МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ 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  IT-архитектор  ByndyuSoft  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Бындю  «\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2019 г. | ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  Заведующий кафедрой, д.ф.-м.н., профессор  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Л.Б. Соколинский  «\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2019 г. |

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА ОСНОВЕ РЕСУРСОВ ОБЛАЧНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ – 02.03.02.2019.115-081.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 НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ 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 25.04.2019 № 899)

Разработка технологии создания цифровых двойников 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**

[ВВЕДЕНИЕ 6](#_Toc11069177)

[1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ 9](#_Toc11069178)

[1.1. Концепция Интернета вещей, облачных вычислений и цифровых двойников 9](#_Toc11069179)

[1.2. Технологии обработки данных Интернета вещей 11](#_Toc11069180)

[1.2.1. Microsoft Azure 12](#_Toc11069181)

[1.2.2. Amazon Web Services 13](#_Toc11069182)

[1.2.3. Концепция пространственного интеллектуального графа 17](#_Toc11069183)

[2. МОДЕЛЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ 21](#_Toc11069184)

[2.1. Данные устройств IoT 21](#_Toc11069185)

[2.2. Требования к системе Цифровой двойник «Энергопотребление» 22](#_Toc11069186)

[2.3. Варианты использования системы 23](#_Toc11069187)

[3. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ 26](#_Toc11069188)

[3.1. Общее описание архитектуры системы 26](#_Toc11069189)

[3.2. Описание компонентов, составляющих систему 27](#_Toc11069190)

[3.3. Импорт показаний устройств и схема базы данных 29](#_Toc11069191)

[3.4. Взаимодействие с API Digital Twins 30](#_Toc11069192)

[4. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ 32](#_Toc11069193)

[4.1. Средства реализации 32](#_Toc11069194)

[4.2. Иерархия пространственного интеллектуального графа 32](#_Toc11069195)

[4.3. База данных 34](#_Toc11069196)

[4.4. Реализация отправки телеметрии и ее обработки 35](#_Toc11069197)

[4.5. Реализация оповещения пользователей 36](#_Toc11069198)

[4.6. Реализация графического интерфейса пользователя 37](#_Toc11069199)

[5. ТЕСТИРОВАНИЕ 39](#_Toc11069200)

[5.1. Тестирование работоспособности системы 39](#_Toc11069201)

[5.2. Сравнительное тестирование с целью определения правильности обработки телеметрии датчиков 39](#_Toc11069202)

[5.3. Тестирование API управления 40](#_Toc11069203)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 41](#_Toc11069204)

[ЛИТЕРАТУРА 42](#_Toc11069205)

[ПРИЛОЖЕНИЯ 46](#_Toc11069206)

[Приложение 1 46](#_Toc11069207)

[Приложение 2 50](#_Toc11069208)

[Приложение 3 54](#_Toc11069209)

[Приложение 4 56](#_Toc11069210)

# ВВЕДЕНИЕ

Концепция Интернета вещей (IoT) сформулирована достаточно давно, однако активное наполнение концепции технологическим содержанием и внедрение практических решений для ее реализации происходит именно в последние годы. Данная концепция представляет собой вычислительную сеть физических предметов, оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой [17]. Общий мировой объем капиталовложений в IoT в 2018 году составил 646 миллиардов долларов США. Прогноз в отношении капиталовложений в эти технологии на 2019 год – 745 миллиардов долларов США, на 2022 – более 1 триллиона долларов [16].

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 устройств и анализировать их, что потенциально способствует повышению производительности труда и эффективности производства, а также другим экономическим преимуществам [13]. 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 [23, 26].

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 [30].

Применение облачных технологий может упростить обработку сверхбольших массивов данных, генерируемых устройствами Интернета вещей. Этот факт убеждает в необходимости изучения инструментов облачных платформ для разработки приложений, обрабатывающих данные с устройств IoT. Одними из возможных решений в этой области являются облачные платформы Microsoft Azure [22] и Amazon Web Services [3]. Ключевым преимуществом данных платформ является широкий набор инструментов, в частности, для создания решений Интернета вещей и цифровых двойников.

*Целью данной работы* является разработка технологии создания цифровых двойников, а также 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;
* спроектировать, разработать и протестировать прототип цифрового двойника.

**Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, библиографии и 4 приложений. Объем работы составляет 45 страниц, объем библиографии – 36 источников, объем приложений – 11 страниц.

Первая глава содержит описание концепции Интернета вещей, облачных вычислений и цифровых двойников, анализ предметной области, обзор существующих работ по теме создания цифровых двойников на основе облачных вычислительных ресурсов.

Во второй главе описана модель прототипа цифрового двойника, определены требования к системе и варианты ее использования.

В третьей главе приведена архитектура системы.

Четвертая глава описывает детали реализации прототипа.

В пятой главе приводятся результаты тестирования разработанного прототипа.

В заключении сделаны выводы о проделанной работе.

Приложение 1 содержит спецификацию вариантов использования разрабатываемой системы.

Приложение 2 содержит реализацию отправки телеметрии.

Приложение 3 содержит исходный код тестирования модуля создания сенсоров.

Приложение 4 содержит протокол тестирования API управления цифровым двойником.

# 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 [17]. Появление этой концепции представляет новую эру в области вычислительной техники и технологий [28]. Лидерами по объему инвестиций в Интернет вещей в России к 2020 году, по прогнозу IDC, станут производственный сектор и транспортные компании [35].

Благодаря применимости подхода Интернета вещей к различным производственным процессам появилось множество наполненных новым содержанием и возможностями терминов, описывающих существовавшие ранее подходы [29]. Так, в дополнение к автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУ ТП) была сформирована концепция промышленного Интернета вещей (IIoT). Данная концепция предлагает использование взаимосвязанных датчиков, приборов и других устройств, объединенных в сеть с промышленными приложениями компьютеров, включая, помимо прочего, управление производством и энергопотреблением [18], что обеспечивает сбор, обмен и анализ данных, потенциально способствует повышению производительности и эффективности труда, а также другим экономическим преимуществам [13].

Одним из подходов к применению IIoT является концепция «Индустрия 4.0» (Industry 4.0) [1]. Согласно концепции Индустрии 4.0, современная экономика находится на пороге четвертой промышленной революции. Ее ключевые моменты – внедрение киберфизических систем в промышленные процессы и переход к персонализированному производству [1]. Киберфизические системы характеризуются наличием двусторонней связи между физическими процессами и управляющими программами [29]. 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. [2].

При переходе экономики 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 [20]. 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 позволит существенно расширить 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 [28].

Следовательно, важной тенденцией станет 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 в удаленном крупном центре обработки данных (ЦОД), для решений многих задач является нежелательной [15]. 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 [12]. В будущем все в большей степени анализ собираемых данных будет производиться самими устройствами, что позволит минимизировать задержку при принятии решений и повысит автономность устройств. Только применение технологии гибридных облачных сред может 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 одного из самых распространенных методов проектирования систем обработки данных IoT на сегодняшний день, а также проанализируем 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.

