation. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/iot-hub/> (дата обращения 16.04.2019).
27. Azure Event Hubs. [Электронный ресурс] URL: <https://azure.microsoft.com/ru-ru/services/event-hubs/> (дата обращения 16.04.2019).
28. Digital Twins Service Management APIs. [Электронный ресурс] URL: <https://azuredigitaltwinsexample.northeurope.azuresmartspaces.net/management/swagger/ui/index/> (дата обращения 12.03.2019).

# ПРИЛОЖЕНИЯ