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**

[ГЛОССАРИЙ 5](#_gjdgxs)

[ВВЕДЕНИЕ 6](#_30j0zll)

[1. КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ, ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ 9](#_1fob9te)

[2. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ 12](#_3znysh7)

[2.1. Обзор технологий для обработки данных, генерируемых устройствами Интернета вещей 12](#_2et92p0)

[3. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ 15](#_tyjcwt)

[4. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ 15](#_3dy6vkm)

[5. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ 15](#_1t3h5sf)

[6. ТЕСТИРОВАНИЕ 15](#_4d34og8)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 15](#_2s8eyo1)

[ЛИТЕРАТУРА 15](#_17dp8vu)

[ПРИЛОЖЕНИЯ 18](#_3rdcrjn)

# 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 (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 разрабатываемой системы (Digital Twin). 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. Эта концепция рассмотрена в статьях [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 и Amazon Web Services. Ключевым преимуществом данных платформ является широкий набор инструментов, в частности, для создания решений Интернета вещей и цифровых двойников. 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. Azure Digital Twins позволяет запрашивать данные из физического пространства, а не из многих разрозненных датчиков [6]. AWS IoT Things Graph — cхожий продукт от Amazon. Этот сервис позволяет создавать автоматизированные системы Интернета вещей, позволяющие осуществлять связь между web-сервисами и физическими устройствами, использующими различные протоколы, форматы данных и синтаксис сообщений. Данное решение предоставляет мощное средство визуализации построенного графа с возможностью редактирования связей между устройствами и приложениями прямо в редакторе потоков данных.

*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 …..

# 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]. Поэтому, именно благодаря применимости этого подхода к различным производственным процессам появилось множество наполненных новым содержанием и возможностями терминов, описывающих существовавшие ранее подходы [9]. Так, на замену автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУ ТП) приходит концепция промышленного Интернета вещей (IIoT). Данный подход предлагает использование взаимосвязанных датчиков, приборов и других устройств, объединенных в сеть с промышленными приложениями компьютеров, включая, помимо прочего, управление производством и энергопотреблением. Такое соединение позволяет собирать, обмениваться и анализировать данные, что потенциально способствует повышению производительности и эффективности, а также другим экономическим преимуществам [11]. Одним из подходов к применению IIoT является концепции «Индустрия 4.0» (Industry 4.0) [12]. Согласно Industry 4.0, экономика находится на пороге четвертой промышленной революции — «умных» предприятиях. Ее знаковые моменты — внедрение киберфизических систем и переход к персонализированному производству [12]. Кибернетические 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), 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. [13]. 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) — 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 [14]. 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.

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. 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 мегаЦОДы нарастает обратный процесс, получивший название «периферийные вычисления» (fog computing), когда анализ собираемых данных и выработка управляющих воздействий происходят в узлах, максимально приближенных к конечным устройствам [15]. В будущем все в большей степени анализ будет производиться самими устройствами, что позволит минимизировать задержку на принятие решений и повысит автономность устройств. Только концепции гибридных облачных сред могут решить поставленные перед концепцией цифровых двойников задачи.

# АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

## Обзор технологий для обработки данных, генерируемых устройствами Интернета вещей

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 и Amazon Web Services. Ключевым преимуществом данных платформ является широкий набор инструментов, в частности, для создания решений Интернета вещей и цифровых двойни-ков.

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 [16]. Azure Digital Twins имеет следующие ключевые возможности:

* *пространственный интеллектуальный граф* является виртуальным представлением физического окружения. С его помощью можно моделировать связи между пользователями, расположениями и устройствами;
* *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 |

AWS IoT Things Graph — cхожий продукт от Amazon. Этот сервис позволяет создавать автоматизированные системы Интернета вещей, позволяющие осуществлять связь между web-сервисами и физическими устройствами, использующими различные протоколы, форматы данных и синтаксис сообщений [17]. 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

# АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

# РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

# 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. Boyes, Hugh; Hallaq, Bil; Cunningham, Joe; Watson, Tim (October 2018). "The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework". Computers in Industry. 101: 1–12.
12. 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.
13. 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.
14. 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).
15. 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.
16. Azure Digital Twins Documentation. [Электронный ресурс] URL: https://docs.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/ (дата обращения 11.02.2019).
17. 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).

# ПРИЛОЖЕНИЯ