### 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 [9]. 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 [8];
* *цифровые модели объектов двойников* – это предопределенные протоколы устройств и схема данных. Они представляют потребности определенной предметной области, 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 хранения данных устройств и сенсоров, а для реализации событий, произошедших в системе – Центр событий Azure Event Hub. Azure IoT Hub – это размещенная в облаке управляемая служба, которая действует в качестве центра сообщений для двусторонней связи между приложением Интернета вещей и устройствами, которыми оно управляет [11]. Инструмент Azure Event Hub служит конечной точкой исходящих событий и сообщений в соответствии с предопределенными настройками маршрутизации [10]. Данная служба отвечает за хранение и обработку событий – таких, как изменения в вычисленном значении пространства как результате сообщения о телеметрии устройства, полученных, в свою очередь, из генератора событий – функции, сравнивающей текущие показатели датчиков с заранее заданными оптимальными значениями. На рисунке 1 представлена диаграмма потока данных Azure Digital Twins.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1. Диаграмма потока данных Azure Digital Twins |

### Amazon Web Services

AWS IoT Things Graph – продукт в инфраструктуре облака от Amazon [7]. Этот сервис позволяет создавать автоматизированные системы Интернета вещей, которые помогают осуществлять связь между web-сервисами и физическими устройствами, использующими различные протоколы, форматы данных и синтаксис сообщений [8]. Данное решение также предоставляет мощное средство визуализации построенного графа с возможностью редактирования связей между устройствами и приложениями прямо в редакторе потоков данных. Этот продукт представлен следующими тремя ключевыми концепциями:

* *Модель.* Это абстракция, представляющая 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. Эта концепция 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.

AWS IoT Things Graph сочетает в себе возможности двух других базовых решений Amazon для Интернета вещей – AWS IoT Core [4] и AWS IoT Greengrass [5].

AWS IoT Core – это платформа, которая обеспечивает подключение устройств к сервисам AWS и другим устройствам, безопасность данных и коммуникации, обработку данных устройств и различные операции с ними. Можно выделить следующие основные возможности платформы:

* *Message Broker.* Это высокопроизводительный брокер сообщений, работающий по стандарту «издатель-подписчик», который передает сообщения всех устройств IoT и приложений в нужном направлении;
* *Шлюз устройств* служит точкой входа для устройств IoT, подключающихся к AWS. Шлюз устройств управляет всеми активными подключениями устройства и реализует семантику различных протоколов, чтобы обеспечить связь устройств с AWS IoT Core;
* *Пакет SDK AWS IoT* для устройств позволяет подключить аппаратное устройство или мобильное приложение к AWS IoT Core;
* *Метод аутентификации AWS* (называемый SigV4), аутентификация на основе сертификата X.509 и специальную аутентификация на основе токенов (через настраиваемые модули авторизации) обеспечивают взаимную аутентификацию и шифрование во всех точках подключения;
* *Реестр* устанавливает идентификацию для устройств и позволяет отслеживать метаданные, такие как атрибуты или возможности устройства. Реестр позволяет уникальным образом идентифицировать каждое устройство в соответствии с единым форматом, не зависящим от типа устройства или его подключения;
* *Тени устройств*. С помощью AWS IoT Core можно создать постоянную виртуальную версию каждого устройства, так называемую тень устройства, содержащую его последнее состояние и позволяющую приложениям или другим устройствам считывать сообщения и взаимодействовать с данным устройством. Тени устройств хранят последнее зарегистрированное состояние и желаемое будущее состояние каждого устройства;
* *Сервис правил* позволяет создавать приложения IoT для сбора, обработки и анализа данных, генерируемых подключенными устройствами, и выполнения действий с ними. Сервис правил оценивает входящие сообщения, публикуемые в AWS IoT Core, а затем преобразует и доставляет их другому устройству или облачному сервису с учетом заданных бизнес-правил. Правило можно применять к данным от одного или от многих устройств и выполнять на его основе одно действие или же множество параллельных действий.

AWS IoT Greengrass – это инструмент, предназначенный для эффективного распространения возможностей AWS на периферийные устройства, что позволяет им локально работать с данными, которые они создают, используя при этом облако для управления, анализа и надежного хранения данных.

Основным преимуществом использования AWS IoT Greengrass, является возможность локально формировать на устройствах выводы с использованием машинного обучения, применяя модели, созданные и обученные в облаке. Также стоит отметить коннекторы системы AWS IoT Greengrass, позволяющие выполнять поиск, импорт, настройку и развертывание приложений и сервисов на периферии. При этом не требуется разбираться в различных протоколах устройств, управлять данными для доступа или взаимодействовать с внешними API. Кроме того, можно применить общую бизнес–логику одного устройства AWS IoT Greengrass к другому.

В общем виде настройка и развертывание AWS IoT Things Graph состоит из следующих действий: создание потоков, настройка конечных точек и отображений, создание хранилища для конфигурации приложения, а также само развертывание.

В библиотеке моделей AWS IoT Things Graph хранится большое количество моделей, которые можно использовать в редакторе потоков, а также можно создавать собственные модели и добавлять их в эту библиотеку. Пример настройки иерархии графа, содержащего устройства и сервисы, с помощью редактора потоков AWS Things Graph продемонстрирован на рисунке 2. Взаимодействия между моделями определяются с помощью настройки маршрутизации данных в редакторе потоков. После настройки локального развертывания AWS IoT Graph упаковывает потоки вместе с их зависимостями и передает их на устройства из реестра созданной группы AWS IoT Greengrass. Это позволяет графу управлять взаимодействием между локально подключенными устройствами.

После развертывания потока в AWS IoT Things Graph отображаются такие показатели, как успешность выполнения или неудача, а также время выполнения, сохраняется всю история выполнения для воспроизведения и отладки.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2.Пример настройки иерархии графа с помощью редактора потоков AWS Things Graph |

### Концепция пространственного интеллектуального графа

Объектные модели описанных выше систем хранятся в виде интеллектуальных графов. Такое представление позволяет эффективно моделировать взаимосвязи и взаимодействия между людьми, пространствами и устройствами. Рассмотрим отдельно концепцию пространственного интеллектуального графа, используемую в Azure Digital Twins [34]. Данная концепция представляет физические среды и связанные устройства, датчики и пользователей в качестве моделей, хранящихся в виде пространственного интеллектуального графа. Модели создают пользователи, которые хотят адаптировать технологическое решение к своим конкретным потребностям. Вместе эти предварительно определенные объектные модели Azure Digital Twins составляют онтологию. В онтологии могут быть описаны регионы, площадки, этажи, офисы, зоны, конференц-залы и фокус-комнаты, различные 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 [11];
* *Онтологии* – предварительно определенные объектные модели Digital Twins, представляющие наборы расширенных типов, например, стандартная онтология BACnet определяет типы данных, применяющиеся в создании цифровых двойников различных «умных» зданий;
* *Роли* – это наборы разрешений, которые назначаются пользователям и устройствам в пространственном графе, например, администратор системы;
* *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, Azure Event Hub [10];
* *Сопоставители* являются объектами, которые определяют набор условий, оценивающих, какие действия предпринимаются на основе входящих данных телеметрии, то есть какие именно пользовательские функции выполняются для заданного сообщения телеметрии.

Пространственный граф – это иерархический граф пространств, устройств и людей, определенных в объектной модели Azure Digital Twins. Пространственный граф поддерживает наследование, фильтрацию, обход, масштабируемость и расширяемость. Взаимодействие с пространственным графом и управление им осуществляется с помощью коллекции REST API [14].

На рисунке 3 с помощью инструмента просмотра и редактирования графов Microsoft Azure Digital Twins Graph Viewer [21] представлена схема созданного пространственного интеллектуального графа.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 3. Схема пространственного интеллектуального графа Azure Digital Twins |

Граф состоит из следующих компонентов:

* *Пространства.* Представлены виртуальными помещениями с идентификаторами (Focus Rooms);
* *Устройства* являются виртуальными единицами оборудования Raspberry Pi 3 с идентификатором номера комнаты в названии;
* *Датчики* являются виртуальными сенсорами потребления электроэнергии. Установлены на каждом устройстве.

# МОДЕЛЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

## Данные устройств IoT

В качестве источника данных было принято решение использовать проект Low Carbon Project [25], обеспечивающий функционирование системы смс-оповещения клиентов о текущей динамической тарифной стоимости электроэнергии. В рамках реализации проекта, дома-участники были разбиты на две тарифные группы. Первая группа пользовалась стандартными тарифами потребления электроэнергии. Потребителям второй группы 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/чч (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 была использована часть вышеописанного набора данных [19], представляющая собой файл формата CSV, схема которого описана в таблице 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 потребляемой ими электроэнергии в текущий момент и в заданный промежуток времени;
* система должна предоставлять интерфейс добавления новых пользователей и устройств;
* система должна оповещать пользователей о неэффективном энергопотреблении при выполнении заранее определенных условий.

На основании анализа существующих технологий создания цифровых двойников на базе облачных вычислительных систем был сделан вывод, что обе рассмотренные системы находятся в предварительной стадии, поэтому выбор используемой системы основан на объеме предоставляемых возможностей, количестве сопутствующих облачных инструментов и решений, наличии ограничений использования. При сравнении данных характеристик лучшими результатами обладает Azure Digital Twins от Microsoft. Поэтому в работе используется именно это решение.

На основании анализа Azure Digital Twins были определены следующие нефункциональные требования к проектируемой системе:

* функции первичной обработки телеметрии должны быть написаны на языке программирования JavaScript;
* доставка сообщений, содержащих показания устройств, а также клиентское приложение должны быть реализованы с использованием программной платформы .Net Framework;

## Варианты использования системы

В ходе анализа проектируемой системы были выявлены основные варианты ее использования, которые представлены на рисунке 4.

Были выделены следующие основные актеры, взаимодействующие с системой:

* *Администратор системы* – это пользователь системы, отвечающий за добавление и удаление пользователей и устройств. Он также имеет возможность просматривать статистику потребления энергии другими пользователями системы;
* *Пользователь* – это владелец дома-участника проекта, имеющий доступ к результату обработки данных, полученных с его устройства.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 4.Диаграмма вариантов использования системы Цифровой двойник «Энергопотребление» |

Для данных актеров были определены следующие основные варианты использования системы:

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

Спецификация вариантов использования приведена в приложении 1.

# АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

## Общее описание архитектуры системы

Проектируемая система в самом общем виде состоит из базы данных, хранящей общую статистику энергопотребления, службы Интернета вещей Digital Twins облачной платформы Microsoft Azure, работающей по принципу Platform as a Service (PaaS), обработчика телеметрии устройств – приложения, отвечающего за сбор, отправку и обработку телеметрии, а также клиентского Web-приложения для управления цифровым двойником, осуществляющего HTTP REST запросы к API созданного экземпляра Digital Twins. Диаграмма потоков данных проектируемой системы представлена на рисунке 5.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 5. Диаграмма потоков данных проектируемого цифрового двойника |

Приложение, реализующее отправку и обработку телеметрии, выполняет обработку данных, полученных из генератора, а также их передачу на сервер. Оно состоит из нескольких компонентов: модуль создания пространственного интеллектуального графа, функция обработки телеметрии, выполняющая пользовательскую логику для данных, которые поступают из устройств и обработчика данных с сервера для определения статуса помещения с целью проверки превышения рекомендуемых показателей энергопотребления для дальнейшей отправки уведомлений пользователям. Клиентское приложение состоит из модуля регистрации и аутентификации, а также генератора HTTP REST запросов к API Digital Twins. Генератор телеметрии включает в себя базу данных «Общее потребление энергии». Диаграмму компонентов всей системы можно видеть на рисунке 6.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 6.Диаграмма компонентов цифрового двойника |

## Описание компонентов, составляющих систему

Разберем подробно отдельные компоненты, составляющие программную систему. Цифровой двойник состоит из следующих компонентов.

1. *Облачная платформа Azure Digital Twins (PaaS) –* это компонент системы, представляющий собой развернутый и настроенный экземпляр Azure Digital Twins.
2. *Обработчик телеметрии –* это компонент, отвечающий за обработку данных телеметрии и их отправку в облачную платформу Azure Digital Twins. Состоит из следующих элементов:

* *­­функция обработки телеметрии* – осуществляет первичную обработку данных с устройств до их отправки в центр Интернета вещей, когда выполняются условия, указанные сопоставителями, в частности, выявление помещений, текущие показатели энергопотребления которых превышают заранее определенные рекомендуемые нормы энергопотребления;
* *модуль создания графа* – это модуль, разработанный в Microsoft, он получает на вход *файл с описанием графа* сериализации данных формата YAML, в котором описана иерархия физических помещений и датчиков, установленных в них. В соответствии с объектной моделью производит серию POST-запросов к API Digital Twins для создания пространственного интеллектуального графа согласно определенной схеме, а также возвращает строку подключения для дальнейшей работы с экземпляром цифрового двойника. Также возвращает пользователю код для регистрации устройства в Azure Active Directory [31], т.е. устройство, с которого планируется получить файл с иерархией графа и осуществлять сбор телеметрии, должно иметь на это право;
* *модуль постобработки данных* – производит обработку данных с устройств, определяя статус помещения на основании рекомендуемых данных для последующей передачи этих условий в Центры Событий [36] для отправки email-сообщений пользователям системы и администратору.

1. *Клиентское приложение –* реализует основную логику управления пространственным интеллектуальным графом, аутентификацию пользователей в системе, а также получение значений телеметрии из центра Интернета вещей. Клиентское приложение включает в себя следующие элементы:

* *модуль регистрации и аутентификации* – отвечает за вход пользователей в систему, а также использование OAuth-токена авторизации пользователя, от имени которого выполняется запрос [27]. Модуль принимает на вход токен авторизации (полученный с помощью стороннего ПО – Postman API [24]) и снабжает каждый запрос требуемыми заголовками авторизации;
* *генератор* *REST-запросов* – получает на вход набор идентификаторов устройств и помещений от пользователей. Путем отправки HTTP REST-запросов к API облачной платформы получает и возвращает пользователю информацию о выбранных устройствах и помещениях, а также создает новые компоненты графа, то есть осуществляет управление пространственным интеллектуальным графом.

1. *Генератор телеметрии* – производит поиск показаний электропотребления в базе для каждого устройства, отправляет полученные данные в центр Интернета вещей [33], автоматический генерируемый облачной платформой Microsoft Azure при создании Azure Digital Twins. Включает в себя *базу данных «Общее потребление электроэнергии»*. Это база данных, которая хранит статистику о потребляемой электроэнергии, используемые тарифные планы, личные данные пользователей для входа в систему, уникальные идентификаторы устройств, сенсоров и помещений.

## Импорт показаний устройств и схема базы данных

В качестве показателей сенсоров было принято решение использовать описанные выше данные проекта Low Carbon Project, представляющие собой файл формата CSV, содержащий 1 миллион строк. В результате импортирования CSV-файла и создания дополнительных таблиц был получен SQL-файл со всей базой.

В качестве системы управления базами данных был выбран Microsoft SQL Server 2017. Для работы с базой данных было использовано пространство имен System.Data.SqlClient для C#. Данное пространство имен является поставщиком данных платформы .Net для SQL Server.

Для хранения паролей, идентификаторов помещений, сенсоров и устройств потребовалось две дополнительные таблицы:

* registration – содержащая логины и пароли пользователей;
* spaces – хранит идентификаторы помещений, устройств и датчиков.

В итоге получаем базу данных, диаграмма «сущность – связь» которой изображена на рисунке 7.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 7. Диаграмма «сущность – связь» базы данных цифрового двойника |

## Взаимодействие с API Digital Twins

|  |
| --- |
| На рисунке 8 представлена диаграмма деятельности, пошагово отражающая выполнение взаимодействия с API Digital Twins для получения информации о текущем энергопотреблении.  На первом шаге пользователь производит вход в систему с помощью модуля регистрации и аутентификации, предварительно получив токен авторизации с помощью настроенного для работы с используемым экземпляром Digital Twins клиента Postman API. На этом шаге модуль регистрации и аутентификации обращается к таблице Registration для проверки правильности данных, введенных пользователем. После этого пользователь с помощью графического интерфейса клиентского приложения инициирует генерацию REST-запроса к API Azure Digital Twins путем использования соответствующего элемента управления. Генератор REST-запросов обращается к таблице Spaces для получения идентификатора помещения, в котором требуется определить текущее значение энергопотребления. Далее происходит выполнение сгенерированного запроса. После этого API Digital Twins возвращает клиентскому приложению результат выполнения запроса в виде JSON-ответа, из которого извлекается нужная информация путем десериализации и выводится пользователю. |
| Рис. 8.Диаграмма деятельности системы для предоставления пользователю информации о текущем энергопотреблении |

# РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

## Средства реализации

В качестве основного языка программирования для реализации системы был выбран язык C#, т.к. Azure Digital Twins в настоящий момент не поддерживает другие языки (не считая функции обработки телеметрии – они могут быть написаны на единственном поддерживаемом в данный момент для этих целей языке JavaScript, собственно, он и выбран для этих целей в качестве вспомогательного языка системы). Средой разработки программного обеспечения была выбрана Microsoft Visual Studio Enterprise 2017.

Для отправки REST-запросов был использован HTTP REST клиент RestSharp для .Net. Он содержит все необходимые инструменты для работы с запросами. В качестве фреймворка для сериализации/десериализации был выбран фреймворк Json.NET от Newtonsoft.

В качестве регистратора событий был применен Центр событий Microsoft Azure. Для отправки email-сообщений использовался встроенный Gmail-клиент Azure.

## Иерархия пространственного интеллектуального графа

Подготовка пространственного интеллектуального графа осуществляется с помощью файла конфигурации формата YAML, содержащего элементную структуру графа согласно выбранной онтологии. Для разрабатываемой системы была выбрана стандартная онтология BACnet, содержащая все основные типы данных, требующиеся в системе. Фрагмент YAML-файла конфигурации иерархии графа представлен в листинге 1.

|  |  |
| --- | --- |
| Листинг 1.Фрагмент YAML-файла конфигурации иерархии графа | |
| - name: Quickstart Building  type: Venue  resources:  - type: IoTHub  spaces:  - name: Floor 3  type: Floor  spaces:  - name: Focus Room 30  type: Room  subType: FocusRoom  devices:  - name: Raspberry Pi 3 30  hardwareId: 123456789030  sensors:  - dataType: Light  hardwareId: MAC000030  matchers:  - name: Matcher Light  dataTypeValue: Light  userdefinedfunctions:  - name: Motion Processor  matcherNames:  - Matcher Light  script: actions/userDefinedFunctions/availability.js  roleassignments:  - roleId: 98e44ad7-28d4-4007-853b-b9968ad132d1 # System Role: SpaceAdministrator  objectName: Motion Processor  objectIdType: UserDefinedFunctionId |

Структура YAML-файла включает несколько следующих обязательных разделов:

* *Resources* – данный узел создает ресурс Центра Интернета вещей для взаимодействия с устройствами. Центр Интернета вещей в корневом узле графа может взаимодействовать со всеми устройствами и датчиками в графе.
* *Spaces* – в объектной модели Digital Twins данный узел представляет физические расположения. Каждое пространство имеет тип (Type) и имя (Name).
* *Devices* – это раздел, представляющий устройства, управляющие рядом датчиков.
* *Sensors* – данный раздел описывает используемые датчики.
* *Matchers* – это раздел, описывающий сопоставители – наборы конкретных условий, которые нужно отслеживать в данных устройств или датчиков. Сопоставитель будет отслеживать датчик типа dataTypeValue. Для подготовки сопоставителя, который будет отслеживать один из этих датчиков, его значение dataTypeValue должно соответствовать dataType этого датчика.
* *UserDefinedFunctions* – это узел, описывающий функции первичной обработки телеметрии. Они выполняют пользовательскую логику для данных, поступающих из пространств и устройств, когда выполняются условия, указанные сопоставителями.

## База данных

В соответствии с разработанной схемой, была реализована база данных для хранения данных счетчиков, а также информации о пользователях. Для реализации была использована СУБД Microsoft SQL Server 2017. SQL-скрипт создания таблиц представлен в листинге 2.

|  |
| --- |
| Листинг 2. SQL-скрипт создания таблиц в базе данных |
| CREATE TABLE [Power] (  id bigint(50) NOT NULL,  LCLid varchar(50) NOT NULL,  stdorToU varchar(50) NOT NULL,  DateTime varchar(50) NOT NULL,  KWH hh varchar(50) NOT NULL,  Acorn varchar(50) NOT NULL,  Acorn Grouped varchar(50) NOT NULL,  CONSTRAINT [PK\_POWER] PRIMARY KEY CLUSTERED  (  [id] ASC  ) WITH (IGNORE\_DUP\_KEY = OFF)  )  GO  CREATE TABLE [registration] (  login varchar(50) NOT NULL,  password varchar(50) NOT NULL,  CONSTRAINT [PK\_REGISTRATION] PRIMARY KEY CLUSTERED  (  [login] ASC  ) WITH (IGNORE\_DUP\_KEY = OFF)  )  GO  CREATE TABLE [spaces] (  spaceId varchar(50) NOT NULL,  sensorId varchar(50) NOT NULL,  sensorName varchar(50) NOT NULL,  CONSTRAINT [PK\_SPACES] PRIMARY KEY CLUSTERED  (  [spaceId] ASC  ) WITH (IGNORE\_DUP\_KEY = OFF)  )  GO  ALTER TABLE [registration] WITH CHECK ADD CONSTRAINT [registration\_fk0] FOREIGN KEY ([login]) REFERENCES [Power]([LCLid])  ON UPDATE CASCADE  GO  ALTER TABLE [registration] CHECK CONSTRAINT [registration\_fk0]  GO  ALTER TABLE [spaces] WITH CHECK ADD CONSTRAINT [spaces\_fk0] FOREIGN KEY ([sensorName]) REFERENCES [Power]([LCLid])  ON UPDATE CASCADE  GO  ALTER TABLE [spaces] CHECK CONSTRAINT [spaces\_fk0]  GO |

## Реализация отправки телеметрии и ее обработки

В приложении 2 представлена реализация функции отправки телеметрии в центр Интернета вещей, написанная на языке C#. На рисунке 9 продемонстрировано журналирование сообщений, отправляемых в центр Интернета вещей. Каждая запись журнала содержит идентификатор сенсора и его текущие показания, дату отправки сообщения, а также уникальный идентификатор запроса к центру Интернета вещей.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 9. Журналирование отправленных в центр Интернета вещей  сообщений |

В листинге 3 приведена реализация первичной обработки телеметрии до отправки в центр Интернета вещей, написанная на языке JavaScript.

|  |
| --- |
| Листинг 3. Реализация обработки телеметрии |
| var Type = "Light";  var StatusOk = "OK";  var ElectricityThreshold = 2.0;  function process(telemetry, executionContext) {  try {  log(`Sensor ID: ${telemetry.SensorId}. `);  log(`Sensor value: ${JSON.stringify(telemetry.Message)}.`);  var sensor = getSensorMetadata(telemetry.SensorId);  var parseReading = JSON.parse(telemetry.Message);  setSensorValue(telemetry.SensorId,sensor.DataType, parseReading.SensorValue);  var parentSpace = sensor.Space();  var otherSensors = parentSpace.ChildSensors();  var ElectricitySensor = otherSensors.find(function(element) {  return element.DataType === motionType;  });  var ElectricityValue = getFloatValue(ElectricitySensor.Value().Value);  var roomIsOk = "Room is OK";  var roomIsNotOk = "Room is not OK";  if(ElectricityValue < ElectricityThreshold) {  log(`${roomIsOk}. Electricity: ${ElectricityValue}.`);  setSpaceValue(parentSpace.Id, StatusOk, roomIsOk);  }  else {  log(`${roomIsNotOk}. Electricity: ${ElectricityValue}.`);  setSpaceValue(parentSpace.Id, StatusOk, roomIsNotOk);  parentSpace.Notify(JSON.stringify(roomIsNotOk));  }  }  catch (error)  {  log(`error: ${error.name} Message ${error.message}.`);  }  }  function getFloatValue(str) {  if(!str) {  return null;  }  return parseFloat(str);  } Реализация оповещения пользователей Согласно функциональным требованиям система должна оповещать пользователей о неэффективном энергопотреблении при выполнении заранее определенных условий. На основании анализа используемого набора данных было принято решение установить граничное значение эффективности энергопотребления на уровне 2 кВт/чч. При превышении данного значения текущими показателями энергопотребления происходит регистрация события о неэффективности энергопотребления в текущем помещении с последующей отправкой в Центр Событий Azure. В предварительно настроенном Центре событий Azure происходит обработка событий, которая заключается в отправке email-сообщений владельцам помещений и администратору системы с помощью встроенного Gmail-клиента. Пример таких сообщений представлен на рисунке 10.   |  | | --- | |  | | Рис. 10. Пример оповещения пользователя | |
|  |

## Реализация графического интерфейса пользователя

Согласно функциональным требованиям клиентское приложение системы управления цифровым двойником предоставляет пользователю интерфейс, состоящий из двух окон: окна регистрации и окна получения результатов запросов. Окно регистрации предоставляет пользователю интерфейс входа в систему. Окно получения результатов запросов предоставляет пользователю интерфейс выбора интересующего его помещения, а также интерфейс для получения информации о текущем энергопотреблении и энергопотреблении за определенный промежуток времени в данном помещении.

Интерфейс клиентского приложения системы представлен на рисунках 11–12.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 11.Окно регистрации |

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 12.Окно получения результатов запросов |

# ТЕСТИРОВАНИЕ

Тестирование предложенной системы было проведено в несколько этапов: тестирование работоспособности системы на основе модульного теста, проверяющего статусы ответов к осуществляемым к пространственному графу API-запросам, сравнительное тестирование с целью определения правильности обработки телеметрии датчиков, а также тестирование API управления системы, то есть правильности результатов выполнения API-запросов, выполняемых системой.

## Тестирование работоспособности системы

Для проверки работоспособности системы было написан модульный тест, проверяющий правильность работы компонента, отвечающего за создание пространственного интеллектуального графа на основе YAML-файла, содержащего иерархическую структуру моделируемой физической системы. Тест проверяет статусы ответов сервера к осуществляемым системой API-запросам, а также обработку исключительных ситуаций. Исходный код тестирования правильности создания сенсоров системы показан в приложении 3.

## Сравнительное тестирование с целью определения правильности обработки телеметрии датчиков

Для проверки правильности предоставленных системой текущих и суточных показателей было проведено сравнение наборов данных, полученных напрямую из таблицы, содержащей все показания датчиков и данных, предоставленных пользователю системы по запросу, то есть полученных после обработки системой. Также были вычислены средние значения энергопотребления за сутки, и произведено их сравнение с данными суточного потребления, предоставленными системой для соответствующих помещений. Результат сравнительного тестирования с целью определения правильности обработки телеметрии датчиков приведен в таблице 2.

| Табл. 2.Результат сравнения данных | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Тестовый случай | Входные данные | Ожидаемый результат | Полученный результат | Тест пройден? |
| Получить текущее значение сенсора «MAC000003» | – | 0.452 | 0.452 | Да |
| Получить показатель среднего энергопотребления в помещении «MAC000012» за сутки | – | 0.335 | 0.335 | Да |

## Тестирование API управления

Для проверки правильности результатов выполнения API-запросов был использован упомянутый выше REST клиент Postman API [24], предварительно настроенный для работы с приложением Azure Active Directory, предоставляющим неявный поток разрешений OAuth 2.0. POST-клиент использовался для выполнения HTTP-запросов, содержащих токены к API управления экземпляра Digital Twins, а также для составления составных запросов POST в API управления. Результат тестирования API управления с помощью Postman API приведен в приложении 4.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках дипломного проекта была разработана технология создания цифровых двойников, а также создан прототип цифрового двойника на основе ресурсов облачной вычислительной платформы Microsoft Azure. Также было разработано клиентское приложения для работы с цифровым двойником. В ходе разработки были решены следующие задачи:

* произведен обзор научной литературы и существующих решений Интернета вещей для создания цифровых двойников;
* изучены технологии, предоставляемые облачными вычислительными платформами, для создания цифровых двойников;
* спроектирован и разработан прототип цифрового двойника на основе облачных вычислительных ресурсов вычислительной платформы Microsoft Azure;
* произведено тестирование разработанного прототипа.

# ЛИТЕРАТУРА

1. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Lee J., Bagheri B., Kao H. // Manufacturing Letters, 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.
2. A smart manufacturing use case: Furnace temperature balancing in steam methane reforming process via kepler workflows. Korambath P., Wang J., Kumar A., Davis J., Graybill R., Schott B., Baldea M. // Procedia Comput. Sci., 2016 – Vol. 80. – P. 680–689.
3. Amazon Web Services Management Console. [Электронный ресурс] URL: <https://aws.amazon.com/console/> (дата обращения: 10.02.2019).
4. AWS IoT Core Features. [Электронный ресурс] URL: <https://aws.amazon.com/ru/iot-core/features/> (дата обращения: 18.04.2019).
5. AWS IoT Greengrass Features. [Электронный ресурс] URL: <https://aws.amazon.com/ru/greengrass/features/> (дата обращения: 18.04.2019).
6. 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).
7. AWS IoT Things Graph Overview. [Электронный ресурс] URL: https://aws.amazon.com/ru/iot-things-graph/ (дата обращения: 10.02.2019).
8. Azure Digital Twins Documentation. [Электронный ресурс] URL: https://docs.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/ (дата обращения: 11.02.2019).
9. Azure Digital Twins Overview. [Электронный ресурс] URL: https://azure.microsoft.com/en-us/services/digital-twins/ (дата обращения: 10.02.2019).
10. Azure Event Hubs. [Электронный ресурс] URL: <https://azure.microsoft.com/ru-ru/services/event-hubs/> (дата обращения: 16.04.2019).
11. Azure IoT Hub Documentation. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/iot-hub/> (дата обращения: 16.04.2019).
12. Bar-Magen Numhauser, J. Fog Computing introduction to a New Cloud Evolution. // Proceedings from the Cies III Congress, January 2012. University of Alcala. – P. 111–126.
13. Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. // Computers in Industry, October 2018. ­ – Vol. 101. – P. 1–12.
14. Digital Twins Service Management APIs. [Электронный ресурс] URL: <https://azuredigitaltwinsexample.northeurope.azuresmartspaces.net/management/swagger/ui/index/> (дата обращения: 12.03.2019).
15. Fog Computing and Its Role in the Internet of Things. Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S. // Proceedings of ACM MCC, 2012. – P. 13–16.
16. 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).
17. 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).
18. K. Rose, S. Eldridge, L. Chapin The internet of things: an overview Internet Soc. (2015). – P. 7.
19. 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).
20. Mell, P., Grance, T. The NIST Definition of Cloud Computing. // Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. NIST (20 October 2011).
21. Microsoft Azure Digital Twins Graph Viewer Github page. [Электронный ресурс] URL: <https://github.com/Azure/azure-digital-twins-graph-viewer/> (дата обращения: 08.03.2019).
22. Microsoft Azure Portal. [Электронный ресурс] URL: <https://portal.azure.com/> (дата обращения: 10.02.2019).
23. Micro-Workflows: Kafka and Kepler fusion to support Digital Twins of Industrial Processes. Radchenko G., Alaasam A., Tchernykh A. // IEEE/ACM Int. Conf. Util. Cloud Comput. – UCC '18, pp. 83-88, December 2018.
24. Postman API Requests. [Электронный ресурс] URL: <https://learning.getpostman.com/docs/postman/sending_api_requests/requests/> (дата обращения: 07.04.2019).
25. 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).
26. Towards Digital Twins Cloud Platform: Microservices and Computational Workflows to Rule a Smart Factory. Borodulin K., Radchenko G., Shestakov A., Sokolinsky L., Tchernykh A., Prodan R. // Proc. The 10th Int. Conf. Util. Cloud Comput. – UCC '17, pp. 209–210, December 2017.
27. Авторизация доступа к веб-приложениям Azure Active Directory с помощью потока предоставления кода OAuth 2.0. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/active-directory/develop/v1-protocols-oauth-code/> (дата обращения: 19.04.2019).
28. Барсков А. 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).
29. Барсков А. 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).
30. Грингард С. Интернет вещей: Будущее уже здесь. – М.: Альпина Паблишер, 2016. – 188 с.
31. Документация Azure Active Directory. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/active-directory/> (дата обращения: 16.03.2019).
32. Документация по Microsoft Azure. Micrisift Docs. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/> (дата обращения: 04.02.2019).
33. Документация по центру Интернета вещей. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/iot-hub/> (дата обращения: 18.03.2019).
34. 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).
35. Семеновская Е. Индустриальный Интернет вещей. Перспективы российского рынка. [Электронный ресурс] URL: <https://www.company.rt.ru/projects/IIoT/study_IDC.pdf/> (дата обращения: 27.02.2019).
36. Центры событий Microsoft Azure. Документация. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/azure/event-hubs/> (дата обращения: 19.04.2019).

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Спецификация вариантов использования

|  |
| --- |
| *UseCase:*Добавить источник данных |
| *ID:* 1 |
| *Аннотация:* выполнить запрос HTTP POST, инициирующий создание нового устройства с одним подключенным сенсором в выбранном помещении |
| *Главные актеры:* 1 |
| *Второстепенные актеры:* – |
| *Предусловия:* администратор предоставил идентификатор помещения, в котором требуется создать источник данных |
| *Основной поток:*   1. Выполнить POST-запрос к Web API Digital Twins, инициирующий создание устройства в помещении с предоставленным идентификатором 2. Получить от сервера ответ формата JSON, десериализовать его 3. Внести идентификатор созданного устройства в базу данных 4. Вернуть администратору идентификаторы сенсора и устройства |
| *Постусловия:* – |
| *Альтернативные потоки:* – |
|  |
| *UseCase:*Добавить пользователя |
| *ID:* 2 |
| *Аннотация:* выполнить запрос HTTP POST, инициирующий создание нового пользователя |
| *Главные актеры:* 1 |
| *Второстепенные актеры:* – |
| *Предусловия:* – |
| *Основной поток:*   1. Выполнить POST-запрос к Web API Digital Twins, инициирующий создание нового помещения 2. Получить от сервера ответ формата JSON, десериализовать его 3. Сгенерировать пароль для входа нового пользователя в систему 4. Внести в базу данных идентификатор созданного помещения и пароль для входа 5. Вернуть администратору идентификатор созданного помещения и пароль для входа нового пользователя |
| *Постусловия:* – |
| *Альтернативные потоки:* – |
|  |
| *UseCase:*Оповестить пользователя о неэффективном энергопотреблении |
| *ID:* 3 |
| *Аннотация:* при достижении заранее определенных условий, уведомить пользователя системы и администратора о неэффективном энергопотреблении в одном из помещений |
| *Главные актеры:* 2 |
| *Второстепенные актеры:* – |
| *Предусловия:* на этапе обработки данных, полученных с устройств, было выявлено, что текущие значения расхода электроэнергии в одном из помещений превышают рекомендуемые |
| *Основной поток:*   1. Активировать событие, отправляющее email-сообщения администратору системы и владельцу выявленного помещения |
| *Постусловия:* – |
| *Альтернативные потоки:* – |
|  |
| *UseCase:*Посмотреть среднее энергопотребление за промежуток |
| *ID:* 4 |
| *Аннотация:* предоставить пользователю информацию о среднем энергопотреблении в выбранном помещении |
| *Главные актеры:* 2 |
| *Второстепенные актеры:* – |
| *Предусловия:* пользователь системы выбрал помещение и интересующий его промежуток времени для получения информации о среднем энергопотреблении |
| *Основной поток:*   1. Выполнить запрос HTTP GET к Web API Digital Twins для получения выбранного в зависимости от промежутка времени количества значений HistoricalValues компонента Sensor, принадлежащего выбранному помещению 2. Вернуть пользователю среднее значение HistoricalValue компонента Sensor на заданном промежутке времени |
| *Постусловия:* – |
| *Альтернативные потоки:* – |
|  |
| *UseCase:*Посмотреть текущее энергопотребление |
| *ID:* 5 |
| *Аннотация:* предоставить пользователю информацию о текущем энергопотреблении в выбранном помещении |
| *Главные актеры:* 2 |
| *Второстепенные актеры:* – |
| *Предусловия:* пользователь системы выбрал помещение для получения информации о текущем энергопотреблении |
| Основной поток:   * + - 1. Выполнить запрос HTTP GET к Web API Digital Twins для получения значения Value компонента Sensor, принадлежащего выбранному помещению       2. Вернуть пользователю текущее значение Value компонента Sensor |
| *Постусловия:* – |
| *Альтернативные потоки:* – |

Приложение 2

|  |
| --- |
| Реализация отправки телеметрии |
| using System;  using System.Collections.Generic;  using System.Globalization;  using System.IO;  using System.Linq;  using System.Net.NetworkInformation;  using System.Runtime.Serialization.Json;  using System.Text;  using System.Threading;  using System.Threading.Tasks;  using Microsoft.Azure.Devices.Client;  using Microsoft.Azure.DigitalTwins.Samples.Models;  using Microsoft.Extensions.Configuration;  using Microsoft.Extensions.Configuration.Binder;  using System.Data.SqlClient;  using System.Data;  namespace Microsoft.Azure.DigitalTwins.Samples  {  public static class DBConnector  {  public static int GetShift(Dictionary<string, int> dict, string id)  {  int index = 0;  foreach (var el in dict)  {  if (el.Key == id)  {  index = el.Value;  return index;  }  }  return index;  }  public static int GetIndex(DataTable dt, string id)  {  for (int i = 0; i < dt.Rows.Count; i++)  if (dt.Rows[i][0].ToString() == id)  {  return i;  }  return -1;  }  public static DataTable Connect(string sql, string connectionString)  {  SqlConnection connection = new SqlConnection(connectionString);  DataTable dt = new DataTable();  SqlDataAdapter adapter = new SqlDataAdapter(sql, connection);  using (connection)  {  connection.Open();  DataTable ds = new DataTable();  new SqlDataAdapter(sql, connection).Fill(ds);  dt = ds;  }  return dt;  }  }  class Program  {  static Dictionary<string, int> dict = new Dictionary<string, int>();  static string sql\_dt = "select \* from [Power-Networks-LCL-June2015(withAcornGps)v2\_1] as tbl order by tbl.LCLid asc, tbl.DateTime asc";  static string connectionString\_dt = @"Data Source=.\SQLEXPRESS;Initial Catalog=Electricity;Integrated Security=True";  private static DataTable dt = DBConnector.Connect(sql\_dt, connectionString\_dt);  static string sql\_reg = "select \* from [registration] as reg order by reg.login asc";  static string connectionString\_reg = @"Data Source=.\SQLEXPRESS;Initial Catalog=Electricity;Integrated Security=True";  private static DataTable reg = DBConnector.Connect(sql\_reg, connectionString\_reg);    private static IConfigurationSection settings;  static void Main(string[] args)  {  foreach (var el in dict)  Console.WriteLine(el);  for (int i = 0; i < reg.Rows.Count; i++)  dict.Add(reg.Rows[i][1].ToString(), DBConnector.GetIndex(dt, reg.Rows[i][1].ToString()));  if (args.Length != 0)  {  Console.WriteLine("Usage: dotnet run\nNo arguments are supported");  return;  }  settings = new ConfigurationBuilder()  .SetBasePath(Directory.GetCurrentDirectory())  .AddJsonFile("appsettings.json")  .Build()  .GetSection("Settings");  try  {  DeviceClient deviceClient = DeviceClient.CreateFromConnectionString(settings["DeviceConnectionString"]);  if (deviceClient == null)  {  Console.WriteLine("ERROR: Failed to create DeviceClient!");  return;  }  SendEvent(deviceClient).Wait();  }  catch (Exception ex)  {  Console.WriteLine("EXIT: Unexpected error: {0}", ex.Message);  }  }  static Func<string> CreateGetRandomSensorReading(int iteration, int shift)  {  string temp = dt.Rows[iteration + shift][3].ToString();  return () => temp.ToString(CultureInfo.InvariantCulture);  }  static async Task SendEvent(DeviceClient deviceClient)  {  var serializer = new DataContractJsonSerializer(typeof(CustomTelemetryMessage));  var sensors = settings.GetSection("Sensors").Get<Sensor[]>();  var delayPerMessageSend = int.Parse(settings["MessageIntervalInSeconds"]);  var countOfSendsPerIteration = sensors.Length;  var maxSecondsToRun = 15 \* 60;  var maxIterations = maxSecondsToRun / countOfSendsPerIteration / delayPerMessageSend;  var curIteration = 0;  do {  foreach (var sensor in sensors)  {  var getRandomSensorReading = CreateGetRandomSensorReading(curIteration, DBConnector.GetShift(dict, sensor.HardwareId.ToString()));  var telemetryMessage = new CustomTelemetryMessage()  {  SensorValue = getRandomSensorReading(),  };  using (var stream = new MemoryStream())  {  serializer.WriteObject(stream, telemetryMessage);  var byteArray = stream.ToArray();  Message eventMessage = new Message(byteArray);  eventMessage.Properties.Add("DigitalTwins-Telemetry", "1.0");  eventMessage.Properties.Add("DigitalTwins-SensorHardwareId", $"{sensor.HardwareId}");  eventMessage.Properties.Add("CreationTimeUtc", DateTime.UtcNow.ToString("o"));  eventMessage.Properties.Add("x-ms-client-request-id", Guid.NewGuid().ToString());  Console.WriteLine($"\t{DateTime.UtcNow.ToLocalTime()}> Sending message: {Encoding.UTF8.GetString(eventMessage.GetBytes())} Properties: {{ {eventMessage.Properties.Aggregate(new StringBuilder(), (sb, x) => sb.Append($"'{x.Key}': '{x.Value}',"), sb => sb.ToString())} }}");  await deviceClient.SendEventAsync(eventMessage);  }  }  await Task.Delay(TimeSpan.FromSeconds(delayPerMessageSend));  } while (++curIteration < maxIterations);  Console.WriteLine($"Finished sending {curIteration} events (per sensor type)");  }  }  public class Sensor  {  public string DataType { get; set; }  public string HardwareId { get; set; }  }  } |

## Приложение 3

|  |
| --- |
| Исходный код тестирования модуля создания сенсоров |
| using System;  using System.Linq;  using Xunit;  using Microsoft.Azure.DigitalTwins.Samples;  using System.Net.Http;  using System.Net;  using System.Threading.Tasks;  using Newtonsoft.Json;  using System.Collections.Generic;  using Moq;  using System.IO;  using System.Collections;  using YamlDotNet.Serialization;  using Microsoft.Extensions.Logging;  namespace Microsoft.Azure.DigitalTwins.Samples.Tests  {  public class ProvisionSampleSensorsTests  {  private static Serializer yamlSerializer = new Serializer();  private static Guid sensor1Guid = new Guid("00000000-0000-0000-0000-000000000001");  private static Guid sensor2Guid = new Guid("00000000-0000-0000-0000-000000000002");  [Fact]  public async Task GetProvisionSampleCreatesDescriptions()  {  var yaml = @"  - name: Test1  devices:  - name: Device1  hardwareId: DeviceHardwareId1  sensors:  - dataType: SensorType1  hardwareId: SensorHardwareId1  ";  var expectedDescriptions = new [] { new SpaceDescription()  {  name = "Test1",  devices = new [] {  new DeviceDescription()  {  name = "Device1",  hardwareId = "DeviceHardwareId1",  sensors = new [] {  new SensorDescription()  {  dataType = "SensorType1",  hardwareId = "SensorHardwareId1",  }  },  },  },  }};  var actualDescriptions = await Actions.GetProvisionSampleTopology(new StringReader(yaml));  Assert.Equal(yamlSerializer.Serialize(expectedDescriptions), yamlSerializer.Serialize(actualDescriptions));  }  [Fact]  public async Task CreateTwoSensors()  {  (var httpClient, var httpHandler) = FakeDigitalTwinsHttpClient.CreateWithDevice(  postResponseGuids: new [] { sensor1Guid, sensor2Guid },  getResponses: Enumerable.Repeat(Responses.NotFound, 2)  );  var descriptions = new [] { new SpaceDescription()  {  name = FakeDigitalTwinsHttpClient.Space.Name,  devices = new [] {  new DeviceDescription()  {  name = FakeDigitalTwinsHttpClient.Device.Name,  hardwareId = FakeDigitalTwinsHttpClient.Device.HardwareId,  sensors = new [] {  new SensorDescription()  {  dataType = "SensorType1",  hardwareId = "SensorHardwareId1",  },  new SensorDescription()  {  dataType = "SensorType2",  hardwareId = "SensorHardwareId2",  }  }  }  },  }};  await Actions.CreateSpaces(httpClient, Loggers.SilentLogger, descriptions, Guid.Empty);  Assert.Equal(2, httpHandler.PostRequests["sensors"].Count);  }  }  } |

## Приложение 4

Протокол тестирования API управления цифровым двойником

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Тестовый случай | Выполненный запрос | Полученный ответ | Тест пройден? |
| Получить характеристики помещения с названием «Focus Room 02» | https://electricitydigitaltwin.northeurope.azuresmartspaces.net/management/api/v1.0/spaces?name=Focus Room 02&includes=values | [  {  "id": "6553c267-6519-4561-9b70-1d14e139ec07",  "name": "Focus Room 02",  "typeId": 14,  "parentSpaceId": "2dfb2418-a2a6-4f59-b7ca-b4ec394e18e8",  "subtypeId": 13,  "statusId": 12  }  ] | да |
| Получить список устройств, принадлежащих помещению с ID 8b73d652-4fa3-46cb-8ac2-b27bfe3c10f6 | https://electricitydigitaltwin.northeurope.azuresmartspaces.net/management/api/v1.0/devices?spaceId= 8b73d652-4fa3-46cb-8ac2-b27bfe3c10f6 | [  {  "name": "Raspberry Pi 3 19",  "typeId": 2,  "subtypeId": 1,  "hardwareId": "123456789019",  "spaceId": "8b73d652-4fa3-46cb-8ac2-b27bfe3c10f6",  "status": "Provisioned",  "id": "ad6921b8-813f-45d8-ac5c-8892efc45e52"  }  ] | Да |
| Получить информацию об определяемой пользователем функции | https://electricitydigitaltwin.northeurope.azuresmartspaces.net/management/api/v1.0/userdefinedfunctions | [  {  "id": "1f1dd40e-5fc1-465f-af05-76ee0ce232f6",  "spaceId": "439ee6ea-d477-4f50-8c02-f92babea3fde",  "name": "Motion Processor",  "disabled": false  }  ] | Да |